

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Françoise Balibar

Professeur émérite de physique à l'Université Paris VII – Denis Diderot

Bernadette Bensaude-Vincent

Professeur d'histoire et de philosophie des sciences à l'Université Paris X – Nanterre

Michel Morange

*Professeur de biologie à l'Université Pierre et Marie Curie – Paris VI
et à l'École Normale Supérieure (Ulm)*

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE

Dominique Lecourt

Dictionnaire d'histoire
et philosophie des sciences

Secrétaire de rédaction
Thomas Bourgeois

OUVRAGE PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS
DU CENTRE NATIONAL DU LIVRE



QUADRIGE / PUF

PLAN DE L'OUVRAGE

Préface à la 4 ^e édition	VI
Avant-propos	VII
Table des entrées	IX
Présentation des auteurs	XV
Utilisation du dictionnaire	XX
Corpus	1 à 1005
Index nominum	1007 à 1015
Index rerum	1017 à 1032

ISBN 213054499-1

ISSN 0291-0489

Dépôt légal — 1^{re} édition : 1999

4^e édition mise à jour « Quadrige » : 2006, septembre

© Presses Universitaires de France, 2006

Grands dictionnaires
6, avenue Reille, 75014 Paris

PRÉFACE À LA 4^e ÉDITION

AVANT-PROPOS

Voici donc – déjà – la quatrième édition du *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences* dans la collection « Quadrige ».

Je veux voir dans ce succès la reconnaissance par les lecteurs de la qualité des contributions réunies dans ce livre. Mais c'est aussi l'intérêt d'un vaste public qui se manifeste ainsi pour une discipline naguère considérée comme marginale dans les cursus philosophiques et qui était le plus souvent absente des cursus scientifiques et médicaux.

Cette édition est véritablement nouvelle. Plusieurs entrées importantes ont été introduites pour pallier quelques manques criants : Archimède, Bohr, Euclide, Gödel ou Biodiversité, Controverses, Économie, Vie... Les bibliographies ont été réactualisées, certains articles corrigés, réécrits et étendus, d'autres retraduits. Enfin, l'ouvrage a été entièrement recomposé dans une nouvelle police de caractères pour en accroître le confort de lecture.

Dominiq LECOURT, septembre 2006

La plus haute ambition de ce Dictionnaire serait d'introduire ses lecteurs aux réalités de la pensée scientifique. Dans un monde qu'on façonne, pour une grande part, les développements de la technologie et qui a érigé la science en autorité absolue, ces réalités s'avèrent en effet paradoxalement méconnues. Et ce paradoxe ne va pas sans provoquer un grave malaise, lequel affecte aussi bien l'allure même de la recherche que l'enseignement des sciences et plus généralement la civilisation dite « occidentale ».

Aux chercheurs scientifiques eux-mêmes tendent aujourd'hui à s'imposer une image et une pratique purement calculatoire et opérative de la science. Nombre d'entre eux, emportés par le jeu d'une concurrence internationale acharnée, en viennent à oublier qu'elle représente d'abord une extraordinaire aventure intellectuelle. Ils n'accordent plus guère d'intérêt à l'audace exemplaire dont y fait preuve la pensée humaine lorsqu'elle n'hésite pas à critiquer méthodiquement ses présupposés les mieux accrédités pour en finir avec ses tâtonnements, surmonter ses échecs et rectifier ses erreurs.

Du fait de cet oubli et de cette négligence, on a vu la pédagogie des sciences s'infléchir dans un sens dogmatique. Si la science en effet, n'est, comme on le prétend, qu'un instrument de puissance et réserve de certitudes, son enseignement visera essentiellement la maîtrise de l'instrument et récompensera non pas les esprits les plus inventifs mais les plus dociles. Connaître l'histoire de la formation – et des transformations – d'un concept scientifique, comme celui, par exemple d'atome ou de champ, passera alors pour un luxe. Et pourtant cette histoire apparaît comme la meilleure voie pour accéder à la signification de ce concept, dès lors qu'on en inscrit l'énoncé dans l'avenue des problèmes qu'il a eu pour fonction de maîtriser.

La célébration perpétuelle des succès de la science, l'émerveillement devant les exploits technologiques mis en scène par les médias, en fixant l'attention sur les résultats les plus spectaculaires, finissent par masquer aux yeux du plus grand nombre le travail opiniâtre d'une pensée ardente qui, de génération en génération, signe la prise humaine sur le monde et ne cesse de l'étendre. Loin de diffuser les connaissances, comme elle le prétend, la vulgarisation impose alors un récit épique qui réveille de vieilles mythologies et se révèle mystificateur dès lors qu'il dissimule le secret des réussites les plus éclatantes aussi bien que des plus humbles progrès.

Trop souvent, les philosophes n'ont fait qu'accentuer le trait et ont consenti à valider cette caricature de la science. Les uns y ont trouvé des éléments pour construire une notion unitaire du Progrès qui s'est présentée depuis le milieu du XIX^e s. comme le noyau d'une philosophie évolutionniste de l'histoire partagée par les « classes productives » occidentales. Industriels et prolétaires réunis s'en sont, un temps, concurremment autorisés pour garantir à ceux qui en faisaient les frais que leur ascension sociale apporterait prospérité et paix à l'humanité tout entière.

D'autres ont cru découvrir, dans la même image de la science, les motifs d'une transmutation scientifique de la philosophie sous la bannière de l'épistémologie. Poussant le positivisme à l'extrême, certains ont prétendu pouvoir conférer une certitude absolue aux énoncés de la science grâce à l'examen logique de son langage. Ils se sont fait gloire de l'expurger de toute trace de métaphysique.

Les spécialistes des sciences sociales et humaines naissantes, en quête de positivité, ont prêté une oreille complaisante à ces discours. Les uns ont inscrit leurs théories dans les perspectives progressistes dessinées par les philosophies évolutionnistes de l'histoire ; les autres ont cru pouvoir, à l'école du positivisme, rejouer pour leur propre compte la grande scène mythique du divorce entre science et philosophie.

L'oubli des réalités de la pensée scientifique a enfin servi d'argument à tous les penseurs qui ont cru devoir, à contre-courant, dénoncer l'insatiable désir de savoir et l'appétit de puissance de « l'homme faustien » qu'incarnerait à leurs yeux le savant moderne. Certaines mises en cause actuelles de la technoscience ne font que renouveler ce thème qui fut particulièrement en honneur dans l'entre-deux-guerres.

Nous avons, dans le présent Dictionnaire, adopté un tout autre point de vue sur la science. Nous nous sommes assigné pour première tâche de mettre au jour les présupposés, les ressorts et les perspectives philosophiques de la pensée qui a toujours inspiré le mouvement de la science, jusque dans ses impasses.

Voilà pourquoi nous n'avons pas écrit un Dictionnaire d'épistémologie qui présenterait l'examen technique, plus ou moins formalisé, des théories et méthodes mises en œuvre dans les sciences contemporaines. Nous n'avons

retenu des notions-clés de cette discipline que celles qui ont pu jouer un rôle dans la pensée scientifique vivante, et nous les avons elles-mêmes traitées de façon historique.

Nous n'avons pas davantage écrit un Dictionnaire d'histoire des sciences qui ferait l'inventaire systématique des progrès marquants de la science dans ses différentes branches. Sans aucune prétention à l'exhaustivité, nous n'avons retenu de l'histoire effective des sciences que les épisodes susceptibles de mettre en lumière la problématisation d'un phénomène et sa conceptualisation sous forme d'un objet de connaissance.

Bref, nous avons écrit un Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences dont l'originalité consiste à unir indissociablement réflexion philosophique et enquête historique dans l'investigation de la pensée scientifique.

L'ouvrage s'adresse ainsi à tous ceux qui ont affaire aux sciences de la nature, qu'ils soient chercheurs, ingénieurs, médecins, pédagogues ou étudiants, et qui sont de plus en plus nombreux à ne pas se satisfaire du positivisme dominant. Il pourra utilement contribuer à l'enseignement de la philosophie qui ne manquera pas de s'instituer dans les cursus scientifiques de l'enseignement supérieur, si l'on veut y stimuler l'esprit critique et y développer les facultés d'invention. Il constituera ainsi un instrument de travail pour ceux des professeurs de philosophie qui n'ont pas commis la faute de rayer la science de leur souci et de prendre ainsi le risque de faire passer la philosophie pour une discipline littéraire à simple valeur culturelle. Il apportera des repères à la réflexion de ceux des spécialistes en sciences sociales et humaines qui n'admettent pas de voir leurs disciplines ravalées au rang de techniques d'adaptation sociale et s'interrogent en conséquence sur leur scientificité.

Puisque la conceptualisation des objets de la recherche constitue la première des réalités de la pensée scientifique sur laquelle nous avons voulu faire porter l'accent, les principales entrées du Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences désignent des concepts, et donnent lieu à des articles substantiels présentant l'histoire des problèmes dont ont dû se saisir les hommes de science pour les former.

La pensée scientifique ne saurait cependant se réduire aux concepts. Elle a également une réalité matérielle. Comment penser l'élaboration des concepts et la transmission des connaissances hors des institutions qui y contribuent ? Comment ne pas faire référence aux conditions économiques et sociales du progrès des connaissances aussi bien que des développements techniques qui les sollicitent ou les réalisent ?

On trouvera donc dans cet ouvrage des entrées correspondant à quelques-unes des institutions majeures qui ont pu promouvoir et orienter la recherche, des Académies à l'Institut Pasteur ou à la Fondation Rockefeller. Et l'on a fait état, dans le corps même des articles, des conditions sociales d'existence de la « cité scientifique » (Gaston Bachelard) chaque fois que cela s'est imposé. Bref, il nous a semblé que les querelles qui ont longtemps opposé en histoire des sciences les « internalistes » aux « externalistes » appartenaient à un passé révolu. Nul ne saurait analyser le développement interne, conceptuel et théorique d'une science sans se référer aux conditions externes, sociales et institutionnelles de son existence. Mais il va de soi qu'il serait illusoire de considérer l'interne comme une manière d'expression ou d'émanation de l'externe. Sous cette réserve, les affrontements entre histoire et sociologie des sciences, naguère si virulents, n'ont guère de sens lorsqu'il s'agit comme ici de présenter et d'analyser les formes de réalisation de la pensée scientifique inventive.

Nous n'avons pas voulu non plus tenir pour négligeable le rôle des individus qui ont contribué de façon souvent décisive à l'élaboration de la pensée scientifique et lui ont conféré une tournure, un style, propre. Le lecteur trouvera donc dans ce Dictionnaire de nombreuses entrées correspondant à des noms propres. Patronymes d'hommes de science, de philosophes ou d'épistémologues, ils n'ont pas fait à proprement parler l'objet d'articles mais de notices, lesquelles valent par la bibliographie qui les accompagne et surtout par les corrélats auxquels elles renvoient. De la biographie des uns et des autres, nous n'avons retenu que la part qu'ils ont prise au processus de la pensée scientifique.

Ces corrélats comme les index de cet ouvrage manifestent le mouvement même de la science en acte. Nous les devons au travail rigoureux et méthodique de Reynal Sorel dont je ne serai pas le premier à vanter l'exceptionnelle compétence. Anne-Marie Dauzat nous a apporté le concours de sa connaissance aigüe de la langue française, jusqu'en des matières qui parfois la bousculent. Le rôle qu'ont joué l'enthousiasme et l'opiniâtreté de Thomas Bourgeois pendant cinq ans dans la mobilisation des auteurs a été décisif. Sans lui, ce Dictionnaire n'existerait pas.

Tel qu'il existe, le Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences manifeste l'émergence d'une communauté de travail originale qui a rassemblé dans un même effort de réflexion près de deux cents chercheurs et universitaires français et étrangers, scientifiques, philosophes, historiens, sociologues...

En les remerciant tous chaleureusement d'avoir bien voulu se prêter au jeu d'un type d'écriture auquel certains n'étaient pas accoutumés, je forme le vœu que cet ouvrage permette à cette communauté de se renforcer et de s'élargir. Il se pourrait que non seulement la science mais la philosophie et, par elle, l'ensemble des formes de la pensée, y gagnent un peu plus de liberté.

Dominique LECOURT
Professeur de philosophie à l'Université Paris VII – Denis Diderot
Directeur du Centre Georges Canguilhem

Abduction [Logique] (Frédéric KORICHE et Jean SALLANTIN)
Abstraction (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
Académies (Jean DHOMBRES)
Acide et base (Jean-Claude COMPAIN)
Action immédiate à distance → Champ
Actualisme ou uniformitarisme (Gabriel GOHAU)
ADN (Michel MORANGE)
Affinité [Chimie] (Père GRAPPI)
Agronomie (Gilles DENIS)
Alchimie (Pierre LASZLO)
Alembert Jean Le Rond d' (François REMOISSENET)
Analogie (Alié BENMAKHLLOUF)
Analyse chimique (Étienne ROTH)
Analyse complexe [Mathématiques] (Jean MERKER)
Analyse diophantienne (Roshidi RASHED)
Analyse et synthèse [Mathématiques] (Roshidi RASHED)
Analyse fonctionnelle [Mathématiques] (Jean DHOMBRES)
Analyse harmonique [Mathématiques] (Alain MICHEL)
Analyse non standard (Martin ZERNER)
Anatomie comparée (Bernard BALAN)
Antimatière [Physique/Cosmologie] (Helge KRAGH)
A priori (Jocelyn BENOIST)
Archimède (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
Aristote (Ali BENMAKHLLOUF)
Aristotélisme → Abstraction ; Causalité (Principe de) ; Mouvement ; Proposition
Arrhenius Svante (Élisabeth CRAWFORD)
Atome [Physique/Chimie] (Françoise BALIBAR et Bernadette BENSUAUDE-VINCENT)
Atomisme logique (Ali BENMAKHLLOUF)
Automate (Jean-Claude BEAUNE)
Avicenne (Ali BENMAKHLLOUF)
Avogadro (Loi d') (Catherine KOUNELIS)
Avogadro (Nombre d') (Catherine KOUNELIS)
Axiomatisation et formalisation [Mathématiques] (Alain HERREMAN)

Beltrami Eugenio (Rudolf BROUCHE)
Bergsonisme (Frédéric WORMS)
Berkeley George (Geneviève BRYKMAN)
Bernard Claude (Dominique LECOURT)
Berthelot Marcelin (Jean JACQUES)
Berthollet Claude-Louis (Père GRAPPI)
Bichat Xavier (Éric HAMRAOUI)
Big bang (Marc LACHEZE-REY)
Biodiversité (Pascal TASSY)
Bioéthique (Antoine COURBAN)
Biogéographie (Gérard MOLINA)
Biotechnologies (Jean-François PICARD)
Bohr Niels (François LURCAT)
Bonnet Charles (Éric HAMRAOUI)
Borel Émile (Stéphane CALLENS)
Bourbaki (Pierre CARTIER)
Brahé Tycho (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
Bricolage (Michel MORANGE)
Briggs Henry (Jean-Pierre SUTTO)
Bruno Giordano (Dominique LECOURT)
Brunschvicg Léon (Dominique LECOURT)
Buffon (Jean Paul THOMAS)
Bunge Mario (François BOITUZAT)

Canguilhem Georges (Dominique LECOURT)
Cantor Georg (Hourya SINACEUR)
Cardan Girolamo (Jean-Pierre SUTTO)
Carnap Rudolf (Jacques DUBUCS)
Carnot Lazare Nicolas Marguerite (Jean-Pierre SUTTO)
Carnot Sadi (Dominique LECOURT)
Cartésianisme (Vincent AUCANTE)
Catalyse (Jean-Claude COMPAIN)
Catastrophisme [Biologie/Géologie] (Hervé LE GUYADER)
Catégories et foncteurs [Mathématiques] (Frédéric PATRAS)
Cauchy Augustin Louis (Jean-Pierre SUTTO)
Causalité (Principe de) [Physique] (Dominique LECOURT)
Causalité classique [Physique] (Christiane VILAIN)
Cellule (François DUCHESNEAU)
Cercle de Vienne (Allan JANIK)
Chaleur [Physique] (Jean-Pierre MAURY)
Champ [Physique] (Françoise BALIBAR)
Chaos et déterminisme (David AUBIN)
Chimie physique (Christiane BUES)

Babbage Charles (François GUÉRY)
Bachelard Gaston (Pascal NOUVEL)
Bacon Francis (François BOITUZAT)
Bactériophage (Charles GALPERIN)
Baumé Antoine (Anne Claire DÉRÉ)
Beccquerel Henri (Soraya BOUDIA)

- Church Alonso (Pablo ARGON)
 Clairaut Alexis Claude (Jean-Pierre SUTTO)
 Classification [Botanique] (Hervé LEGUYADER)
 Classification [Chimie]
 (Bernadette BENSUADE-VINCENT)
 Clonage (Pascal NOUVEL)
 Cognition et sciences cognitives
 (Francisco J. VARELA)
 Cognitivisme (Daniel ANDLER)
 Combinatoire [Mathématiques]
 (Jean-Claude FOURNIER
 et Michel LAS VERGNAS)
 Comète (Jean-Pierre MAURY)
 Complémentarité [Physique] (Michel BITBOL)
 Complexité (Jean-Louis LEMOIGNE)
 Complexité algorithmique [Mathématiques]
 (Claire KENYON)
 Computation (Jean-Louis LEMOIGNE)
 Comte Auguste (François BOITUZAT)
 Concept (Anne-Françoise SCHMID)
 Condorcet (Jean-Pierre SUTTO)
 Conjecture [Mathématiques] (Marc HINDRY)
 Constante de Hubble (Lucienne GOUGUENHEIM)
 Constantes physiques (Gilles COHEN-TANNOUJJI)
 Constructivisme [Mathématiques] (Jacques DUBUCS)
 Contingence (Jean Paul THOMAS)
 Continuité (Emmanuel RENAULT)
 Controverse Bohr-Einstein (Anouk BARBEROUSSE)
 Controverses (Dominique PESTRE)
 Conventionalisme (Anne-Françoise SCHMID)
 Copernic Nicolas (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
 Corps noir (Françoise BALIBAR)
 Corpuscule [Physique] (Françoise BALIBAR)
 Correspondance (Principe de) [Physique]
 (Olivier DARRIGOL)
 Corroboration (Alain BOYER)
 Couleur [Physique] (Michel BLAY)
 Courant de convection (Vincent DEPARIS)
 Cournot Antoine-Augustin (Claude MÉNARD)
 Couturat Louis (Dominique LECOURT)
 Créationnisme (Jacques ARNOULD)
 Crick Francis (Pascal NOUVEL)
 Crise de la physique moderne (Dominique LECOURT)
 Cristal [Physique/Chimie/Géométrie] (Jean JACQUES)
 Criticisme (Christian RUBY)
 Cuvier Georges (Jean Paul THOMAS)
- Darwinisme (Patrick TORT)
 Davidson Donald (Sandra LAUGIER)
 Découverte (Jacques BONITZER)
 Dedekind Julius Wilhelm Richard (Jean-Pierre SUTTO)
 Déduction [Logique] (Denis VERNANT)
 Delbrück Max (Jean Paul THOMAS)
 Démonstration [Mathématiques] (Ali BENMAKHOLOUF)
 Dennett Daniel Clement (Élisabeth PACHERIE)
 Depéret Charles (Éric HAMRAOUI)
 Dérive des continents (Vincent DEPARIS)
 Descartes René (François REMOISENET)
 Déterminisme (Dominique LECOURT)
 Développement [Biologie] (Daniel BEQUEMONT)
- De Vries Hugo (Pascal NOUVEL)
 Dialectique (Emmanuel RENAULT)
 Donné (Jocelyn BENOIST)
 Duhem Pierre (Dominique LECOURT)
 Dummett Michel (Ali BENMAKHOLOUF)
- Écologie (Pascal ACOT)
 Écologie comportementale
 (Georges GUILLE-ESCURÉ)
 Économie théorique (Philippe MONGIN)
 Einstein Albert (Françoise BALIBAR)
 Electrochimie (David KNIGHT)
 Électron (Benoît LELONG)
 Élément [Chimie] (Bernadette BENSUADE-VINCENT)
 Élémentarité [Physique] (Gilles COHEN-TANNOUJJI)
 Embryogenèse (Jean-Louis FISCHER)
 Empirio-criticisme → Empirisme ; Empirionisme ;
 Espace : la critique de Mach
 Empirionisme (Dominique LECOURT)
 Empirisme (Didier DELEULE)
 Énergétisme (Dominique LECOURT)
 Énergie [Physique] (Françoise BALIBAR)
 Enriques Federigo (Éric ÉMERY)
 Enseignement des sciences (Nicole HULIN)
 Ensemble [Mathématiques] (Hourya SINACEUR)
 Entropie (Paolo D'ORIO)
 Environnement (Catherine LARRÈRE
 et Raphaël LARRÈRE)
 Épidémie (François DELAPORTE)
 Épistémologie (Dominique LECOURT)
 Équation (Martin ZERNER)
 Équivalence (Principe d') [Physique] (John STACHEL)
 Erreur → Maîtrise de l'erreur
 Espace : la critique de Mach (Michel PATY)
 Espace-temps (John STACHEL)
 Espèce [Biologie] (Charles DEVILLERS)
 Éther [Physique] (Scott WALTER)
 Euclide (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
 Eugénisme (Michel VEUILLE)
 Évidence (François GUÉRY)
 Évolutionnisme [Biologie] (Jean GAYON)
 Expansion de l'univers (Marc LACHÉZE-REY)
 Expansion terrestre (Gabriel GOHAU)
 Expérience (Anastasios BRENNER)
 Expérience cruciale (Sandra LAUGIER)
 Extension [Mathématiques] (Catherine GOLDSTEIN)
- Facteur d'échelle (Vincent BONTEMS)
 Fait (Robert NADEAU)
 Feigl Herbert (Bernard ANDRIEU)
 Feyerabend Paul K. (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
 Feynman Richard (Françoise BALIBAR)
 Fin thermique de l'univers (Paolo D'ORIO)
 Foncteurs → Catégories et foncteurs
 Force [Physique] (Sophie ROUX)
 Force vive → Entropie ; Travail
 Formalisation en mathématiques → Axiomatisation
 et formalisation
 Formalisme [Mathématiques] (Mathieu MARION)
 Forme (Ali BENMAKHOLOUF)
- Fossile (Jean GAUDANT)
 Foucault Michel (Dominique LECOURT)
 Fourier Joseph (Alain MICHEL)
 Frege Gottlob (Ali BENMAKHOLOUF)
- Galilée (François REMOISENET)
 Gaudry Albert Jean (Jean Paul THOMAS)
 Gauss Carl Friedrich (Alain MICHEL)
 Gaz [Chimie] (Ferdinando ABBRI)
 Gaz (Théorie des) [Physique] (Jean-Pierre MAURY)
 Gène (Gilles DENIS)
 Génération spontanée (Marie-Christine MAUREL)
 Génétique (Jean GAYON)
 Génie génétique → Bioéthique ; Biotechnologie
 Géocentrisme (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
 Geoffroy Saint-Hilaire Étienne (Jean Paul THOMAS)
 Géométries (Frédéric PATRAS)
 Gödel Kurt (Jean-Yves GIRARD)
 Goethe Johann Wolfgang von (Emmanuel RENAULT)
 Gonseth Ferdinand (Gilles COHEN-TANNOUJJI)
 Gravitation (John STACHEL)
 Groupes et symétrie [Mathématiques]
 (Christian HOUZEL)
- Hacking Ian (Sandra LAUGIER)
 Hadamard Jacques (Martin ZERNER)
 Haeckel Ernest (Pascal NOUVEL)
 Hanson Norwood Russell (Allan JANIK)
 Harvey William (Éric HAMRAOUI)
 Hasard (Jean GAYON)
 Hegel Georg Wilhelm Friedrich (Emmanuel RENAULT)
 Heidegger et la question de la technique
 (Reynal SOREL)
 Héliocentrisme (Jean-Pierre MAURY)
 Helmholtz Hermann Ludwig von
 (Claudine TIERCELIN)
 Hempel Carl Gustav (Anne-Françoise SCHMID)
 Hintikka Jaakko (François BOITUZAT)
 Hoffmann Roald (Pierre LASZLO)
 Hume David (François BOITUZAT)
 Husserl Edmund (Jocelyn BENOIST)
 Huxley Thomas Henry (Gerard MOLINA)
 Hybride [Biologie] (Jean Louis FISCHER)
 Hypothèse → Conjecture ; Déduction ; Induction ;
 Méthode ; Thémata
- Idéalisme (Christian RUBY)
 Idonéisme (Éric ÉMERY)
 Image [Optique] (Gérard SIMON)
 Immatérialisme (Geneviève BRYKMAN)
 Immunologie (Anne Marie MOULIN)
 Impetus (Christiane VILAIN)
 Indiscernabilité [Physique] (Françoise BALIBAR)
 Induction [Logique] (Claudine TIERCELIN)
 Induction complète [Mathématiques]
 (Jean-Pierre SUTTO)
 Inertie (Principe d') (François DE GANDT)
 Infini [Science classique] (Jean SEIDENGART)
 Infini mathématique (Hourya SINACEUR)
- Information [Biologie] (Michel MORANGE)
 Information et codage (Jean-Paul DELAHAYE)
 Informatique (Claude BOKSENBAUM
 et Jean SALLANTIN)
 Institut Pasteur (Pascal NOUVEL)
 Institut Rockefeller (Jean-François PICARD)
 Instrument (Anne-Marie MOULIN)
 Intentionnalité (Élisabeth PACHERIE)
 Invariance de jauge (Gilles COHEN-TANNOUJJI)
 Invention (Anne-Françoise SCHMID)
 Irréversibilité [Physique] (Bernard DIU)
 Isopérimètre (Roshdi RASHED)
- Jacob François (Pascal NOUVEL)
 Jardin du roi → Muséum national d'histoire
 naturelle
- Kant Emmanuel (François BOITUZAT)
 Kepler Johannes (Dominique LECOURT)
 Khuwarizmi (Al-) (Pablo ARGON)
 Koch Robert (Éric HAMRAOUI)
 Koyré Alexandre (François BOITUZAT)
 Krebs Hans Adolf (Pascal NOUVEL)
 Kuhn Thomas Samuel (Pascal NOUVEL)
- Lamarck (Goulven LAURENT)
 Lamarckisme (Goulven LAURENT)
 Langages formels [Logique] (Ali BENMAKHOLOUF)
 Langevin Paul (Bernadette BENSUADE-VINCENT)
 Laplace Pierre-Simon (Amy DAHAN DALMEDICO)
 Laue Max Theodor Felix von (John TRESCH
 et Simon WERRETT)
 Lavoisier Antoine-Laurent de
 (Bernadette BENSUADE-VINCENT)
 Leibniz Gottfried Wilhelm (Dominique LECOURT)
 Léonard de Vinci (François REMOISENET)
 Liaison [Chimie] (Georges BRAM)
 Local et global [Mathématiques]
 (Catherine GOLDSTEIN)
 Localisations cérébrales (Jean-Noël MISSA)
 Locke John (Geneviève BRYKMAN)
 Loeb Jacques (Éric HAMRAOUI)
 Logicisme (Robert NADEAU)
 Logique et informatique (Giuseppe LONGO)
 Loi biogénétique fondamentale
 (Dominique LECOURT)
 Loi de la nature (Dominique LECOURT)
 Lumière [Physique] (Michel BLAY)
 Lwoff André (Pascal NOUVEL)
 Lyell Charles Antony (Jean Paul THOMAS)
 Lyssenkisme (Dominique LECOURT)
- Mach Ernst (Jan SEBESTIK)
 Machine de Turing (Pablo ARGON)
 Maîtrise de l'erreur (Stéphane CALLENS)
 Marées (Jean-Pierre MAURY)
 Marx et Darwin (Dominique LECOURT)
 Masse [Physique] (Michel PATY)
 Masse cachée [Astrophysique] (Marc LACHÉZE-REY)
 Matière (François DAGOGNET)

- Matière [Physique] (Jean-Marc LÉVY-LEBLOND)
 Maxwell James Clark (Françoise BALIBAR)
 Mayr Ernst (Jean GAYON)
 Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) (John STACHEL)
 Mécanisme → Vitalisme et mécanisme
 Mendel Johann Gregor (Pascal NOUVEL)
 Merleau-Ponty Jacques (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
 Mesure (François DAGOGNET)
 Mesure en mécanique quantique (Françoise BALIBAR)
 Métamorphisme (Gabriel GOHAU)
 Mechnikoff Ilija Ilitch (Pascal NOUVEL)
 Méthode (Alain VOIZARD)
 Méthodes infinitésimales (Alain MICHEL)
 Meyerson Émile (Dominique LECOURT)
 Michelson Albert Abraham (Éric HAMRAOUI)
 Micro-organisme (Philippe BOUTIBONNES)
 Miescher Johann Friedrich (Éric HAMRAOUI)
 Mill John Stuart (Didier DELEULE)
 Modèle (Hourya SINACEUR)
 Mole (Christiane BUES)
 Molécule (Catherine KOUNELIS)
 Monisme (Bernard ANDRIEU)
 Monod Jacques (Pascal NOUVEL)
 Monstre [Biologie] (Patrick TORT)
 Morgan Thomas Hunt (Jean Paul THOMAS)
 Mort → Cellule ; Oncogène ; Plasma germinatif ; Vitalisme et mécanisme
 Mouvement [Physique] (Françoise BALIBAR)
 Muséum national d'histoire naturelle (Gérard MOLINA)
 Nagel Ernest (Anne-Françoise SCHMID)
 Nature (François GUÉRY)
 Nature (Système de la) (François DAGOGNET)
 Naturphilosophie (Emmanuel RENAULT)
 Nécessité (Jean-Marie MONNOYER)
 Neurath Otto (Anne-Françoise SCHMID)
 Neurone (Suzanne TYC-DUMONT)
 Neurophilosophie (Bernard ANDRIEU)
 Newton Isaac (François REMOISSENET)
 Nicolle Charles (Anne Marie MOULIN)
 Nobel Alfred (Élisabeth CRAWFORD)
 Nomenclature [Chimie] (Marco BERETTA)
 Nominalisme antique (Alain DE L'INFRA)
 Nominalisme moderne (Sandra LAUGIER)
 Objectivité (Robert NADEAU)
 Observable [Physique] (Françoise BALIBAR)
 Oncogène (Michel MORANGE)
 Opérationnalisme (Jean LEROUX)
 Origines de la vie (Marie-Christine MAUREL et Stéphane TIRARD)
 Orogenèse (Gabriel GOHAU)
 Paracelse (François REMOISSENET)
 Paradigme (Pascal NOUVEL)
 Parcimonie (Claudine TIERCELIN)
 Particule → Corpuscule
 Pascal Blaise (François BOITUZAT)
 Pasteur contre Pouchet (Dominique LECOURT)
 Pauli Wolfgang (Matthieu GOUNELLE)
 Pavlov Ivan Petrovitch (Pascal NOUVEL)
 Peirce Charles Santiago Sanders (Anne-Françoise SCHMID)
 Phénomène (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
 Phénoménisme (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
 Phénoménologie (Jocelyn BENOIST)
 Philogistique (Bernadette BENSAUDE-VINCENT)
 Physicalisme (Jan SEBESTIK)
 Piaget Jean (Éric ÉMERY)
 Planck Max (Matthieu GOUNELLE)
 Plasma germinatif (Charles LENAY)
 Platon (Bernard PIETTRE)
 Platonisme (Bernard PIETTRE)
 Poincaré Jules Henri (Anne-Françoise SCHMID)
 Popper Karl Raimund (Dominique LECOURT)
 Positivismisme (Dominique LECOURT)
 Positivismisme logique → Cercle de Vienne ; Wittgenstein et le positivisme logique
 Pragmatisme (Sandra LAUGIER)
 Précaution (Stephane CALLENS)
 Preuve [Logique] (Fernando GIL)
 Principe anthropique (Dominique LECOURT)
 Prion (Michel MORANGE)
 Prix Nobel des sciences (Élisabeth CRAWFORD)
 Probabilité [Logique/Mathématiques] (Jean LADRIÈRE)
 Probabilité [Physique] (Bernard DIU)
 Progrès (Dominique LECOURT)
 Propagation [Physique/Mathématiques] (Martin ZERNER)
 Proposition [Logique] (Ali BENMAKHOUF)
 Ptolémée Claude (Jean-Jacques SZCZECINIARZ)
 Putnam Hilary (Pascal ENGEL)
 Pythagore (Jean-François MATTÉI)
 Pythagorisme (Jean-François MATTÉI)
 Quantique (Jean-Marc LÉVY-LEBLOND)
 Quine Willard van Orman (Sandra LAUGIER)
 Race (Jean Paul THOMAS)
 Radioactivité (Soraya BOUDIA)
 Rationalisme (Bernard BALAN)
 Rationalité (Jean LADRIÈRE)
 Râzi (Ali BENMAKHOUF)
 Réalisme (Claudine TIERCELIN)
 Récepteur [Biochimie] (Christiane STINDING)
 Récurrance [Mathématiques/Logique] (Denis VERNANT)
 Réductionnisme (Élisabeth PACHERIE)
 Réel [Physique] (Dominique LECOURT)
 Référentiel (Éric ÉMERY)
 Référentiel en physique → Gravitation ; Relativité
 Réflexe (Jean-Noël MISSA)
 Réfutabilité (Alain BOYER)
 Régulation moléculaire (Michel MORANGE)
 Relativité [Physique] (John STACHEL)
 Renormalisation [Physique] (Gilles COHEN-TANNOUDI)
 Reproductibilité (Pascal NOUVEL)
 Réseau (Anne Marie MOULIN)
 Rétrovirus (Pascal NOUVEL)
 Révolution scientifique (Bernadette BENSAUDE-VINCENT)
 Roux Wilhelm (Éric HAMRAOUI)
 Royal Society (Fernando GIL)
 Rupture (Emmanuel RENAULT)
 Russell Bertrand (Ali BENMAKHOUF)
 Rutherford Ernest (John TRESCH et Simon WERRETT)
 Schleiden Mathias Jakob (Jean Paul THOMAS)
 Schrödinger Erwin (John TRESCH et Simon WERRETT)
 Schwann Theodor (Éric HAMRAOUI)
 Sciences cognitives (Brigitte CHAMAK)
 Scientisme (François BOITUZAT)
 Sel [Chimie] (Frederic L. HOLMES)
 Sélection [Biologie] (Jean GAYON)
 Sherrington Charles Scott (Éric HAMRAOUI)
 Sida (Bernard SEYTRÉ)
 Simondon Gilbert (Jean-Hugues BARTHÉLÉMY)
 Singularité [Mathématiques] (David TROTMAN)
 Smart John Jamieson Carswell (Bernard ANDRIEU)
 Sociétés savantes (Gérard MOLINA)
 Sociobiologie (Georges GUILLE-ESCURET)
 Sommerfeld Arnold Johannes Wilhelm (John TRESCH et Simon WERRETT)
 Spallanzani Lazzaro (Éric HAMRAOUI)
 Spencer Herbert (Laurent MUCCHIELLI)
 Spengler Carl (Éric HAMRAOUI)
 Stahl Georg Ernst (Anne-Claire DÉRÉ)
 Statistique (Alain DESROSIÈRES)
 Stéréochimie (Jean-Claude COMPAIN)
 Stratigraphie [Géologie] (Philippe GRANDCHAMP)
 Structure [Mathématiques] (Pierre CARTIER)
 Subsidence (Jean GAUDANT)
 Symbole [Chimie] (Marco BERETTA)
 Symétrie [Mathématiques/Physique] (Francis BAILLY et Rémy MOSSERI)
 Synthèse [Chimie] (Pierre LASZLO)
 Synthèse mathématique → Analyse et synthèse
 Système (Jean-Louis LEMOIGNE)
 Tarski Alfred (Hourya SINACEUR)
 Taxinomie (Jean Paul THOMAS)
 Technique (Dominique BOURG)
 Tectonique des plaques (Vincent DEPARIS)
 Teilhard de Chardin Pierre (Madeleine BARTHÉLEMY-MADAULE)
 Téléologie [Biologie] (Anne Marie MOULIN)
 Temps [Physique] (Étienne KLEIN)
 Terre [Géologie] (Vincent DEPARIS)
 Test [Physique] (Hervé BARREAU)
 Thémata [Physique] (Gerald HOLTON)
 Théorie (Hervé BARREAU)
 Topologie [Mathématiques] (Frédéric PATRAS)
 Transcendantal (Jocelyn BENOIST)
 Transformation géométrique (Rudolf BROUCHÉ)
 Travail (François VATIN)
 Trou noir (Jean-Pierre LUMINET)
 Turing Alan Mathison (Françoise SIRI)
 Uniformitarisme → Actualisme ou uniformitarisme
 Univers (Marc LACHEZE-REY)
 Valence [Chimie] (Georges BRAM)
 Validation (Jean-Maurice MONNOYER)
 Van Fraassen Bas (Anne-Françoise SCHMID)
 Van Leeuwenhoek Antonie (Éric HAMRAOUI)
 Vérification (Ali BENMAKHOUF)
 Vérité [Logique] (Ali BENMAKHOUF)
 Vie (Claude DEBRU)
 Virtuel [Physique] (Françoise BALIBAR)
 Virus (Pascal NOUVEL)
 Vision (Gérard SIMON)
 Vitalisme et mécanisme (Dominique LECOURT)
 Vivant (Théorie du) (Dominique LECOURT)
 Vulgarisation (Yves JEANNERET)
 Watson James Dewey (Pascal NOUVEL)
 Wegener Alfred (Dominique LECOURT)
 Weierstrass Karl Theodor Wilhelm (Alain MICHEL)
 Weismann August (Éric HAMRAOUI)
 Weizsäcker Carl Friedrich von (Ilke Angela MARÉCHAL)
 Whewel William (Éric HAMRAOUI)
 Whitehead Alfred North (Maurice ÉLIE)
 Wittgenstein Ludwig (Emmanuel HALAIS)
 Wittgenstein et le positivisme logique (Dominique LECOURT)
 Wolff Christian (Éric HAMRAOUI)
 Yukawa Hideki (John TRESCH et Simon WERRETT)

Présentation des auteurs

Ferdinando **ABBRI**, professeur d'histoire de la philosophie, doyen de la Faculté des lettres et de philosophie de l'université de Sienne-Arezzo. membre du comité scientifique de l'Istituto e Museo di Storia della Scienza de Florence

Pascal **ACOT**, chargé de recherche au CNRS. Institut d'histoire et philosophie des sciences et des techniques

Daniel **ANDLER**, professeur de philosophie à l'université de Paris X, directeur du Centre de recherche en épistémologie appliquée (CREA) CNRS-École polytechnique

Bernard **ANDRIEU**, maître de conférences à l'IUFRM de Lorraine (épistémologie)

Pablo **ARGON**, docteur en informatique, chargé de cours à l'École centrale de Nantes

Jacques **ARNOULD**, ingénieur de l'Institut national agronomique Paris-Grignon et de l'École nationale du génie rural des eaux et forêts, docteur en théologie

David **AUBIN**, Ph. D en histoire de l'université de Princeton, chercheur au Centre de recherche en histoire des sciences et des techniques du CNRS

Vincent **AUCANTE**, ingénieur en aéronautique, professeur de philosophie à l'École cathédrale

Francis **BAILLY**, chercheur au CNRS

Bernard **BALAN**, professeur d'histoire des sciences à l'université de Rouen

Françoise **BALIBAR**, professeur émérite de physique à l'université Denis Diderot-Paris VII

Anouk **BARBEROUSSE**, attachée temporaire d'enseignement et de recherche à l'ENS

Jean-Hugues **BARTHÉLÉMY**, docteur en épistémologie et histoire des sciences de l'université de Paris VII-Denis Diderot, professeur de philosophie au lycée Tristan-Corbière (Morlaix)

Madeleine **BARTHÉLÉMY-MADAULE**, professeur honoraire de philosophie à l'université de Picardie

Hervé **BARREAU**, directeur de recherche honoraire au CNRS

Jean-Claude **BEAUNE**, professeur de philosophie des sciences à la Faculté de philosophie de l'université Jean Moulin-Lyon III

Daniel **BECQUEMONT**, professeur d'études anglaises à l'université de Lille III

Ali **BENMAKHLOUF**, professeur de philosophie à l'université de Nice-Sophia Antipolis

Jocelyn **BENOIST**, professeur en philosophie à l'université de Paris I-Sorbonne

Bernadette **BENSAUDE-VINCENT**, professeur d'histoire et de philosophie des sciences à l'université de Paris X

Marco **BERETTA**, chercheur à l'Istituto e Museo di Storia della Scienza de Florence

Michel **BITBOL**, chargé de recherche au CNRS, chargé de cours à l'université de Paris I, docteur d'État ès sciences physiques, habilité à diriger des recherches en philosophie

Rudolf **BROUCHE**, professeur de mathématiques et d'histoire des mathématiques à l'université des sciences et techniques de Lille

Michel **BLAY**, directeur de recherche au CNRS, directeur scientifique adjoint du département sciences de l'homme et de la société du CNRS

François **BOITUZAT**, professeur en classes préparatoires aux grandes écoles (CPGE)

Claude **BOXSENBAUM**, professeur des universités

Jacques **BONITZER**, professeur honoraire à l'École nationale des ponts-et-chaussées

Vincent **BONTEMIS**, ATER à l'université de Paris VII-Denis Diderot et doctorant en philosophie et épistémologie à l'École des hautes études en sciences sociales

Soraya **BOUDIA**, historienne à l'Institut Curie

Dominique **BOURG**, chercheur rattaché au laboratoire Tech-Cico, directeur du département technologie et sciences de l'homme de l'université de technologie de Troyes

- Philippe BOUTIBONNES, professeur de microbiologie à l'université de Caen
- Alain BOYER, professeur de philosophie à l'université de Paris-Sorbonne-Paris IV, membre du CREA
- Georges BRAM, professeur de chimie et d'histoire de la chimie à l'université de Paris Sud-Orsay
- Anastasios BRENNER, professeur de philosophie à l'université Paul Valéry de Montpellier
- Geneviève BRYKMAN, professeur de philosophie à l'université de Paris X, directrice du Centre d'histoire de la philosophie moderne et contemporaine de Paris X
- Christiane BUES, doctorante en philosophie et épistémologie à l'université de Paris X, coordonnatrice des innovations pédagogiques au rectorat d'Aix-Marseille
- Stéphane CALLENS, maître de conférences en sciences économiques à l'université de Lille I, chercheur au laboratoire Clersé, Ifrésis-CNRS
- Pierre CARTIER, directeur de recherche en mathématiques (CNRS-ENS)
- Brigitte CHAMAK, ingénieur de recherche à l'INSERM, Unité savoies et pratiques dans le champ médical
- Gilles COHEN-TANNOUDJI, physicien au département de physique des particules élémentaires du CEA (Saclay)
- Jean-Claude COMPAIN, professeur de classe préparatoire au lycée Saint-Louis (Paris)
- Antoine COURBAN, professeur d'anatomie, directeur du laboratoire d'anatomie humaine à la Faculté de médecine de l'université Saint-Joseph de Beyrouth
- Élisabeth CRAWFORD, chargée de recherche au CNRS rattachée à l'Institut d'histoire des sciences à l'université Louis Pasteur de Strasbourg
- François DAGOGNET, professeur honoraire de philosophie à l'université de Paris I-Panthéon Sorbonne
- Amy DAHAN DALMEDICO, directeur de recherche au CNRS, centre Alexandre Koyré
- Olivier DARRIGOL, chargé de recherche en histoire des sciences au CNRS
- Claude DEBRU, professeur de philosophie des sciences à l'École normale supérieure (Ulm)
- François DE GANDT, professeur de philosophie à l'université de Lille
- Jean-Paul DELAHAYE, professeur d'informatique à l'université des sciences et technologies de Lille, directeur adjoint du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille
- François DELAPORTE, professeur de philosophie à l'université de Picardie-Jules Verne

- Didier DELEULE, professeur de philosophie comparée des sciences sociales à l'université de Paris X, président de la section philosophie du Conseil national des universités
- Gilles DENIS, ingénieur en agriculture, équipe de recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et sur les institutions scientifiques, université Denis Diderot-Paris VII-CNRS
- Vincent DEPARIS, attaché temporaire d'enseignement et de recherche à l'Institut de physique du globe de l'université Louis Pasteur-Strasbourg I
- Anne-Claire DÉRÉ, maître de conférences, chargée de cours à l'université catholique de l'Ouest (Angers et Guingamp) et à l'université permanente de Nantes, chercheur en histoire des sciences et des techniques au centre François Viète de l'université de Nantes
- Alain DESROSIÈRES, administrateur de l'INSEE, membre du Groupe de sociologie politique et morale (EHESS-CNRS)
- Charles DEVILLERS, professeur honoraire de biologie à l'université Denis Diderot-Paris VII
- Jean DHOMBRES, directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales
- Paolo D'IORIO, chargé de recherche au CNRS (philosophie)
- Bernard DIU, professeur de physique à l'université Denis Diderot-Paris VII
- Jacques DUBUCS, directeur de recherche au CNRS-Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques de Paris I
- François DUCHESNEAU, professeur de philosophie à l'université de Montréal
- Maurice ÉLIE, maître de conférences en philosophie à l'université de Nice-Sophia-Antipolis, membre du Centre de recherche d'histoire des idées du CNRS
- Éric EMERY, chargé de cours honoraire à l'École polytechnique fédérale de Zurich en méthodologie et histoire des sciences
- Pascal ENGEL, professeur de philosophie à l'université de Paris I-Panthéon Sorbonne
- Jean-Louis FISCHER, chargé de recherche au CNRS, chargé de cours à l'université Denis Diderot-Paris VII
- Jean-Claude FOURNIER, professeur d'informatique à l'université de Paris XII-Val-de-Marne
- Charles GALPERIN, maître de conférences émérite en histoire des sciences à l'université de Lille III
- Jean GAUDANT, maître de conférences à l'université Denis Diderot-Paris VII, secrétaire du Comité français d'histoire de la géologie (COFRHIGEO)

- Jean GAYON, professeur à l'université Paris I, membre senior honoraire de l'Institut universitaire de France (philosophie et histoire des sciences de la vie)
- Fernando GIL, directeur d'études à l'École des hautes études en sciences sociales, professeur à l'université nouvelle de Lisbonne
- Jean-Yves GIRARD, directeur de recherches au Centre national de la recherche scientifique, Institut de Mathématiques de Luminy, UPR 9016-CNRS
- Gabriel GOHAU, président du Comité français d'histoire de la géologie (COFRHIGEO)
- Catherine GOLDSTEIN, chargée de recherche au CNRS (mathématiques)
- Lucienne GOUGUENHEIM, professeur de physique à l'université de Paris XI, astrophysicienne à l'observatoire de Paris-Meudon
- Matthieu GOUNELLE, maître de Conférences à l'université Paris XI, astrophysicien au Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse
- Philippe GRANDCHAMP, professeur de classe préparatoire aux grandes écoles au lycée Hoche (Versailles)
- Pere GRAP, professeur associé de philosophie à l'université autonome de Barcelone
- François GUÉRY, professeur de philosophie, doyen de la Faculté de philosophie de l'université Jean Moulin-Lyon III
- Georges GUILLE-ESCURET, chargé de recherche au CNRS (ethnologie et zoologie)
- Emmanuel HALAIS, agrégé de philosophie, ATER à l'université de Paris VII-Denis Diderot (UPR de biologie)
- Éric HAMRAOUI, maître de conférences au CNAM (psychoanalyse, santé, travail)
- Alain HERREMAN, docteur en épistémologie et en histoire des sciences (Paris)
- Marc HINDRY, professeur de mathématiques à l'université Denis Diderot-Paris VII
- Frederic L. HOLMES, professeur d'histoire de la médecine à l'École de médecine du Connecticut
- Gerald HOLTON, professeur de physique et d'histoire des sciences à l'université de Harvard
- Christian HOUZEL, professeur à l'IPUM de Paris (Paris VII), membre de l'équipe de recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et sur les institutions scientifiques, université Denis Diderot-Paris VII-CNRS
- Nicole HULIN, maître de conférences en histoire des sciences à l'université Pierre et Marie Curie-Paris VI
- Jean JACQUES, directeur de recherche émérite au CNRS Collège de France (chimie des interactions moléculaires)
- Allan JANIK, directeur du Brenner Archiv de l'université d'Innsbruck, professeur honoraire de philosophie de l'université de Vienne
- Yves JEANNERET, professeur de sciences de l'information et de la communication à l'université de Lille III
- Claire KENYON, chargée de recherche au CNRS, laboratoire d'informatique du parallélisme, École normale supérieure (Lyon)
- Étienne KLEIN, physicien, ingénieur de l'École centrale de Paris, docteur en philosophie assistant du directeur des sciences de la matière au Commissariat à l'énergie atomique
- Frédéric KORICHE, docteur en informatique au laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique, Montpellier (CNRS)
- Catherine KOUNELIS, doctorante en histoire des sciences
- David KNIGHT, professeur d'histoire et de philosophie des sciences à l'université de Durham
- Helge KRAGH, professeur d'histoire des sciences à l'université d'Aarhus
- Marc LACHÈZE-REY, directeur de recherche au CNRS, astrophysicien au Centre d'études de Saclay
- Jean LADRIÈRE, professeur honoraire de philosophie à l'université catholique de Louvain
- Catherine LARRÈRE, professeur de philosophie à l'université de Bordeaux III
- Raphaël LARRÈRE, directeur de recherche à l'INRA
- Michel LAS VERGNAS, directeur de recherche au CNRS (mathématiques)
- Pierre LASZLO, professeur de chimie à l'École polytechnique (Paris) et professeur de philosophie des sciences à l'université de Liège
- Sandra LAUGIER, professeur de philosophie à l'université de Picardie-Jules Verne, membre junior de l'Institut universitaire de France 1999/2004 (philosophie anglo-saxonne)
- Goulven LAURENT, professeur émérite à l'université catholique de l'Ouest (Angers)
- Dominique LECOURT, professeur de philosophie et directeur du Centre Georges-Canguilhem à l'université Paris VII-Denis Diderot, Président du Comité d'éthique de l'Institut de recherche pour le développement (IRD)
- Hervé LE GUYADER, professeur de biologie évolutive à l'université de Paris XI

- Benoît LE LONG, sociologue au Centre national d'études des télécommunications
- Jean-Louis LE MOIGNE, professeur émérite de sciences des systèmes à l'université d'Aix-Marseille III
- Charles LENAY, maître de conférences en histoire et philosophie des sciences à l'université de technologie de Compiègne
- Jean LEROUX, professeur de philosophie à l'université d'Ottawa
- Jean-Marc LÉVY-LEBLOND, professeur à l'université de Nice, département de physique et de philosophie
- Alain DE LIBERA, directeur d'études en sciences religieuses à l'École pratique des hautes études
- Giuseppe LONGO, directeur de recherche au CNRS, École normale supérieure, département de mathématiques et d'informatique
- Jean-Pierre LUMINET, directeur de recherche au CNRS, astrophysicien à l'observatoire de Paris-Meudon
- François LURÇAT, professeur émérite à l'université de Paris XI (physique)
- Ilke Angela MARÉCHAL, écrivain, productrice d'émissions de radio
- Mathieu MARION, professeur de philosophie à l'université d'Ottawa
- Jean-François MATTÉI, professeur de philosophie à l'université de Nice-Sophia Antipolis
- Marie-Christine MAUREL, professeur de biologie à l'université Pierre et Marie Curie-Paris VI, chercheur en biologie et évolution prébiotique à l'Institut Jacques Monod
- Jean-Pierre MAURY, professeur de physique à l'université Denis Diderot-Paris VII
- Claude MÉNARD, professeur de sciences économiques à l'université de Paris I-Panthéon Sorbonne
- Joël MERKER, chargé de recherche en mathématiques au CNRS
- Alain MICHEL, professeur à l'université d'Aix-Marseille, directeur du Centre d'épistémologie et d'ergologie comparatives
- Jean-Noël MISSA, professeur de philosophie des sciences à l'université libre de Bruxelles, chercheur qualifié au Fonds national belge de la recherche scientifique
- Gérard MOLINA, professeur de philosophie à l'IUFM de Paris
- Philippe MONGIN, directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique-Laboratoire d'économétrie de l'École polytechnique
- Jean-Maurice MONNOYER, maître de conférences en philosophie à l'université Pierre Mendès France-Grenoble II
- Michel MORANGE, professeur de biologie à l'université Pierre et Marie Curie-Paris VI et à l'École normale supérieure (Ulm)
- Rémy MOSSERI, directeur de recherche au CNRS, groupe de physique des solides, universités de Paris VI-Paris VII
- Anne-Marie MOULIN, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'Unité savoirs et pratiques dans le champ médical à l'INSERM, professeur associé à la Faculté de médecine de Genève
- Laurent MUCCHIELLI, chargé de recherche au CNRS
- Robert NADEAU, professeur de philosophie, directeur du département de philosophie de l'université du Québec à Montréal
- Pascal NOUVEL, docteur en biologie et en philosophie, maître de conférences en philosophie des sciences à l'université Denis Diderot-Paris VII
- Élisabeth PACHERIE, chargée de recherche au CNRS-CEPERC (sciences cognitives)
- Frédéric PATRAS, chargé de recherches au CNRS (mathématiques), université de Nice-Sophia Antipolis
- Michel PATY, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'équipe de recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et sur les institutions scientifiques, université Denis Diderot-Paris VII-CNRS
- Dominique PESTRE, directeur d'Étude à l'École des hautes études en sciences sociales (histoire des sciences) et directeur du Centre Alexandre-Koyré
- Jean-François PICARD, ingénieur de recherche au CNRS, responsable du programme d'histoire des politiques de la science à l'Institut du temps présent
- Bernard PIETTRE, chargé de cours en philosophie à l'université de Picardie-Jules Verne
- Roshdi RASHED, directeur de recherche au CNRS, Centre d'histoire des sciences et des philosophies arabes et médiévales
- François REMOISSENET, ancien secrétaire de l'Institut d'histoire des sciences de Paris
- Emmanuel RENAULT, maître de conférences en philosophie à l'université de Bordeaux III
- Étienne ROTH, professeur honoraire au Conservatoire national des arts et métiers, ancien directeur du Commissariat à l'énergie atomique
- Sophie ROUX, doctorante en histoire des sciences
- Christian RUBY, docteur en philosophie, enseignant à Paris
- Jean SALLANTIN, directeur de recherche au CNRS
- Anne-Françoise SCHMID, maître de conférences en épistémologie à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon
- Jan SEBESTIK, directeur de recherche au CNRS (histoire et philosophie des sciences et des techniques)
- Jean SEIDENGART, professeur, directeur du département de philosophie de l'université de Reims Champagne-Ardenne
- Bernard SEYTRE, journaliste scientifique
- Gérard SIMON, professeur émérite à l'université de Lille III
- Hourya SINACEUR, directeur de recherche au CNRS (IHPST)-université Paris I
- Christiane SINDING, directeur de recherche à l'INSERM
- Françoise SIRI, doctorante en anthropologie cognitive
- Reynal SOREL, docteur en philosophie, Paris IV-Sorbonne
- John STACHEL, professeur émérite de physique à l'université de Boston, directeur du Center for Einstein Studies
- Jean-Pierre SUTTO, docteur en épistémologie et histoire des sciences de l'université Denis Diderot-Paris VII
- Jean-Jacques SZCZECINIARZ, professeur de philosophie à l'université Paris VII-Denis Diderot
- Pascal TASSY, professeur au Muséum national d'histoire naturelle (Unité paléobiodiversité du département histoire de la terre)
- Jean-Paul THOMAS, professeur de philosophie à l'Institut universitaire de formation des maîtres de Paris
- Claudine TIERCELIN, professeur de philosophie à l'université de Paris XII, membre associé à l'Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques
- Stéphane THIRARD, membre associé de l'équipe de recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et sur les institutions scientifiques, université Denis Diderot-Paris VII-CNRS
- Alain VOIZARD, professeur de philosophie à l'université du Québec à Montréal
- Scott WALTER, maître de conférences en philosophie à l'université de Nancy
- Simon WERRETT, doctorant au History and Philosophy of Sciences Dept. de l'université de Cambridge
- Frédéric WORMS, maître de conférences en philosophie à l'université de Lille III
- Martin ZERNER, professeur émérite de mathématiques à l'université de Nice
- sciences exactes et sur les institutions scientifiques, université Denis Diderot-Paris VII-CNRS
- Patrick TORT, directeur de l'Institut Charles Darwin International
- John TRESCH, doctorant au History and Philosophy of Sciences Dpt. de l'université de Cambridge
- David TROTMAN, directeur de l'École doctorale en mathématiques et informatique de Marseille, professeur à l'université de Provence
- Suzanne TYC-DUMONT, directeur de recherche émérite au CNRS, Unité de neurocybernétique cellulaire
- Francisco J. VARELA, directeur de recherche au CNRS, laboratoire de neurosciences cognitives et imagerie cérébrale à l'hôpital de la Salpêtrière
- François VATIN, professeur de sociologie à l'université de Paris X
- Denis VERNANT, professeur de philosophie, directeur du département de philosophie à l'université Pierre Mendès France-Grenoble
- Michel VEUILLE, directeur d'études à l'École pratique des hautes études
- Christiane VILAIN, maître de conférences en physique à l'université Denis Diderot-Paris VII, membre du département d'astrophysique relativiste et de cosmologie du CNRS, membre de l'équipe de recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et sur les institutions scientifiques, université Denis Diderot-Paris VII-CNRS
- Alain VOIZARD, professeur de philosophie à l'université du Québec à Montréal



Quand l'intitulé d'une entrée peut présenter une ambiguïté quant à son appartenance à une discipline, celle-ci est précisé sous l'intitulé.

Les articles sont suivis d'une bibliographie. Le rond noir ● introduit les principales œuvres de la personnalité étudiée ; le triangle noir ► présente les études critiques sur le sujet traité selon l'ordre alphabétique des auteurs. La mention « Coll. » à la fin de la bibliographie indique les ouvrages collectifs.

Comme on le sait depuis Diderot, la fonction des renvois est essentielle dans l'élaboration encyclopédique. Ainsi, la flèche → après un article suggère des entrées offrant des informations complémentaires.

Deux index orientent les lectures du Corpus : Nominum et Rerum. L'astérisque * placé à la droite d'une entrée des Index signale que la notion ou le nom propre indexé fait l'objet d'un article dans le Corpus.

ABDUCTION

LOGIQUE

Le terme d'abduction occupe une place centrale dans l'étude du raisonnement. D'un point de vue général, cette notion peut être définie comme le processus permettant d'expliquer un phénomène ou une observation à partir de certains faits, événements ou lois. L'abduction s'applique ainsi à une grande variété d'activités de raisonnement. Par exemple, l'interprétation d'une phrase exprimée dans un langage particulier est une explication de ce que la phrase veut dire. L'interprétation visuelle d'une scène peut être aussi considérée comme une forme d'abduction en faisant intervenir des objets qui expliquent les régularités observées de la scène. Probablement l'utilisation la plus commune de l'abduction est le raisonnement par diagnostic. Dans le domaine médical par exemple, le diagnostic final explique les signes et les symptômes d'un patient en supposant un dysfonctionnement tel qu'une maladie ou une fracture. Enfin l'abduction joue un rôle crucial dans la découverte scientifique, dans la formulation des hypothèses permettant d'expliquer une évidence observée (Thagard, 1988).

La notion d'abduction a pris, grâce à Peirce, une place prépondérante parmi les formes de raisonnement pratiquées en science et réalisables de manière informatique. Pour la comprendre, il est utile de l'examiner agissant dans un cadre logique et de la voir hors de ce cadre intervenir lors de la construction de savoir. Peirce a le premier promu l'abduction parmi les opérations majeures de raisonnement. Le plus simple est de reprendre l'examen que Peirce fait lui-même de l'abduction dans son livre *Le raisonnement et la logique des choses* (1934).

L'abduction hors de la logique

Pour raisonner, Peirce, comme Aristote, n'introduit pas la notion de vrai, il considère seulement l'inférence plausible. Pour lui la notion de croyance ne sert qu'à exprimer la capacité que nous avons de croire en un plan que nous échafaudons pour résoudre un problème. Peirce, enfin, reprend à son compte les trois types de raisonnement proposés par Aristote : l'induction, l'abduction et la déduction.

Peirce a également nommé l'abduction, rétroduction. Il entend ainsi exprimer que l'abduction fixe un choix provisoire dont la portée ne sera admise qu'ultérieurement. De ce fait, il fait intervenir une notion de choix révisable qui impose de préciser ce qui sera la conséquence de ce choix. C'est l'opération d'induction qui va tirer parti de ce choix.

Pour Peirce, l'abduction suggère et l'induction doit en tirer des lois de plus en plus précises. Pour illustrer ce processus, considérons la situation suivante : l'abduction propose des faits pour décrire des exemples et elle sélectionne ces derniers en tenant compte de ces faits. L'induction va formuler des expressions qui regroupent les exemples et elle va vérifier comment ces expressions sont effectivement présentes sur les exemples. De cette manière, l'induction réagit à l'abduction et l'abduction guide l'induction dans un processus de construction de savoir.

Nous allons maintenant présenter comment se distinguent ces trois opérations dans une démarche de construction de savoir. Nous allons examiner ces opérations relativement à la notion d'explication, puis selon leurs facultés de catégorisation.

Tout d'abord, pour Peirce, l'abduction et l'induction produisent deux différentes sortes d'explications. Pour l'induction, l'explication produite aura une plausibilité qui sera estimée par un calcul de probabilité, elle exprimera une loi *a priori* qui regroupe les exemples, les concentre et les représente en bloc. Pour l'abduction, l'explication viendra du choix d'une propriété particulière qui est adoptée provisoirement car elle explique des faits connus. Cette explication ne sera qu'*a posteriori* admise comme étant la bonne explication. L'induction et l'abduction se distinguent de la déduction, car pour la dernière il n'est pas utile de fournir une explication. En effet, dans cette dernière forme de raisonnement il est garanti que si les faits énoncés dans les prémisses sont assertés les conclusions sont également des assertions. Pour Peirce, l'induction doit se situer dans une démarche qui élabore des lois de plus en plus certaines. L'abduction s'inscrit dans cette démarche comme une force de suggestion.

Peirce introduit donc pour exprimer l'induction et l'abduction différentes notions : celle de choix, celle de succession et de convergence d'un raisonnement. Ces notions n'ont pas leur place dans un cadre simplement

logique. Nous nous trouvons devoir distinguer une vision logiciste de l'induction et de l'abduction et une vision plus large de ces dernières. Examinons cette dernière situation. Selon Peirce, il existe trois catégories pour organiser l'expression d'une connaissance. La primauté est constituée des propriétés qui expriment la substance ou l'essence des choses. Ce sont des propriétés qui sont attribuées définitivement aux choses. La secondarité est constituée des propriétés ou lois qui regroupent, mettent en relation et concentrent des ensembles de choses. La tiercéité exprime les propriétés qui permettent d'arriver à tirer des lois à partir de l'examen de substances et d'exemples. Pour Peirce, les régularités cachées, qui structurent et organisent le monde, appartiennent à la tiercéité.

Peirce a défini la « logique relative » pour prendre en compte ces différentes catégories. Cette logique est ainsi une logique de la construction des représentations de connaissance qu'il appelle logique des choses. Elle aborde le problème de la représentation selon une vision géométrique et catégorielle qui est plus dans la ligne de Leibniz que dans celle de Descartes. Pour fixer les idées, un universel condense en un point des existants qui, ensemble, constituent des faisceaux de points. L'universel est ainsi une propriété de type secondarité qui fixe en un seul point le faisceau existentiel des substances de nature primaire. Le big bang en tant qu'explosion d'un point qui construit l'univers dans sa diversité illustre bien la relation entre universel et existentiel chez Peirce.

Pour Peirce, l'induction sert à trouver des propriétés de nature secondaire et l'abduction les propriétés de nature primaire. On voit ainsi bien se distinguer l'abduction de l'induction. Dans la vision de Peirce, l'induction et la déduction se rapprochent par leur démarche. Elles ne diffèrent que par leur objet. L'induction collationne de nombreuses expériences abduites pour en tirer des lois alors que la déduction manipule des prédicats sans leur attribuer un statut catégoriel particulier comme celui d'expérience. On peut donc, comme cela sera montré par la suite, utiliser les mêmes mécanismes pour induire et déduire.

Peirce privilégie la démarche scientifique comme productrice de connaissances, il distingue les sciences inductives et abductives. Il place dans les sciences inductives toutes sciences comme l'astronomie, la physique ou les mathématiques qui améliorent en permanence la précision de leurs calculs, la certitude de leurs raisonnements. Il place dans les sciences abductives, qu'il appelle alors explicatives, les sciences expérimentales qui observent et décrivent notre monde. Ces sciences, comme la géologie, la biologie, progressent de controverses en controverses.

L'abduction a pour Peirce une force vitale, impulsive, réflexe, protection instinctive de l'espèce humaine et source d'erreur ; l'induction elle, est de nature réactive ou secondaire. Si le hasard est la source créatrice du monde qui abduit pour unique explication l'énoncé « tout vient du hasard », l'induction de manière réactive saura en tirer des lois qui se

perfectionneront et permettront constamment à l'humanité d'estimer mener des raisonnements déductifs en toute légitimité. Dans un tel système le processus d'induction à partir d'abductions corrige naturellement ses erreurs et construit une progression nécessaire du savoir. On a l'impression de savoir toujours avec de plus en plus de certitude, même si, au fond, il n'y a rien à savoir.

Dans une telle vision de la construction du savoir, l'existence de l'induction et de l'abduction opérationnalise la rationalité de la construction de théories formelles. Pour Peirce, l'abduction et l'induction, en instrumentant les catégories primaires et secondaires, permettent de définir le raisonnement en extériorité face à celui qui pratique l'esprit humain. Il considère que l'exercice d'une telle pratique oriente le devenir de l'homme vers ce qu'il appelle un animal rationnel.

Cette prise en compte de l'induction et de l'abduction dans une problématique de construction de représentations de connaissances est maintenant présente dans les recherches en informatique. Les notions de graphes conceptuels formalisent parfaitement la manière dont Peirce modélisait l'expérience et le raisonnement déductif. Les théories de l'apprentissage présentent les conditions dans lesquelles un raisonnement inductif peut fournir des lois plausibles. Le raisonnement abductif est présent dans la communication homme/machine : l'abduction propose à un opérateur humain des faits et des concepts dont il jugera l'opportunité de les introduire dans un raisonnement inductif pour accélérer la résolution d'un problème.

Nous avons ainsi montré comment induction et abduction vont de pair pour produire des théories. Nous allons maintenant examiner comment l'abduction intervient en logique quand on cherche à formuler la révision d'une théorie.

L'abduction dans un cadre logique

Il faut attendre cette fin de XX^e s., avec les travaux de Hempel, Quine et Ullian, pour que le concept d'abduction trouve une description logique. Spécifiquement, l'inférence abductive dans un cadre logique se définit comme suit : étant donné un fait B et la connaissance que A implique B, l'inférence du nouveau fait A est une abduction ou « explication » de B. Dans ce cas, nous disons que A est l'*explanans* et B l'*explanandum*. Par exemple, si notre jardin est « mouillé », alors une abduction possible de cette observation est que le jardin a été « arrosé ». Nous avons utilisé ici l'observation donnée et la connaissance qu'un jardin arrosé est naturellement mouillé. Par comparaison, notons qu'une inférence déductive habituelle se formaliserait ainsi : étant donné la prémisse A et la connaissance de ce que A implique B, il est possible de déduire la conclusion B. Dans ce dernier cas, nous appliquons tout simplement la règle d'inférence *modus ponens* bien connue en logique.

Intuitivement, nous pouvons dire que l'abduction vise à expliquer de nouveaux faits en se fondant sur une

théorie, tandis que la déduction sert à déterminer les conséquences logiques de cette théorie. Un problème clé de la recherche sur le raisonnement est de savoir si cette distinction intuitive se caractérise réellement par une différence au niveau logique. En d'autres termes, le concept d'abduction peut-il être complètement défini par la logique déductive ? Sinon, quels sont les outils supplémentaires qui permettent de formaliser l'abduction ?

Durant ces dernières décennies, l'inférence abductive a très souvent été formalisée comme une forme de relation déductive entre l'*explanandum* et l'*explanans*. Les travaux de Hempel sur les explications déductives nomologiques (1966) appartiennent à cette catégorie. Cette vision de l'abduction peut être caractérisée comme suit : supposons que nous disposons d'un ensemble de connaissances T appelé théorie de base ; un fait A est une abduction de B relativement à T si T muni de A infère déductivement B. En d'autres termes, l'*explanandum* B est une conséquence logique de l'*explanans* A relativement aux connaissances de base T. Puisque nous sommes ici dans un cadre logique, une deuxième condition est habituellement rajoutée : la théorie T muni de fait A doit être consistante. Pour illustrer ces deux conditions, reprenons l'exemple précédent. La théorie de base est réduite ici à la connaissance « arrosé implique mouillé ». Le fait « arrosé » est donc bien une abduction du fait « mouillé » dans le sens où il est consistant avec la théorie de base, et qu'il infère bien avec cette théorie l'observation donnée.

Cette théorie déductive de l'abduction est adoptée, aujourd'hui encore, dans un grand nombre de travaux en logique, en sciences cognitives et en intelligence artificielle. Malheureusement, les approches de ce type sont limitées par la nature implacable de la déduction. Plus précisément, elles ne parviennent pas à capturer certaines caractéristiques importantes de l'abduction. Dans cette perspective, divers auteurs ont proposé de généraliser cette théorie selon plusieurs directions. Nous en présentons ici quelques-unes.

Comme l'ont suggéré Quine et Ullian (1970), l'une des caractéristiques fondamentales de l'abduction est sa nature incertaine. D'une manière générale, nous ne pouvons toujours affirmer avec certitude qu'une explication constitue la cause réelle d'une observation. En découverte scientifique, comme dans le raisonnement du sens commun, très peu d'explications possèdent une telle « force ». L'incertitude peut porter sur la plausibilité de l'*explanans*. Le fait que notre jardin est mouillé peut raisonnablement être expliqué par l'hypothèse qu'il a été arrosé ; mais cette explication n'est pas définitive : le jardin se situe au-dessus d'une nappe phréatique, ou tout simplement il vient de pleuvoir. L'incertitude peut aussi concerner la validité de la connaissance permettant l'explication. Par exemple, la connaissance qu'un jardin arrosé est naturellement mouillé est sujette à de nombreuses exceptions : une bêche peut recouvrir l'herbe ou la pression d'eau vient de s'effondrer.

Pour capturer ces divers aspects de l'incertitude, certains auteurs ont formalisé l'abduction à partir de la théorie des probabilités. Par exemple, Gärdenfors (1988) insiste sur le fait qu'une explication doit avant tout rendre une observation plus probable qu'elle n'est *a priori*. De manière formelle, une hypothèse A constitue une abduction d'un fait B si la probabilité conditionnelle de B par rapport à A dépasse un certain seuil donné. Remarquons que d'un point de vue logique, l'abduction est un mécanisme non monotone dans le sens où A peut expliquer B, mais A et A' peut ne plus expliquer B. Par exemple, s'il est hautement probable que notre jardin soit mouillé quand nous l'arrosons, il est beaucoup moins probable qu'il le devienne lorsque l'eau vient d'être coupée !

Une caractéristique secondaire, mais importante, de l'abduction, est qu'elle n'est pas toujours prédictive. La déduction, au contraire, est parfaitement directe ou prédictive. Comme on l'observe souvent dans le diagnostic médical, l'explication d'un symptôme par une pathologie ne signifie pas forcément que la pathologie détermine le symptôme. Par exemple, l'exposition au virus de la grippe peut expliquer le fait que nous ayons froid sans pour autant avoir le pouvoir prédictif d'avoir froid. Ainsi, une abduction peut être non prédictive et expliquer une observation sans pour autant la déduire. Il n'existe donc pas une seule forme de raisonnement abductif, mais un large éventail qui s'étend depuis l'abduction faible, où l'*explanans* est simplement consistant avec la théorie de base et l'*explanandum*, jusqu'à l'abduction forte, où l'*explanans* infère avec la théorie de base l'*explanandum*. Selon ce point de vue, diverses approches en intelligence artificielle s'inspirent des logiques non monotones (probabilistes ou non) pour modéliser l'abduction. En logique des défauts, par exemple, l'abduction faible est construite comme une forme de raisonnement « crédule » alors que l'abduction forte utilise une forme de raisonnement « sceptique » (Poole, 1988).

Pour terminer, nous devons insister sur la nature para-consistante de l'abduction. Par sa définition même, la théorie déductive de l'abduction ne permet pas d'expliquer certains faits qui sont incohérents avec la théorie de base. De telles explications sont, en fait, parmi les plus importantes. C'est souvent pour les observations qui entrent en conflit avec nos prévisions que nous avons le plus besoin d'explications. C'est le cas dans les problèmes de diagnostic où certaines observations contredisent l'hypothèse qu'un système se comporte conformément aux spécifications. Pour prendre un autre exemple, si les prévisions météorologiques nous annoncent un beau temps aujourd'hui alors que nous observons des gens avec leur parapluie ouvert, nous sommes bien obligés de contredire notre croyance en ces prévisions pour trouver une explication raisonnable au phénomène observé. L'une des approches les plus appropriées pour capturer cette caractéristique de para-consistance est la théorie de la révision.

Dans cette perspective, Gärdenfors (1988) modélise

l'abduction comme une forme de révision, suivie d'une déduction. De manière un peu plus formelle, une hypothèse A constitue une explication du fait B relativement à une théorie de base T si la révision de T par A permet d'inférer déductivement le fait B. La notion de révision correspond ici à une modification minimale de l'information contenue dans la théorie T de manière à pouvoir accepter l'hypothèse A. La nouvelle théorie étant consistante, l'inférence déductive peut être appliquée. Cette approche de l'abduction constitue une vision radicalement différente de la théorie déductive de Hempel. Elle contient un composant dynamique et extra-logique, la révision, ainsi qu'un composant statique et logique, la déduction.

En conclusion, la notion d'abduction commence à être comprise dans le cadre philosophique de la construction de théorie, mais elle reste encore très controversée dans les domaines de la logique et de l'intelligence artificielle. Même si la théorie déductive nomologique de Hempel propose un point de départ à une définition formelle de l'abduction, elle ne parvient pas à capturer toute la richesse de ce mécanisme de raisonnement. Certains auteurs proposent d'étendre cette théorie dans un cadre probabiliste ou non monotone, alors que d'autres adoptent une stratégie radicalement différente, inspirée par exemple de la théorie de la révision. En conséquence, il n'existe pas aujourd'hui une définition unique et monolithique de l'abduction. Au contraire, nous sommes en présence d'une véritable mosaïque de concepts, modèles et formalismes, chacun essayant de capturer une partie de cette figure de raisonnement complexe.

▷ GÄRDENFORS P., *Knowledge in Flux : Modeling the Dynamics of Epistemic States*, Cambridge, MIT Press, 1988.
 — HEMPEL C.G., *Philosophy of Natural Science*, Englewood Cliff, Prentice-Hall, 1966. — PEIRCE C.S., « Abduction and Induction », *Philosophical Writings of Peirce*, New York, Dover, 1955. — POOLE D., « A logical framework for default reasoning », *Artificial Intelligence*, 1988, n° 36, 27-47.
 — QUINE W. & ULLIAN J., *The Web of Belief*, New York, Random House, 1970. — THAGARD P., *Computational Philosophy of Science*, Cambridge, MIT Press, 1988.

Frédéric KORICHE et Jean SALLANTIN

— A priori ; Axiomatisation et formalisation ; Découverte ;
 Déduction ; Induction ; Peirce ; Quine.

ABSTRACTION

L'abstraction est un concept qui concentre tout le fondement des questions portant sur la nature de la pensée. Il désigne aussi bien une base conceptuelle à l'aide de laquelle toute activité de pensée se déploie — tant sous la forme d'une connaissance scientifique que sous celles que prennent des pratiques de tout ordre, politique, morale, artistique — en même temps que le fait que la pensée est toujours à distance de ce sur quoi elle porte. Cette double nature de l'abstraction se manifeste

tant dans les clivages et les conflits qui traversent l'histoire de la philosophie et de la métaphysique que dans ceux qui engagent le travail scientifique. Mais ce concept, marque du travail de la pensée, du refus de l'immédiateté, désigne autant un concept thématique et travaillé comme tel que la recherche des bases sous-jacentes à tout travail de thématisation. Il est ce par quoi un seuil de formalisation d'une science constituée, autant qu'un seuil d'épistémologisation, de réflexion sur soi est franchi.

L'abstraction s'est trouvée être l'objet d'un travail scientifique comme tel avec la constitution de la logique mathématique comme discipline mathématique et sa compréhension s'est confondue avec la construction des bases de celle-ci. Elle correspond à l'apparition de modalités de réflexion internes aux mathématiques, qui auparavant relevaient de la philosophie : synthèses, normativité des modes de circulation intradisciplinaire, pédagogie interne, construction de ses modes d'extension au reste de la surface scientifique. Si bien que le travail sur l'abstraction est pris dans l'histoire de la constitution de la logique d'un côté et de l'autre dans celle de la structuration des mathématiques qui enregistrent donc un transfert de « réflexivité » de la philosophie à ces disciplines. L'abstraction consacre, en retour, un renforcement de la tendance — permanente — de la philosophie à se vouloir productrice de positivités scientifiques. Aristote a posé les bases de la logique dite classique : catalogue des formes de raisonnement avec leur mécanisation possible. À la fin du XIX^e s. la logique mathématique s'est constituée : l'abstraction comme objet réflexif de la logique se laisse appréhender dans son rapport à l'abstraction aristotélicienne.

L'abstraction d'Aristote

Le Philosophe pose la première grande théorie de l'abstraction comme fondement de toute forme de pensée et du langage. Il distingue quatre genres d'êtres. 1) les substances premières (ce cheval, cet homme) qui ne sont dites d'aucun sujet et ne sont dans aucun sujet ; 2) les substances secondes (l'homme) qui sont dites d'un sujet et ne sont dans aucun sujet ; 3) les propriétés individuelles (ce blanc) qui ne sont dites d'aucun sujet et sont dans un sujet ; 4) les propriétés générales (la science) qui sont dites d'un sujet et sont dans un sujet. Être dit d'un sujet concerne l'opposition du singulier et de l'universel ; seul l'universel peut être dit d'un sujet ; être dans un sujet concerne l'opposition de ce qui possède un attribut et de cet attribut. La première opposition peut être vue comme celle de ce qui ne peut être que sujet d'une assertion et de ce qui peut être soit sujet soit attribut, la seconde comme celle de ce qui est autonome et pour ainsi dire concret et de ce qui est hétéronome et pour ainsi dire abstrait. Nous disposons de la sorte des généralités abstraites (correspondant à l'universel abstrait) et des particularités abstraites (correspondant au singulier abstrait) d'une part, et des espèces, des genres, différences (correspondant à l'universel

concret), et des individus (correspondant au singulier concret) d'autre part. Les individus sont les éléments du monde ; les espèces n'existent que dites des individus ; l'abstrait ou conceptuel ou individuel est lié à une opération de la pensée.

Cette théorie de l'abstraction se pose contre celle de Platon en considérant que les abstraits sont hétéronomes donc doivent être dans autre chose, Platon affirmant, quant à lui, par la théorie des Idées séparées l'autonomie des abstraits.

L'abstraction des substances secondes est différente de celle des attributs. « Socrate est un homme », Socrate est un individu substance première, homme est une espèce. « ce corps est blanc », ce corps est une substance première, et blanc est une généralité abstraite. Je puis dire qu'un homme est dans Socrate et blanc est dans ce corps. La première affirmation est un non-sens, la seconde est vraie. Dans le second cas la définition du prédicat est attribuable synonymement au sujet c'est-à-dire qu'il y a entre eux communauté de nom et de notion. On définira un véritable concret par opposition à une singularité matérielle abstraite comme un véritable individu, ou substance première, par l'impossibilité d'être dans un sujet et d'être dit d'un sujet à la fois.

La prédication selon le Stagirite ne correspond ni à la relation d'appartenance, ni à celle d'inclusion de la logique moderne. Essentiellement parce que toute relation pour Aristote repose sur un précécoupage de l'univers, généralisation et abstraction reposent sur un ordre naturel préexistant. La distinction principale a lieu entre deux sortes de prédications : la prédication essentielle et la prédication accidentelle. La première est caractéristique du *dicitur* ; la seconde de l'*inesse*. Mais il faut que la relation de prédication essentielle puisse avoir lieu entre abstraits pour en rendre une science possible. Aristote distingue une prédication essentielle primordiale, qui a lieu entre substances, et une prédication essentielle dérivée qui a lieu entre abstraits. Quant à la prédication accidentelle primordiale elle a lieu entre substances (premières ou secondes) et abstraits, tandis que la prédication accidentelle dérivée a lieu entre abstraits. Les substances sont réelles et même, en un certain sens, l'universel est premier par rapport à l'individuel, d'où le réalisme des universaux (*universalia in re et ante rem*). L'Espèce homme, bien qu'inséparable des individus qui l'incarnent, se reproduit indépendamment de leur variation individuelle. La substance première est un composé de forme et de matière, elle est radicalement obscure. La prédication accidentelle porte principalement sur les abstraits. Les accidents ne sont pas séparables en tant qu'ils sont réels ; ils dépendent pour leur existence de la chose dans laquelle ils sont. D'où le conceptualisme des universaux (*universalia post rem*). L'abstrait est appréhendé immédiatement — en tant qu'il est particulier — dans les sensations ou dans l'imagination. Pour Aristote l'attribution de l'existence (ce que l'on appellera engagement ontologique) est liée non pas à la syntaxe mais à la sémantique. Je puis définir un cercle et utiliser

la prédication essentielle sans reconnaître qu'il existe. Parce qu'elles portent sur des substances, la physique et la théologie sont ontologiques ; parce qu'elle porte sur des abstraits, la mathématique ne l'est pas. Il ne peut donc y avoir de physique mathématique. L'attribut caractéristique des substances sensibles, le mouvement, reste en dehors des prises de la méthode mathématique. Car — acte conjoint d'un moteur et d'un mobile — il est rapporté à une substance.

Thèse classique — Koyré, Gueroult —, c'est en brisant l'opposition radicale entre substance et abstrait que la science moderne a pu se constituer. Descartes identifie substance et attribut principal, et Galilée conçoit abstraitement l'objet de la physique en affirmant que tous les corps sont pesants et que le mouvement est possible dans le vide. La théorie contemporaine de l'abstraction s'est organisée contre l'abstraction aristotélicienne et elle s'est trouvée dans des impasses. Les philosophies dites de la constitution, qui sont issues de l'empirisme et se sont reconnues comme empirisme logique, ont proposé une élaboration de l'abstraction naturelle. Celle-ci s'est constamment référée à l'abstraction mathématique.

On désigne traditionnellement par abstraction naturelle l'abstraction qui est censée s'appliquer aux phénomènes de la nature, l'abstraction en tant qu'elle se rapporte à la représentation du monde sensible. Dès lors que la question de l'abstraction naturelle est posée on convient de distinguer deux sortes d'abstraction : l'abstraction extensionnelle et l'abstraction intensionnelle. Cette dernière concerne les propriétés, la question qu'elle pose est celle de la répartition des attributs caractérisant une classe. La première concerne l'extension d'une propriété, les objets qu'elle caractérise. Les théories de l'abstraction issues de l'empirisme logique sont des langages extensionnels. Mais le problème de l'abstraction naturelle s'est présenté alors comme un problème relativement cerné : comment l'abstraction naturelle se constitue-t-elle alors qu'elle s'applique à des concepts inexactes, qualitatifs ? D'où le fait que la question soit formulée en termes de catégories. Ni pour Aristote ni pour Kant la logique et les mathématiques ne constituent de catégories véritables. À l'inverse, les modernes positivistes ont pu montrer que les catégories philosophiques pouvaient presque toujours s'analyser en une combinaison de concepts empruntés aux mathématiques et aux données de ladite perception pure. Exemple, la catégorie de quantité et celle de relation chez Kant et chez Aristote.

La théorie moderne de l'abstraction peut être considérée comme une puissante tentative pour pousser à l'extrême l'analyse des apparentes catégories naturelles au moyen des catégories mathématiques à dominante logique. Russell a posé le problème de la nature de l'abstraction mathématique en un sens particulier qui l'a conduit à élaborer un formalisme et à expliciter cette formalisation comme un élément de la logique mathématique. Il construit ce qu'il appelle la définition par abstraction. Le mathématicien adoptant une conception ensembliste de la définition mathématique

n'établit aucune différence entre classer et abstraire, entre l'acte de considérer un élément de E , ensemble donné, comme appartenant à un sous-ensemble exclusif des autres, sa classe d'équivalence, dont il est un représentant et qui en est une généralisation, et l'acte de considérer la propriété abstraite commune à tous les éléments de E qui appartiennent à la même classe d'équivalence et dont chacun de ces éléments est le porteur concret. Chacun des éléments appartenant au même sous-ensemble est lié à un autre de cette même classe par une relation dite d'équivalence qui possède les propriétés formelles de réflexivité, symétrie, transitivité : xRx , si xRy alors yRx , si xRy et yRz alors xRz . C'est une manière de regrouper des objets : on les met ensemble grâce à une liaison qui autorise de les parcourir tous dans n'importe quel ordre. Tous les éléments de E appartenant à la même classe d'équivalence possèdent une propriété caractéristique ou abstrait.

Il faut bien comprendre qu'une telle propriété assure de façon élémentaire de l'univocité d'une définition pour ce qui concerne les objets qu'elle permet de classer. Ainsi en est-il des structures plus complexes de l'algèbre et de la géométrie qui établissent d'abord la possibilité d'une relation d'équivalence entre les objets pourvus de cette structure, ainsi un sous-groupe peut avoir des classes d'équivalence pour un groupe modulo (on identifie les éléments qui relèvent de la structure à partir de laquelle on pose l'équivalence), ou pour des algèbres et même dans des théories plus élaborées modulo des sous-espaces avec des propriétés données.

Peano semble avoir été le premier à introduire en logique et en mathématiques les « définitions par abstraction ». « Soit u un objet ; par abstraction on déduit un nouvel objet fu : on ne peut pas former une égalité : $fu =$ expression connue, car fu est un objet de nature différente de tous ceux que l'on a jusqu'à présent considérés. Alors on définit l'égalité en posant une hypothèse sur les objets considérés. Celle-ci implique l'égalité définie et celle-ci signifie la même chose qu'une condition ou une relation entre ces objets ayant une signification bien connue, $h_{u,v} \rightarrow \phi u = \phi v$. Par exemple si u et v sont les droites d'un plan, la direction de u est identique à la direction de v si et seulement si u et v sont parallèles. Il faut pouvoir à partir d'une relation d'équivalence déterminer une propriété commune unique. D'où l'énoncé de ce que Russell a appelé le principe d'abstraction, différent de la définition par abstraction : "Ce principe revient, en langage commun, à affirmer que les relations symétriques transitives naissent d'une propriété commune, en ajoutant que cette propriété se trouve, eu égard aux termes qui la possèdent, dans une relation telle que rien d'autre n'a cette relation avec ces termes". »

C'est ainsi que Russell définit le nombre : « Le nombre est la classe de toutes les classes semblables à une classe donnée. Être élément de cette classe de classes (ce qu'on considère comme un prédicat) est la propriété commune de toutes les classes semblables et d'aucune autre ; de plus, chaque classe de l'ensemble des classes semblables a avec l'ensemble une relation

qu'elle n'a avec rien d'autre et que chaque classe a avec son propre ensemble. »

Les définitions mathématiques par abstraction résultent de la partition d'un ensemble E donné par une relation d'équivalence R en classes d'équivalence. Ces classes d'équivalence constituent des abstraits. L'abstrait n'est pas seulement une propriété commune à tous les éléments appartenant à une même classe d'équivalence, cette propriété constitue la classe des éléments, elle s'exprime dans le fait qu'il existe une telle classe d'équivalence. De ce point de vue elle ne suppose rien de pré-structuré, donné dans le monde. Russell, après avoir découvert ou systématisé des antinomies (reposant sur l'idée erronée qu'une propriété quelconque peut donner lieu à la production d'un ensemble d'éléments possédant cette propriété), a montré que le principe général d'abstraction doit, pour être valide, être limité par la reconnaissance préalable de la donnée de E . Jules Vuillemin explique la production des antinomies par l'usage sans restriction du principe d'abstraction de Russell. La difficulté d'une théorie des idées tient à ce que l'ensemble, ou universel partitionné par une fonction propositionnelle quelconque, est à la fois séparé de ses éléments ou particuliers et situé parmi eux comme un autre « objet ». On est tenté de mettre sur un même plan et de regarder comme des objets du même genre un ensemble d'ensembles considéré comme un universel et ses ensembles-éléments.

L'existence des abstraits

En insistant sur le caractère abstrait des classes d'équivalence, Russell pose le problème du réalisme : les abstraits mathématiques possèdent-ils une existence objective, indépendante de notre représentation ? Ou au contraire, comme le nominalisme l'indique, ne présentent-ils qu'une existence nominale et non réelle ?

On sait que pour Aristote les objets mathématiques sont des abstraits mais par opposition à des substances – le mathématicien peut faire comme si le cercle ou le carré étaient des universels existants, il ne peut en inférer que les cercles ou les sphères existent en dehors des roues ou des boules sensibles. La question se pose pour les ensembles par exemple.

Il y a deux solutions à ce problème dit de l'engagement ontologique. La première est celle de Quine : exister c'est être la valeur d'une variable. Selon la doctrine d'Aristote le jugement de prédication met en relation un particulier et un universel ou un universel et un universel. Dans le premier usage comme « Socrate est un homme », l'universel n'engage pas ontologiquement parce qu'il n'est pas la valeur d'une variable. Dans le second usage, « L'humanité est une espèce », l'universel sur lequel porte la prédication engage ontologiquement, puisqu'il résulte de l'assignation de la valeur d'une variable dont le domaine est constitué par des universels, bien que ces universels jouent le rôle de particuliers par rapport à l'universel qui les groupe. La seconde solution, celle de Russell, déclare qu'exister

abstraitement c'est imposer un ordre et un sens à des éléments qui ne le comprennent pas en eux-mêmes. Donc l'engagement ontologique des mathématiques entraîne une transformation de la conception aristotélicienne de l'abstraction : l'universel n'est pas conçu comme un abstrait aristotélicien qui serait dans le particulier, mais comme une substance seconde qui est dite d'une substance première. Ces deux solutions s'opposent. Russell attribue en effet à l'usage des relations l'engagement ontologique qui, selon Quine, est déterminé par la quantification. Russell montre que dans toute relation du type x est à gauche de y il y a quelque chose qui ne saurait être absorbé dans les termes, que ce quelque chose est un universel et l'on conclut de son irréductibilité à l'engagement ontologique.

Il semble que l'engagement ontologique oblige à concevoir l'universel comme une substance seconde dite d'une substance première. Il relève de la prédication essentielle et élimine du point de vue de Quine, comme de Russell, la prédication accidentelle.

Que veut dire « exister », « ontologique » dans l'expression « engagement ontologique » ? Russell ramène cette question à celle de la signification du mot être quand on dit que les universels ont de l'être. Dans la tradition philosophique il y a deux positions possibles – avec des raffinements – devant cette question. Ou bien l'être des universels consiste dans un ordre que le sujet connaissant produit. Cette première hypothèse, hypothèse conceptualiste, signifie que l'universel est seulement dans la chose en tant qu'il est saisi par la connaissance (*universalia in re*). Ou bien l'être de l'universel consiste dans une nature idéale qui existe indépendamment de la connaissance par laquelle nous l'appréhendons. La seconde hypothèse, hypothèse réaliste, pose que l'universel est dans la chose avant d'être saisi par la connaissance (*universalia ante rem*).

En nous restreignant à la position de Quine et Russell on peut essayer de donner une interprétation des théorèmes de logique de Church et de Gödel. Le premier dit que nous ne pouvons numéroter tous les ordinaux que l'on construit. L'univers des relations est complet, l'impossibilité de décider est algorithmique, « l'être qui [leur] correspond est celui des concepts... L'ontologie à laquelle les relations nous engagent n'est pas celle des choses dont l'en soi nous échappe mais celle des phénomènes que notre entendement ne saurait épuiser » (Vuillemin, 1971, p. 52). Au contraire l'univers des ensembles est incomplet, nous pouvons seulement l'admettre. Il correspond au point de vue de la chose.

L'abstraction naturelle

Les définitions par abstraction permettent de poser soit des extensions soit des intentions, soit des classes et des relations extensionnelles, soit des attributs ou propriétés et des relations en compréhension. Sont-elles utilisées de même façon pour l'abstraction naturelle ?

Nous pouvons maintenant envisager une doctrine de l'abstraction naturelle. Whitehead explique la formation des concepts physiques et de ceux d'espace et de temps. Il part du constat qu'il existe des données sensibles qui nous affectent et qui sont sans légitimité ontologique. Et que d'autre part les entités qui les causent, l'espace, le temps, le mouvement, les particules matérielles, ne sont pas données à la perception. Il faut donc partir de l'observation qui nous présente le passage de la nature dans son épaisseur de durée et montrer par quelle construction nous introduisons dans la science des entités telles que les points et les instants. Cette construction, topologique, s'appelle abstraction extensive. Le principe utilisé est la loi de convergence vers la simplicité par diminution de l'extension propre au phénomène considéré. Si A et B sont deux événements dont A' et B' sont respectivement des parties, les relations qui auront lieu entre A' et B' seront à beaucoup d'égards plus simples que celles qui ont lieu entre A et B (Vuillemin, *ibid.*, p. 65). Là est la façon dont la physique classique est parvenue aux équations différentielles. Mais celles-ci contiennent des entités comme l'instant t , le point x , y , z , la vitesse instantanée, le point matériel, l'accélération. Whitehead définit une relation d'extension avec des propriétés formalisées : la relation est irreflexive, asymétrique et transitive, il n'y a ni maximum ni minimum parmi les événements, la structure des événements n'est pas atomique.

Le modèle de l'abstraction extensive résulte de l'interprétation donnée par Russell des coupures de Dedekind appliquée à la physique. Considérons un l'ensemble des nombres rationnels Q . $\sqrt{2}$ divise Q en deux sous-ensembles dont le premier comprend tous les nombres rationnels dont le carré précède 2 et le second tous ceux dont le carré suit 2. Pour chaque nombre rationnel il y aura des éléments du segment fondamental (le premier sous-ensemble) approchant ce nombre comme une limite qui ne sont pas éléments de la série approchant $\sqrt{2}$ ou *vice versa*. Chaque coupure de ce genre est donc déterminée de façon unique par la série des nombres rationnels qui approchent la limite spécifiée par la coupure. Il devient alors possible de définir les nombres réels comme la série des coupures dans la série des nombres rationnels... (Lewis, *The Philosophy of A. N. Whitehead*, éd. Schlipp, New York, 1941, p. 740-741) « Si une série d'entités naturelles [...] approche de quelque entité extra naturelle et scientifique idéale comme une limite, alors on peut [...] regarder la série particulière qui approche ou converge vers lui à titre de limite comme étant en un certain sens logiquement équivalente à cette limite qui, ainsi, le définit au sens où elle le détermine univoquement. »

Sur le modèle de cette construction, Whitehead définit la classe des limites des éléments, expression quantitative liée aux événements. La théorie de l'abstraction extensive a pour objectif de développer une théorie de l'abstraction qui rétablisse la continuité entre l'expérience existentielle et la pensée mathématique. Whitehead définit l'espace et le temps à partir de deu

éléments, notre présent d'observation et notre « événement percevant ». Dans l'espace intemporel se révèlent deux données irréductibles : le maintenant et l'ici. Cet ici est l'événement percevant, « ceci dans la nature à partir de quoi l'esprit perçoit ». Cette feuille-là se réfère implicitement à notre ici. Cet ici possède une relation définie à la durée qui constitue la signification de cet ici. Grâce à la notion de cogrédience (un événement est cogrédient avec une durée quand il est une partie de cette durée, chaque partie de la durée a parmi ses propres parties une partie de l'événement) il peut définir le mouvement rectiligne uniforme dans des espaces temporels appartenant à des systèmes temporels différents.

Il faut distinguer la connaissance par adjectifs, contingente et externe, et la connaissance par relation. Celle-ci porte sur des événements qui sont uniques et figurent de véritables absolus. Trois sortes d'objectivité sont à distinguer. Les objets sensibles, les objets perceptifs, les objets scientifiques. Les objets scientifiques sont distincts des objets perceptifs, ils sont simples, uniformes et permanents, identifiables au moyen des relations entre les objets perceptifs. Ils sont produits au moyen de la méthode d'abstraction extensive. La limite de précision de nos mesures n'appartient plus aux phénomènes de la nature, ce sont des abstraits. Cependant le rétablissement de cette continuité semble impliquer dans cette théorie de l'abstraction un sacrifice de la science même. Et précisément toute la difficulté tourne autour de la situation des abstractions de la science (points, instants, etc.) — on ne peut préciser s'ils sont dans ou hors de la nature.

Des difficultés du même genre se présentent dans les travaux de Russell, la continuité entre la perception et les abstraits s'établissant cette fois du côté de la science. Dans *Signification et Vérité*, Russell s'efforce d'éliminer ces particuliers égocentriques et il approfondit le problème dans *Human Knowledge*. Donnons l'exemple de la façon dont le problème est techniquement posé. Le jugement de perception : « Ceci est rouge et brillant et entoure cette tache bleue et sombre » doit pouvoir se réduire à : « Rougeur et brillance sont superposées aux endroits q, f, h. Bleu et sombre sont superposés aux endroits q', f', h', ayant la relation R avec q, f, h. Il y a coprésence entre le faisceau Rougeur, brillance, q, f, h, et le faisceau Bleu, sombre, q', f', h' ». Le problème est compliqué par le fait qu'il faut mentionner que « ceci » n'est pas épuisé, et indiquer le temps. Il est remarquable que Russell ne soit pas parvenu à éliminer ces particuliers. La difficulté est liée à la contrainte, certes explicite, que s'impose Russell de sauver le principe des indiscernables en imposant aux relations de superposition et de coprésence des propriétés (telles qu'ayant lieu dans les phrases données ci-dessus). La question des particuliers devient insoluble, face à deux caractères contraires, être subjectif, être « répétable ». De même il est impossible d'épuiser la totalité du champ perceptif et, enfin, il faut tenir compte de la présence de souvenirs explicites.

Toute cette problématique, comme à des titres différents celle de Carnap, semble vouloir d'un côté ou d'un autre retrouver la naïveté originellement perçue. Il est paradoxal que l'empirisme logique se retrouve sur le terrain de ses adversaires. Russell semble dire que, bien que par les excès dans l'usage du jugement de prédication, le langage ait perverti la perception, la science moderne permet d'en retrouver les leçons naïves.

Si l'objectif de cette théorie de l'abstraction permet de mettre en évidence certaines des formes de l'engagement scientifique, ce qui le caractérise est le refus de l'historicité de l'abstraction. Ce que Hegel (et peut-être Cavaillès) aurait appelé la nostalgie irréfragable de l'immédiat. « Nous pourrions reconstruire une chose perçue comme un ensemble de *sense data* obéissant à telles et telles conditions, comme en physique nous construisons un atome comme un ensemble de phénomènes soumis à telles ou telles lois. Mais cette continuité épistémologique est tout à fait douteuse... » (Vuillemin, *ibid.*, p. 224). La théorie moderne de l'abstraction exige d'affronter, de façon symétrique à ce que propose Russell, une destruction de la perception. Non pas une substitution à la perception dite élémentaire de données qui de fait la supposent (difficulté que présente la proposition russellienne d'un système de coordonnées euclidiennes), mais une recombinaison des données perceptives et même des formes conceptuelles que l'on peut y discerner.

Sur l'abstraction mathématique

Rien ne prouve la pertinence du montage : d'un côté les seules catégories véritables fournies par les mathématiques, elles-mêmes réduites à la logique, de l'autre toutes les notions particulières aussi bien aux sciences appliquées qu'à l'intuition naïve du monde pouvant être tirées d'un petit nombre de données d'expérience. Ce que les doctrines de l'abstraction d'inspiration positiviste ont manqué apparaître plus nettement si l'on considère quelques aspects de l'abstraction mathématique. Prenons deux exemples en géométrie algébrique et en physique mathématique.

Un des concepts les plus originaux de la géométrie algébrique a été celui de schéma. C'est d'abord une synthèse de structures mathématiques venues de branches différentes. On se donne un anneau qui est une structure algébrique : sur un ensemble d'éléments on a une loi interne (par exemple $+$, deux éléments qu'on additionne donnent un élément qui est encore dans l'ensemble) et ce qu'elle implique, puis une autre loi interne qui soit compatible avec la première. Cette structure s'étudie pour elle-même, et cette étude en soi suppose à son tour l'étude des effets de cette structure sur d'autres objets venus d'ailleurs : l'anneau des fonctions continues sur un espace donné, des polynômes, etc. On a une classification des objets qui tombent sous cette structure, on sait comment on peut opérer avec eux : les multiplier, les additionner, etc. Les opérations que l'on peut faire subir aux objets réalisent les abstractions sur des objets déjà abstraits ; elles donnent

une signification homogène à leur champ de travail et à l'acte de regrouper. Sous cette forme, normée par le domaine algébrique, l'élémentaire des actes ressurgit mais pas comme une perception originaire.

À la structure d'anneau on associe une sous-structure que l'on appelle idéal. C'est un sous-anneau, qui a une propriété absorbante : une multiplication d'un élément extérieur par un élément du sous-anneau donne un élément du sous-anneau. Elle représente une réflexion sur des formes de stabilité. Je regarde tous les idéaux d'un anneau donné. C'est une façon spécifique de décomposer. C'est encore un travail d'abstraction sur l'acte de décomposer, et l'effet produit sous la forme d'une structure par ce travail.

Un idéal peut être maximal : il n'est inclus dans aucun autre, on sait qu'il en existe nécessairement un de ce genre dans un anneau. Il peut aussi être premier : si le produit de deux éléments appartient à cet idéal c'est que l'un de ces éléments était déjà dedans. On considère alors tous les idéaux premiers d'un anneau. L'idée de base est d'utiliser Spec A (spectre de A), les idéaux premiers de A, pour associer à l'anneau A une topologie. La topologie est une façon de nous situer dans l'organisation spatiale des objets abstraits examinés en nous demandant comment l'on peut bouger dans l'espace de ces objets ou si un déplacement nous fait sortir de l'ensemble en question. On prend tous les idéaux premiers contenant un idéal donné, c'est un fermé de Spec A. On fait travailler sur l'abstraction algébrique, analyse des opérations effectuées sur des entités abstraites, l'abstraction topologique. Il s'agit d'envisager la possibilité de déplacements dans l'espace des opérations. Il y a bien un élément perceptif dans notre appréhension mais il est inséré dans la structure. Ce type d'abstraction témoigne du refus travaillé de faire de l'espace un élément pur à intégrer dans la construction d'une structure puisqu'il ressurgit comme une nouvelle composante de l'analyse elle-même. C'est ce double enveloppement que pratique la création mathématique d'abstractions.

Sur Spec A comme espace topologique nous définissons une structure de fonctions, elle-même nouvel assemblage de concepts topologique et algébrique. On considère, en effet, un faisceau d'anneaux \mathcal{O} sur Spec A. Un faisceau est un instrument permettant de passer d'une situation locale à une situation globale. Là encore on voit comment l'abstraction mathématique suppose une abstraction du concept de différenciabilité se présentant sous la forme d'une opération de « recollement ». Un tel concept est une synthèse d'opérations supposées par de nombreuses branches des mathématiques. L'abstraction est le plus souvent une réflexion synthétique sur la nature des objets de disciplines distinctes : il faut trouver le concept qui les unifie comme opération et ce concept repose souvent sur une nouvelle signification accordée à l'une des opérations initialement déterminées dans son lieu d'origine : différentielle par exemple, pour le recollement. On dispose de plus d'un observateur pour analyser une

situation locale. Le concept d'anneau local permet cette analyse.

On définit alors sur Spec A un faisceau d'anneaux de fonctions. Le *spectrum* de A est la paire composée d'un espace topologique Spec A et du faisceau d'anneaux de fonctions défini ci-dessus. On peut donc définir la paire d'un espace topologique X et d'un faisceau d'anneaux de fonctions définies ci-dessus. On appelle cette paire un espace annelé. On peut alors forger le concept de schéma (affine). C'est un espace localement annelé qui est isomorphe au spectre d'un certain anneau. Un tel concept ne fait pas de l'abstraction le résultat d'une dissociation en éléments irréductibles dont l'ultime serait le perceptif, elle est le résultat d'une construction qui fait agir et réagir des éléments qui la constituent, sur eux-mêmes. Tel est le cas des concepts de la physique. Il faut retenir qu'ils jouent sur la possibilité de remettre en cause les conditions même de la perception. Comme on le remarque à propos du cas du concept de position. L'état d'une particule peut être tel qu'elle comporte la superposition de plusieurs positions possibles. Nous avons alors affaire à une recombinaison des mêmes éléments perceptifs mais qui sont cette fois impossibles à tenir ensemble dans l'expérience d'un vécu élémentaire.

Considérons, pour finir, le critère d'abstraction que l'on peut tirer des difficultés des thèses frégeennes. On peut dire — après avoir développé l'idée qu'un objet abstrait est un objet que l'on ne peut pas montrer — qu'un objet est abstrait quand il existe une expression fonctionnelle telle qu'il est essentiel, pour comprendre un nom d'un objet de ce genre, que le référent du nom soit reconnu appartenir au domaine de cette expression fonctionnelle. Mais l'exemple que prend Frege du centre de masse du Système solaire ne respecte pas le critère précédent. Un centre de masse est un point, on ne peut pas trouver une expression fonctionnelle qui soit rapportée à un point. On sait que Frege hésite entre une conception réaliste et une conception contextuelle de la signification. Les purs objets abstraits ne sont que la réflexion de certaines expressions linguistiques qui se comportent selon Frege comme les noms propres des objets, mais dont le sens ne peut pas être représenté comme consistant dans notre capacité à identifier des objets comme leurs supports. Il est difficile de pratiquer l'analogie des termes abstraits avec la situation apparente de l'identification d'un objet externe à nous comme le référent d'un terme. Il n'en reste pas moins que si l'on veut prolonger les analyses de Frege il faut donner un sens à l'analogie entre le rôle joué par la perception pour les objets physiques et l'intuition pour les abstraits mathématiques. Les objets abstraits seraient alors observables et, selon l'expression consacrée, interactifs à travers l'appréhension que nous en avons. Cette analogie suppose que dans les mathématiques mêmes nous trouvons une abstraction physique à l'œuvre, ce qui est le cas des principales et dernières structures que l'on travaille : l'algèbre se physicalise comme la géométrie ou même l'analyse.

► ARISTOTE, *Catégories*, trad. J. Tricot, Paris, 1962.
 — BACHELARD G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF « Quadrige ». — CARNAP R., *Der logische Aufbau der Welt*, Berlin, 1923; *Logische Syntax der Sprache*, Vienne, 1934.
 — CAVAILLÉS J., *Philosophie mathématique*, Paris, 1961; *Sur la logique*, Paris, 1946, 2^e éd., 1950, 3^e éd., 1976. — DUMMETT M., *Frege, Philosophy of language*, Duckworth, 1973, 1981.
 — GROTHENDIECK A., *Éléments de Géométrie Algébrique*, Paris, IHES, 1960. — PEANO G., *Notations de logique mathématique*, Turin, 1894. — QUINE W. van O., *Word and Object*, Cambridge, MIT Press, 1950; *From a logical point of View*, Cambridge, 1961 (trad. fr. P. Gochet, *Le mot et la chose*, Paris, Flammarion, 1977). — RUSSELL B., *Human Knowledge*, Londres, 1948 (trad. fr. Ph. Devaux, *Signification et vérité*, Paris, Flammarion, 1990). — VUILLEMIN J., *Leçons sur la première philosophie de Russell*, Paris, 1968; *La logique et le monde sensible*, Paris, 1971. — WEYL H., *Philosophy of mathematics and Natural Science*, Princeton, 1949. — WHITEHAED A. N., *Organization of Thought*, 1917; *Process and Reality*, New York, 1929; *The Concept of Nature*, Cambridge, 1935. — WHITEHAED A. N. & RUSSELL B., *Principia Mathematica*, Cambridge, 3 vol., 1910, 1912, 1913, 2^e éd., 1925, 1927.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Axiomatisation et formalisation; Catégories et foncteurs; Frege; Quine; Russell.

ACADÉMIES

L'Académie des sciences donne son lieu à la science classique. Le nom d'Institut adopté en France par la Révolution en 1795 fait sens en indiquant son lieu de science instituée. Mais ce symbole n'est pas dépourvu d'ambiguïté sur le long terme : l'on risque en effet d'entendre le mot instituteur et de profiler alors le portrait d'une science militante, d'une science essentiellement enseignante.

Cette représentation est plus tardive que celle qui convient à la première période des Académies, et nous ferions un anachronisme en l'adoptant d'emblée. Nous oublierions surtout que l'Académie fut concurrente d'un autre système, beaucoup plus ancien, le système des Universités. Car l'un des faits collectifs les plus nets pour le XVIII^e s. scientifique français fut l'absence de liens universitaires pour la plupart des savants, mathématiciens ou physiciens qui non seulement firent la gloire de l'Académie de Paris, mais celle de la science de ce temps. Nous ne pouvons dire où enseignèrent d'Alembert, Lagrange et Laplace sous l'Ancien Régime, et ils ne tiennent pas à en parler, manifestant par là une prééminence de l'Académie.

Cette prééminence est aussi bien dite par l'historiographie des Académies qui est riche, et cette fois aussi bien chez les Anglo-Saxons que chez les Latins. Mais elle est rarement critiquée, la pertinence de l'objet historique ne se donnant à voir que par le nom perpétué. Les Académies ne sont pas encore entrées dans le giron de l'histoire des sciences, et dans un *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences* les propos est moins de faire cette histoire que de poser les questions en vue de cette histoire-là. Les anachronismes sont nombreux

en effet dès que l'on parle académie ; qu'on en juge par l'usage du substantif « académisme », devenu indéniablement péjoratif. Il reste à réaliser pour la société académique ce que Norbert Elias fit pour la Société de Cour, bousculant au passage les historiens dogmatiquement endormis. Il n'y a pas une société académique indépendante du temps, mais il y a bien un genre académique. Il a été voulu par la République des Lettres, et il fut si bien accueilli qu'il en vint à caractériser toute production de science, et en tout cas à la valider comme telle. Si Elias a réussi son projet explicatif, c'est qu'il a pris au sérieux la Société de Cour ; si l'on veut pouvoir en rendre compte, il faut de même prendre au sérieux la science académique, dans ses effets et dans ses constructions. Mais aussi dans ses changements. Manifester une évolution des Académies n'empêche pas de percevoir les connivences d'un même genre ; la permanence (qui n'est pas accidentelle) du mot donne son jeu à l'histoire des sciences, à condition de ne pas se laisser enfermer dans les institutions, les règlements et les rites académiques.

La première vie de l'Académie des sciences s'étend sans grand changement de son règlement depuis l'année 1666 jusqu'à l'an I de la République : voilà ce qui fournit une bonne localisation de la science classique. Inaugurée six années plus tôt, la rivale et britannique Royal Society ne porte pas dans sa titulature le nom d'académie, et surtout ne connaît aucune rupture ; elle nous entraîne jusqu'à la science contemporaine et mondialiste. C'est pourquoi elle ne peut pas fournir la représentation du régime de la science classique, qu'elle illustre pourtant aussi bien que l'Académie de Paris, si on borne son histoire.

Il n'y a certes pas de pays développé qui ne dispose aujourd'hui d'une Académie nationale, les autres ayant créé sous l'égide de l'UNESCO une Académie du Tiers-Monde. Façon de jouer l'histoire, on peut certes dénoncer un XIX^e s. qui aurait, sans vergogne et contrairement aux Lumières, de plus en plus vécu sous le régime des académies de science nationale, jusqu'à parvenir à la qualification paradoxale de « science allemande » ou de « science anglaise » proférée par certains pendant la Première Guerre mondiale. Pourquoi en effet les Académies et non une seule Académie des sciences ? Le pluriel étonne parce que les académies ont su donner une conception singulière de la science, c'est-à-dire une science unique. Aussi la prétention et même la vocation universaliste se retrouvent dans la conception d'un réseau organique des Académies, vouées à l'humanité tout entière. Le jeu des « associés étrangers » est la traduction institutionnelle de l'Europe académique d'abord, et bientôt du monde académique. C'est un tissu de liens qui va au-delà des conventions et des bonnes manières. Un « associé étranger » n'est pas un ambassadeur, il est un égal, il est membre d'une sorte d'académie universelle.

Cette vocation universelle et humaniste est représentée dans la symbolique commune par les figures de Pasteur, de Leibniz, de Newton, de Sakharov. Je n'ai cité que quelques noms pris en trois siècles différents.

Ces noms en appellent cependant au moins quatre autres, Descartes, Galois, Russell et Einstein ; car ces derniers portent le flambeau du génie solitaire, et pourquoi ne pas le dire de l'anti-académisme. La figure d'une telle indépendance a pris de l'ampleur, et elle a adopté la forme de nouveaux collectifs. N'a-t-on pas aujourd'hui, hors académie, une science de la NASA, une science du CERN, voire une science de Global Change ? Une science autre, cet autre entendu à la manière dont il y aurait eu un genre Einstein non académique parmi les savants. Si l'Académie des sciences n'est plus l'unique localisation de la science, pourquoi subsiste-t-elle ? Une façon bien plus historique de poser la même question est de se demander comment et pourquoi une collectivité restreinte de savants a pu représenter la science.

Ce que les Académies ont résolu

Collectivité et individualité : pour les sciences, la résolution particulière de cette opposition a fourni les conditions de la naissance du système académique, et tout autant les raisons de son maintien sous des formes assez différentes, au fur et à mesure que les rapports évoluaient entre le savant pris comme personnalité et telle ou telle collectivité de regroupement. Au début, car il faut évoquer un début à l'histoire de l'Académie, il y eut à Florence l'Accademia del Cimento : il avait été décidé que les publications scientifiques y seraient anonymes et l'ambition était — en niant la personne, le sujet — de mieux donner à voir la généralité de la science. Ce régime fut éphémère : les publications s'avèrent difficiles, le collectif beaucoup trop contraignant pour les habitudes du monde savant, et pour tout dire le scientisme avant la lettre impossible à vivre. À sa création en 1666, l'Académie des sciences de Paris se dota donc du nom de compagnie. C'était une façon d'individualiser collectivement ses membres : les textes produits portaient le nom d'un auteur, et l'estampille académique était le garant collectif de l'universalité, c'est-à-dire le signe de la généralité telle qu'à cette époque elle était conçue pour la science. La compagnie gérait le temps multiple de la science ; elle ne se chargeait pas de transformer le temps en une éternité de la vérité. Quelques articles du règlement de l'Académie royale exprimèrent d'autant mieux cet état qu'ils furent rédigés après plus de trente années de fonctionnement (promulgation le 26 janvier 1699). À l'Académie est associée une certaine lenteur qui n'est pas indolence.

L'expérience ayant fait connaître trop d'inconvénients dans les ouvrages auxquels toute l'Académie pourrait travailler en commun, chacun des académiciens choisira plutôt quelque objet particulier de ses études, et par le compte qu'il en rendra dans les assemblées, il tâchera d'enrichir de ses lumières tous ceux qui composent l'Académie (article 20).

Ce n'est pas l'Université, mais son opposé conceptuel, à savoir un enseignement mutuel. S'il y avait

obligation de déclarer la nature des recherches entreprises, on prenait la précaution de la fixer pour la durée d'une année seulement, selon la pratique reprise aujourd'hui par le CNRS que nous ne pouvons alors nous empêcher de classer dans le genre académique. Et l'absence de professorat au CNRS nous incite encore plus à aller en ce sens. L'ancienne Académie de Paris rassemblait dans l'unité d'une institution une diversité de disciplines aussi bien que de personnes. Ainsi, « dans les assemblées » il y avait vérification des expériences, et consignation de la conformité ou de la différence. Celles-ci s'entendaient par rapport aux expériences extérieures de l'Académie. Et tout autant, disait le règlement, il devait y avoir « commerce avec les divers savants, soit de Paris, et des provinces du royaume, soit même des pays étrangers ». C'est au nom de la compagnie qu'il y avait une sorte de lutte contre la spécialisation pourtant reconnue des uns et des autres, car tous s'enrichissaient de tous, et tous étaient « exhortés à étendre leurs recherches sur tout ce qui peut être d'utile ou de curieux dans les diverses parties des mathématiques, dans la différente conduite des arts... ». Dûment instituée, la « veille » scientifique devenue pratique moderne exigeait bien la spécialisation, mais elle était au profit de tous et il devient difficile de ne pas lire l'article suivant du règlement académique comme une critique directe des disputes du régime universitaire du XVII^e s., en tout cas comme l'imposition d'une façon autre que celui-ci : « L'Académie chargera quelqu'un des académiciens de lire les ouvrages importants de physique ou de mathématiques qui paraîtront, soit en France, soit ailleurs ; et celui qu'elle aura chargé de cette lecture en fera son rapport à la Compagnie, sans en faire la critique, en marquant seulement s'il y a des vues dont on puisse profiter. »

À qui veut bien lire et examiner la pratique académique, par cette injonction précise il y a bien plus qu'une règle de sociabilité.

Ainsi l'organisation de la science en compagnie indique que nous n'avons omis aucune présence académique plus ancienne. Même si le nom existe plus tôt, son sens est tout différent. En amont dans le temps, il y a difficulté à loger la science de l'âge baroque dans les Académies préclassiques ; l'Accademia dei Lincei possède un titre somptueux, mais il est représentatif d'un âge aussi dépassé que celui des blasons ; l'improbable Académie parisiens dont Marin Mersenne aurait été par ses correspondances infinies, le secrétaire perpétuel avant la lettre, ne peut annoncer le genre académique que parce que ce dernier s'est réalisé effectivement. Les tâches effectuées par Mersenne n'étaient pas les mêmes ; il informait et connectait, mais il n'offrait pas une objectivité de la trace écrite vérifiable qui devint essentielle à la vie académique. Des analectes, on passait aux annales de la science.

Toutes les observations que les académiciens apporteront aux assemblées seront par eux laissées le jour même par écrit entre les mains du secrétaire, pour

avoir recours dans l'occasion (article 24). Justement, la science baroque s'éprouva bien plus dans les collèges jésuites, c'est-à-dire dans l'éducation. Contrairement aux Jésuites généralement exclus de l'Université, les protestants choisirent pour leurs institutions le nom d'Académie, ainsi en 1575 Guillaume le Taciturne qui fit fonder l'université calviniste de Leyde : mais ces créations n'eurent alors de signification que comme lieu d'enseignement. L'Académie est un lieu autre ; elle n'a pas à maintenir une tradition, elle n'a à défendre ni une orthodoxie ni une foi.

N'omettons-nous rien non plus qui se trouverait à l'extérieur de la sphère européenne ? Parce que trop spécialisé, il ne conviendrait pas de baptiser Académie le tribunal du Ciel de Pékin que tant d'astronomes venus d'Occident occupèrent, à la fin du XVII^e s. et au début du siècle suivant. Si l'adjectif académique a souvent été donné à la Maison de la Sagesse de Bagdad fondée par le calife Al-Mamun, les historiens responsables de cette qualification ne la justifient guère par comparaison, soit qu'ils fassent allusion à un regroupement d'intellectuels par le fait du prince, soit qu'ils manifestent une autorité -- de toute façon sous la dépendance d'une religion. Que dire alors comme académie du Museum d'Alexandrie fondé par Ptolémée Sôter où se « réunirent » Euclide, Ératosthène, Apollonius, et, des siècles plus tard encore, Pappus, Théon, sinon qu'il n'y avait pas d'assemblée délibérante, et que la fonction était aussi celle d'un temple. Le terme d'École convient mieux, très certainement au sens où pour des peintres l'on parle de l'École de Venise.

Ce Museum accueillit une femme comme Hypathie, nouveauté qui attendra les temps post-modernes pour se reproduire ; vers les années 1820, la mathématicienne Sophie Germain ne devait-elle pas quémander un billet de Joseph Fourier pour trouver une place dans les tribunes et assister, silencieuse, à quelques séances quand bien même l'Institut avait reconnu ses mérites par un prix ? L'ancien moine, inventeur solitaire de la Théorie analytique de la chaleur, avait un sens plus universel de la science que ses confrères, révolutionnaires aussi bien qu'anciens habitués des salons intellectuels du XVIII^e s. pourtant régentés par des femmes.

Collectivités, individualités, pour un genre sans doute unique, le régime académique n'a pas pu ou voulu fixer une seule forme institutionnelle, et les Académies d'aujourd'hui admettent bien sûr des femmes auxquelles était refusée la maîtrise scientifique il y a moins de deux siècles. Comment l'historien parvient-il alors à diviser la temporalité académique en périodes sans tomber dans le piège institutionnel ? Ne se heurte-t-il pas toujours à la prétention universaliste, donc intemporelle de la science ? La périodisation ne peut être que celle des différents régimes de science que les académies suscitent ou répercutent. C'est alors que l'historien des sciences risque de ne plus être en phase avec l'histoire générale des académies, cette histoire à laquelle Daniel Roche pour le XVIII^e s. a donné ses caractéristiques.

Les difficultés d'une périodisation

Adopter une description anthropologique des académies est le plus souvent le biais de biographies « idéaltypiques » de savants, où se donne à voir, morale incluse, le travail scientifique. Mais on rencontre une gêne sérieuse à décrire sérieusement ce travail sur le seul mode académique. Car il y a absence de laboratoires dans la majorité des cas. Et la fréquence bien faible des réunions académiques -- quelques heures au plus chaque semaine -- permet difficilement de parler de professionnels. Si le mot « savant » convient bien pour désigner les membres de la compagnie au XVIII^e s., il n'en décrit pas suffisamment la fonction acquise au moins au siècle suivant.

Avec l'Académie de Paris et la Royal Society, la science a bien disposé d'un régime sur le long terme. Parce que ces Académies ont pris une fonction : celle de tribunal. Il n'y a aucun paradoxe historique à caractériser l'Académie classique par un manque, celui de tout lieu de fabrication de la science autre que par la discussion et la plaidoirie, l'expérience venant au besoin, mais pas nécessairement, s'insérer comme élément de la discussion, comme élément de la persuasion.

Fait contraste un autre régime, résumé par la situation de l'Académie soviétique à notre siècle. Dotée de laboratoires propres, elle constitua une véritable usine à produire dont les savants étaient les ouvriers choyés, des fonctionnaires dans la fonction de dire le vrai et surtout le possible. La chute de cette académie signale celle de tout un système politique, économique, et idéologique pour lequel la production constituait une finalité et sa programmation une idéologie. En tout cas, nous tenons certainement une périodisation des régimes académiques en au moins deux époques, celle du tribunal et donc du tribunal général de la science, et celle de la production en laboratoire, et donc une production particulière, à côté de productions d'autres agences de science, dans le cadre d'un régime qui l'on doit appeler concurrentiel. Deux périodes suffiront-elles donc ?

Le rôle des Académies est souvent associé au façonnement des postures ; l'Académie est quelquefois conçue comme une entreprise sociale destinée à dire, voire à créer les postérités et les gloires. À cet effet, apparaît caractéristique l'Académie de Stockholm ; elle décerne les Nobel chaque année depuis le commencement du XX^e s., et l'affaire a obtenu un retentissement mondial auquel sont paradoxalement associées bien peu de critiques. Le Nobel donne même à celui qui l'a obtenu une autorité qui dépasse largement l'aire scientifique d'obtention, et, en plus d'un cas, est quasiment de nature sociale, comme la consécration presbytérale. Ne serait-ce pas là le dernier triomphe du scientisme ? Les grands prix traditionnellement décernés par les Académies, sinon l'intitulé même d'académicien, rappellent l'ancienneté du genre de la récompense. Mais on ne peut que trouver une forte différence de structure entre un prix annoncé portant sur

un sujet scientifique ainsi mis en concurrence -- et d'une certaine façon jugé prioritaire par les académiciens comme ce fut jusqu'à la fin du XIX^e s. le cas dans la plupart des Académies des sciences -- et la récompense attribuée à une œuvre achevée qui caractérise le Nobel.

La description de l'Académie comme gérant l'économie de la gloire n'est donc pas fautive, mais elle risque de ne mener qu'à l'histoire d'une décadence, avec celle de l'académisme. Or, cette expression est née au milieu du XIX^e s. dans les milieux des Beaux-Arts, pour désigner la force du conservatisme dans un régime qui n'était justement pas concurrentiel. La concurrence, on le sait, était alors au Salon des Indépendants. L'avantage cependant de ces considérations de gloire, de gloire votée et formalisée par une décision académique, est sans doute de nous fournir la période intermédiaire que nous cherchions. C'est celle qui débute en 1795 avec la Première Classe de l'Institut de France.

On risque alors d'être d'autant plus tenté par un découpage en trois périodes qu'il correspondrait à trois régimes politiques ; le régime académique classique apparaissant comme celui du régime absolutiste royal, le contemporain celui du système étatique, et l'intermédiaire, au XIX^e s. et jusqu'au début du XX^e s., étant celui du régime libéral. Une telle correspondance avec l'organisation politique serait-elle fortuite ?

Aucune description des régimes académiques scientifiques ne peut se situer hors de l'histoire politique, ni hors du contexte national et du contexte idéologique. Mais parce que nous avons dit que les formes de l'académie organisent un régime de science, aucune description ne peut sans dommage oublier le façonnement des différents régimes académiques par les différents régimes de science. Dans la mesure même où nous avons adopté comme thème organisateur celui du rapport de l'individuel et du collectif dans l'œuvre de science, car c'est bien ce qui fait l'objet de toute académie, une question intéressante devient celle de la mise en adéquation d'un régime académique et d'un régime de science.

Il est donc gênant que la périodisation en trois temps que nous donnons puisse conduire à dire sans aucune analyse supplémentaire que la science classique fut royale, la science moderne libérale, et la science contemporaine démocratique, quand bien même l'on corrigerait en suivant selon les pays les différentes conceptions de la délégation du pouvoir par le peuple. Une telle scansion n'aurait rien de gênant pour la science, mais serait en effet gênante pour l'histoire des sciences, incapable au fond de faire valoir une périodisation propre. En bénéficiant certes de son rythme ternaire, il faut donc éviter le simplisme du modèle du développement académique que nous avons adopté.

Car ce n'est pas par le biais de la périodisation en trois temps que peut être justifié le parallélisme avec le politique. Si la science s'est si souvent trouvée si bien ajustée au système académique, c'est que l'académie façonne ce qui doit, un temps, être considéré

comme représentatif de la bonne science, et pour ce faire adopte des usages qui disent le « bon savant ». S'il y a là la « politique » de la science, alors nous tenons peut-être un meilleur découpage historique et scientifique du monde académique. La politique de la science varie avec la définition que l'on adopte de la « bonne science » ; celle-ci étant en partie l'expression des idéaux d'une société, en partie celle des conditions d'un consensus sur les contenus scientifiques, et en partie enfin, la rencontre avec cet extérieur toujours intériorisé de la science, le réel. L'Académie a été le lieu où s'effectua de façon différente cette pondération entre ces trois facteurs, pondération que l'on pourra décrire comme de nature politique, et où l'on ne peut que retrouver l'opposition entre l'individuel et le collectif dont nous sommes partis, c'est-à-dire le social.

Nous adoptons donc un autre découpage temporel, commençant certes par les Académies de la science classique, dont Paris et Londres sont les exemples majeurs, mais nous les ferons suivre par le thème de la science utile, avec l'Académie de Stockholm comme type. Viendront ensuite les académies du temps du scientisme. Nous n'évoquerons donc pas les académies actuelles, moins pour éviter les risques de l'histoire immédiate que, comme nous l'avons fait jusqu'à maintenant, donner à saisir les différences en les évoquant par contraste au fil de la description des trois types adoptés.

Le tribunal de la science : le régime académique classique

Défendant en juillet 1793 une Académie fortement malmenée par certains révolutionnaires, et sans doute partageant certaines des critiques puisqu'il s'était appliqué, quelque temps plus tôt mais sans y parvenir, à la réformer, Lavoisier fait d'abord valoir une masse de données : « Le recueil de l'Académie des sciences forme déjà une collection de 150 volumes in 4^e, sans compter les ouvrages que les académiciens ont publiés à part, sans compter la description des arts et métiers. » Il tient ensuite à souligner l'originalité nationale, et on pourrait entendre à la même époque à peu près la même rengaine de l'autre côté de la Manche : « C'est sur l'existence de l'Académie des sciences que la géométrie française est parvenue à devancer la géométrie anglaise, déjà portée par Leibniz et Newton à un si haut degré d'élévation ; que, dans ces derniers temps, la chimie française a donné ses lois à toutes les nations ; que tous les genres de connaissances ont été portés en France à un degré de perfection que toute l'Europe nous envie. » Après la fonction de production de mémoires savants, et la fonction de prestige, Lavoisier n'insiste pas sur la fonction de juger de l'Académie : quelle pourrait en effet être la justification de ce pouvoir de juger, quel contrat social déléguerait à une assemblée restreinte le droit de dire ce qui est science et ce qui ne l'est pas ?

Or cette judicature, l'Académie l'exerce pleinement. Geste typique quoique fort, c'est en 1775 qu'elle prend

la décision de ne plus examiner les mémoires qui lui seront présentés et prétendront démontrer la quadrature du cercle ou le mouvement perpétuel. Or, à cette époque, la preuve de l'impossibilité de la quadrature n'a pas encore été apportée, et elle ne le sera d'ailleurs qu'un siècle plus tard. Mais, décide consensuellement l'Académie, si la preuve éventuelle de la quadrature peut survenir, celle-ci ne saurait être simple, ne saurait provenir d'une astuce, ne pourrait en aucun cas faire feu de méthodes élémentaires. L'Académie définit ainsi une règle de scientificité à propos de mathématique : elle ne décrète pas le vrai, mais édicte les conditions de son obtention.

Si le consensus à propos des jugements de l'Académie fait histoire, c'est qu'il ne s'agit pas d'approuver une théorie et d'en interdire une autre, mais bien de dire qu'une théorie possède les spécificités qui la rendent scientifique. Un anthropologue dirait qu'il n'y a pas de dogme (le vrai), mais des rites (ce qui fait science). Pas plus que la Royal Society au début du XX^e s. ne décide sur la relativité d'Einstein, l'Académie de Paris ne tranche, au début du XVIII^e s., dans la querelle concernant les infiniment petits de Leibniz et l'héritage cartésien algébrique : l'Académie enjoint les protagonistes de clarifier leurs prétentions, c'est-à-dire d'expliquer ce qu'ils peuvent démontrer et ce qu'ils ne peuvent pas prouver. La Royal Society ne tranche pas, à cette même époque, entre Leibniz et Newton : plus même, elle conçoit leurs deux apports comme étant mathématiquement équivalents pour l'établissement du calcul différentiel et intégral, cette invention qui définit la modernité en jouant de l'ignorance des Anciens. Certes, l'institution est lourdement partisane en faveur du héros anglais, mais sur la seule question de priorité. La querelle est organisée selon les procédures d'un procès, affaire Newton contre Leibniz : parce qu'il y a gêne du côté Newton puisqu'il n'a pas publié ses découvertes, on organisera un recueil de lettres permettant de faire croire à un plagiat de Leibniz. On a tout simplement tenté de mettre en règle académique la situation du Calcul : l'écrit, reçu et daté par l'Académie, est désormais un élément de la scientificité.

Les académies des sciences sont ainsi très largement responsables de la forme de présentation des mémoires scientifiques des Lumières, dont sans doute le texte commun de Lavoisier et Laplace en 1783 sur la calorimétrie est l'exemple le plus caractéristique. C'est l'organisation de la preuve. Les deux auteurs parviennent en effet à fonder une nouvelle science à partir d'un seul concept, celui de quantité de chaleur, et d'un seul appareil, le calorimètre à glace. Ils n'ont pas besoin d'être d'accord sur ce qui pourrait paraître comme primordial, la nature de la chaleur (fluide ou mouvement). Cette inutilité de l'accord de fond, qui engage une épistémologie, est une caractéristique académique. L'Académie entend régler la collaboration entre savants, qu'elle soit directe comme dans le cas évoqué, ou indirecte et plus commune comme dans les cas de réaction à un texte publié, et de contestation. Devant l'Académie de Berlin, un peu avant 1750,

d'Alembert et Euler présentent deux démonstrations du théorème fondamental de l'algèbre ; elles sont matériellement et conceptuellement très différentes, l'une de quelques pages seulement et d'analyse, l'autre de plusieurs dizaines de pages et d'algèbre. L'Académie ne tranche pas mais si elle a accepté de publier les deux textes c'est que tous les deux respectent la règle alors consensuelle : le théorème en cause est une réduction, la réduction des nombres imaginaires (l'expression remonte à Descartes pour désigner les racines de polynômes de tous les degrés) aux nombres complexes (c'est-à-dire ceux qui résolvent les équations du second degré). De ce rôle de formatage, pourrait-on dire, de la science, qui est un pouvoir de nature juridique, l'Académie est tellement consciente qu'elle organise sa propre histoire, et la fonction de la dire est alors réservée au secrétaire perpétuel : les Mémoires tout au long du XVIII^e s. sont précédés par l'histoire de l'Académie, qui est en fait une histoire de la science, un mixte de présentations factuelles, de revendications de priorité, d'hypothèses, et de jugements. À n'en pas douter, l'histoire des sciences comme discipline a trouvé là son origine, son inspiration, et son modèle.

La tentation est alors forte chez des historiens portés sur la théorie de trouver à leur tour des modèles du comportement académique, justement qualifié de social puisqu'il touche au protocole des relations entre savants. On aura alors le modèle de la discussion protestante en assemblée (le synode), celui de la monarchie, absolue ou éclairée (conjugaison de l'*auctoritas*), récemment encore celui de la sociabilité de cour (le dire vrai du gentilhomme anglais !). Ces conjectures ne sont intéressantes que dans la mesure où elles contraignent à penser l'académie comme un genre créateur de science ; elles risquent la vanité de l'analyse dès lors que le produit de l'Académie est passé sous silence, ou jugé mineur, dès lors que n'est pas expliqué le progrès scientifique dont l'Académie est porteuse. Me paraît plus utile de songer à ce que l'Académie a exclu à son origine, mais qui lui reste le plus proche, à savoir le système universitaire qui était transmission d'un savoir considéré comme sûr, validé, acquis, dogmatisé. En mettant toujours en procès la scientificité, l'Académie se donnait les moyens du progrès. Nous allons bien retrouver cette exclusion de l'Université avec le deuxième régime académique envisagé.

La science utile : le régime suédois

Lorsqu'à la Maison de la Noblesse de Stockholm se réunirent pour fonder une Académie le 2 juin 1739 des savants comme Linné et des politiciens comme von Höpken (du parti des « chapeaux »), l'esprit utilitariste était prédominant, au point que le nom envisagé pour l'institution fut d'abord « académie pour l'économie ». Était retenue de la relative tradition académique manifestée par Londres la nécessité d'une publication régulière, *Vetenskademiens Handlingar*, mais à lui seul l'intitulé, en choisissant la langue

suédoise, dit et l'éloignement du modèle universitaire et la volonté de servir nationalement.

Des comptes rendus sont aussitôt prévus et doivent avant tout recueillir des observations pratiques ; d'ailleurs la classification des membres retient cinq sections seulement, l'astronomie et la langue suédoise étant les seules bien individualisées, les trois autres relevant de ce qui fait le savoir construit (*Elementa* : physique expérimentale, mathématiques, mécanique et architecture), le savoir observé (histoire naturelle, dont la pêche, la chasse et la culture des vers à soie), et le savoir des arts (*Artificialia* : soit l'économie, l'industrie, le commerce et la médecine). On hésite devant cette classification à la qualifier tant elle retient un ordre qui évoque celui du savoir au Moyen Âge (à l'exception notable de la théologie) où compte surtout le degré d'intervention de l'homme dans ce savoir, et en même temps convoque la modernité que représentera l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert, avec la forte liaison entre le théorique et la pratique des métiers et des fonctions.

Dans la première période, qui est aussi la fin de celle que les historiens politiques appellent « l'ère de la liberté », et qui est période d'une science prestigieuse pour la Suède avec – pour ne citer en chimie que les noms de Scheele et de Bergman –, il faudrait surtout décrire un climat intellectuel, fait d'austérité protestante, de minutie, de la rentabilité des œuvres humaines, et d'enthousiasme sur les possibilités du génie inventeur et rationnel ; on trouve peut-être ainsi la meilleure illustration de la description d'un ethos dont parle Max Weber par lequel il conjoint le développement du capitalisme et le monde luthérien.

Si l'Académie des sciences de Stockholm a ainsi lié durablement son développement, et sa réussite, à une pensée de la classification des savoirs, donc à celle de la répartition des compétences de ses membres en fonction d'activités économiques, agricoles ou industrielles, ce que l'on peut appeler l'anomalie suédoise n'en pose pas moins problème à ses membres. Car n'est pas représentée la plus traditionnelle division scientifique, en gros celle dont Auguste Comte fera une hiérarchie de compétences, et qui commence par les mathématiques, passe à la physique et à la chimie, à la zoologie et la botanique, puis à la médecine. En 1820, un autre chimiste, Berzelius, impose une réforme en ce sens à l'Académie, une sorte de rentrée dans le rang au nom de la science universelle ; mais il n'en maintient pas moins une section de sciences économiques, et une autre d'érudition. Il est notable qu'au nom de l'utilité la Suède n'ait pas, à cette époque positiviste, plus séparé le monde littéraire du monde scientifique.

On doit y voir surtout la résolution d'un problème national : ce pays du Nord, s'il mise sur la science et la technique comme facteur majeur de prospérité maintenue, a aussi pris conscience de l'impossibilité de maintenir une inventivité sur tous les fronts scientifiques, selon la prétention commune à Paris et à Londres dans les premières décennies du XIX^e s. L'Académie est certes reliée par des correspondants étrangers

à la science générale, mais il ne s'agit pas de faire publier tous azimuts ; la fonction est d'assurer l'actualité de la connaissance pour les membres mêmes de l'Académie nationale. Ceux-ci sont en quelque sorte chargés de tamiser les connaissances recueillies en fonction des besoins nationaux et en ce sens ils ont une mission éducative orientée de la nouveauté. Dès lors, il serait peu utile pour l'Académie de se débarrasser de ses membres directement tournés vers l'économie locale et ses problèmes ; certaines questions scientifiques purement même devenir des sortes de terrains suédois privilégiés, comme la géologie, les expéditions polaires, la météorologie.

De sorte qu'au nom même de l'utilité, dont on voit qu'il faut l'entendre d'une manière politique plus que générale, l'Académie se rapprochait fortement du monde universitaire qu'elle excluait pourtant au départ. Cette évolution fut aussi bien celle des autres Académies, ce qui nous conduit à un troisième temps académique.

La science académique comme aventure de progrès : le scientisme

Agissant comme secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences de Paris chargé de prononcer des éloges et de manifester le « bon savant », François Arago explique dans le premier tiers du XIX^e s. le sens que prenait la nouvelle aventure scientifique : les savants les plus prestigieux, entendez ceux de l'Académie puisque tel avait été le nom rétabli lors de la Restauration des Bourbons, en ne dédaignant pas de prendre le rôle d'enseignants à l'École normale en l'an III, devinrent véritablement des « instituteurs ». L'Institut fondé en 1795 les rassemble donc, mais le mot ne dit pas assez que la science enseignée est alors la science en train de se faire. Voilà le nouveau principe. Maurice Crosland, en argumentant de même sur la nouveauté de l'Institut, système qu'il reconnaît néanmoins comme académique, sélectionne un peu sarcastiquement d'autres critères du long terme, l'abandon du beau langage, la publication nerveuse et rapide en place des mémoires longs et longuement médités, une organisation féroce et donc essentielle des élections, et au fond – plus qu'une méritocratie – la tutelle d'une gérontocratie. Pourtant, et s'accordant alors avec la plupart des sociologues, il reconnaît à l'Académie des sciences la spécificité d'avoir mis en place la notion de travail scientifique et, on peut alors ajouter, son éthique. Sous le nom de progrès, l'actualité, la contrainte d'actualité, n'en est-elle pas une des composantes majeures ?

Un exemple récemment argumenté par Hugues Chabot suffira à faire comprendre combien ce travail, qui justifie encore l'expression préférée il y a une vingtaine d'années de professionnalisation, implique tout à la fois une pédagogie, une délimitation de ce qu'est la science par la description de ce qu'elle ne saurait être, donc une épistémologie, mais aussi une standardisation et ainsi un centralisme, ou encore un contrôle. Pourquoi ne pas tout simplement parler de scientisme ?

L'exemple concerne un pharmacien, Curaudau, né en 1765 et qui vers 1800 se lance comme tant d'autres dans la course à l'identification de nouveaux éléments chimiques, l'identification par Davy du chlore comme élément simple en lieu et place de l'acide marin déphlogistiqué étant certainement la réussite la plus marquante. C'est l'actualité. Quoique professionnel, c'est à l'Académie et non à ses collègues pharmaciens que Curaudau pense naturellement devoir présenter toutes ses nouvelles idées : il attend validation scientifique dans l'ordre du vrai, non dans l'ordre de l'efficacité. Les sujets étant du goût du jour, l'Académie, à chaque fois, nomme une commission pour les juger, refait même certaines des expériences que Curaudau dit avoir faites, ou mieux encore lui laisse la liberté de les refaire devant certains de ses membres. « On prit le parti de l'inviter à se transporter dans le laboratoire de l'École de médecine, afin qu'en sa présence on pût opérer et savoir si les procédés qu'on se proposait d'employer étaient bien ceux qu'il fallait suivre. » L'artefact est à chaque fois trouvé : « Une différence aussi marquée entre ces produits et ceux obtenus avec les matières que nous avions préparées en suivant les précautions indiquées par M. Curaudau, commencèrent à nous faire soupçonner que le charbon animal dont M. Curaudau venait de se servir n'était pas semblable au nôtre. Pour nous en assurer, nous procédâmes à l'analyse de ce charbon... ». Il y a leçon de chimie, donnée à Curaudau, mais aussi à tous les chimistes possibles. Et la morale est tirée publiquement dans les *Procès-verbaux* de l'Académie, trace écrite du jugement : la chimie a changé de régime de rigueur, en particulier en définissant autrement la pureté des produits utilisés, mais aussi en distinguant les questions techniques et de routine en quelque sorte, et les questions « difficiles » de doctrine : « Nous l'invitons à mettre plus de sévérité dans les recherches qu'il voudra soumettre au jugement de la classe. » C'est le langage des instituteurs de la science : si tout le monde ne peut être académicien, la majorité de ceux-ci relève désormais de l'enseignement.

Du fait d'un poids universitaire majoritaire, et quoique toujours entendue au sens de contrôle de la scientificité, la tutelle devenue traditionnelle de la science par l'Académie se transforme lentement en une fonction de prestige. Au début du *xx^e s.*, l'Académie fournit le plus haut rang professoral. Mais l'Université elle-même change son profil : dans tous les pays ayant réussi la deuxième révolution industrielle, et matérialisée par le laboratoire la recherche devient une des fonctions du professeur de sciences. Le changement est particulièrement net en France, avec le développement des universités de province. Pourtant même dans les grandes Écoles – cette exception universitaire française – la recherche a du mal à être pensée autrement que comme une poursuite individuelle, à l'image de l'enseignement dont un seul est responsable : font symbole les démêlés de Pierre Curie ne trouvant pas de laboratoire. Or nous l'avons dit, l'une des responsabilités historiques des académies des sciences avait été de

régler le collectif en science ! Fait alors mieux symbole d'une décadence le fait que Curie ne devienne académicien que lorsque le Nobel reçu (en égalité avec Marie) contraint l'institution, qui tardait dans sa fonction de délivrer la gloire et ne trouva pas la force d'élire Marie, d'ailleurs non professeur d'Université.

Aujourd'hui, la recherche est devenue une profession, comme l'a toujours été celle de professeur d'université. Avec cette nouveauté que la recherche peut être localisée en d'autres institutions que l'Université. En plus d'un sens, on pourrait considérer que ces agences de recherche jouent par rapport à l'Université le rôle que les académies des sciences jouèrent par rapport aux universités, à la fois fonction de prestige et expression de la scientificité. Mais l'analyse est trop courte, car il y a bien plus avec la fabrication de science, devenue indissociable de la technique. Le meilleur parallèle historique est plutôt avec les journaux scientifiques spécialisés ; ils ne se développèrent qu'à partir de l'époque romantique. Lieux d'explication de science, placés le plus souvent sous la tutelle d'un seul homme (il suffit de penser à Crellé ou Liebig en Allemagne, à Liouville en France), ces journaux n'engagèrent que progressivement un analogue du système académique, autrement dit se dégagèrent de la subordination à l'Académie. Est justement académique le jeu des *referees* : il correspond exactement aux rapports obligatoires de trois membres sur tout document de l'Académie des sciences, rapports qui nourrissaient les procès-verbaux à Londres, Paris, Berlin, Stockholm, etc. Ce jeu d'une référence, qui crée une académie non réunie et en quelque sorte virtuelle, n'est institutionnel qu'au *xx^e s.* ; il l'est cependant au point qu'une publication dans un journal sans *referee* est aujourd'hui nulle et non avenue dans le système de reconnaissance scientifique, bref dans ce qui exhibe la scientificité. Ce sont ces journaux qui firent véritable concurrence à l'Académie, qui de référence devint révérence : on le constate dès 1832 lorsque l'Académie des sciences de Paris mit en place la forme des comptes rendus : une publication possible en moins d'une semaine, dont l'explication devait être donnée, ultérieurement, dans un journal. Il vaudrait mieux dire, dans le journal faisant office d'académie pour le domaine spécialisé correspondant.

Si les académies traditionnelles tentent aujourd'hui de maintenir leur fonction de contrôle, la logique institutionnelle d'autonomie des agences de recherche, souvent spécialisées, les en empêche. Ce n'est pas auprès de l'Académie que l'INSERM se tourna d'abord pour juger l'affaire de la mémoire de l'eau, et les articles dans *Nature* eurent autrement de portée. Mais il faut comprendre autrement : les agences de recherche ne fonctionnent guère sous le régime de la publication dans la mesure où l'on n'entend plus le mot « public ».

Est en crise la publication scientifique, dont on a vu que la fixation de son régime avait été à l'origine même des Académies classiques qui gèrent ainsi le rapport de l'individuel et du collectif en science ; l'académie est donc en crise d'objectif. Les utopistes peuvent

penser que l'académie sera enfin ce qu'elle doit être, c'est-à-dire universelle, par la grâce d'une promesse technique comme Internet. Si l'on entend reprendre l'influence protestante pour expliquer la formation des académies, et si l'on évoque l'accès à Dieu permis par la lecture individuelle de la Bible, il convient de rappeler que Luther pas plus que Calvin ne confondaient cette relation de l'individu avec l'exercice nécessairement collectif de la théologie, ce qui s'appelle la direction intellectuelle de l'Église. La culture scientifique n'est pas et n'a jamais été la science : les académies ont aussi été là pour le dire.

► AMBURGER E., *Die Mitglieder der deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1700-1950*, Berlin, Akademie-Verlag, 1950. – AUSEJO E. & HORMIGÓN M., éd., *Messengers of mathematics*, Madrid, Siglo XX, 1993. – BRIAN E. & DEMEULANAERE-DOUYÈRE C. dir., *Histoire et mémoire de l'Académie des sciences, Paris/Londres/New York*, Éd. Lavoisier Tec. Doc, 1996 (avec bibliogr.). – CHABOT H., *Essai de caractérisation des savoirs scientifiques rejetés à l'aube de l'âge positif (1750-1835). Enquête historique sur quelques théories fausses*, Univ. de Nantes, 1998 (thèse). – CROSLAND M., *The Society of Arcueil : A View of French Science at the Time of Napoleon I*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1967 ; *Science under Control. The French Academy of Sciences, 1795-1914*, Cambridge Univ. Press, 1992. – DHOMBRES J., « La mise en scène du bon savant », in BOULLY J.N., *René Descartes, trait historique*, Bari, Palomar, 1996, p. 115-134. – DHOMBRES J. & DHOMBRES N., *Naissance d'un pouvoir : sciences et savants en France (1793-1824)*, Paris, Payot, 1989. – FRÄNGSMYR T. éd., *Science in Sweden. The Royal Academy of Sciences 1739-1989*, Canton (Mass.), Science History Publ., Watson Publ. Intern., 1989 ; (dir.), *Solomon's House revisited : the Organization and Institutionalization of Science*, Canton (Mass.), Science History Publ., Watson Publ. Intern., 1992. – HAHN R., *Anatomie d'une institution scientifique. L'Académie des Sciences de Paris, 1666-1803*, Paris, Éd. des archives contemporaines, 1993. – KNOWLES MIDDLETON W.E., *The Experimentors : A Study of the Accademia del Cimento*, Baltimore, John Hopkins Univ. Press, 1971. – LYONS Sir H., *The Royal Society, 1660-1940 : A History of its Administration under its Charters*, Cambridge Univ. Press, 1940 (rééd., New York, 1968). – MANDELBAUM P., *La Société philomatique de Paris*, Paris, EHESS, 1979 (thèse). – MCCLELLAN J., « The Académie royale des sciences, 1699-1793 ; A statistical portrait », *Isis*, 72, 1981, p. 541-567. – *Science Reorganized. Scientific Societies in the Eighteenth Century*, New York, Columbia Univ. Press, 1985. – PAUL C., *Science and Immortality. The Eloges of the Paris Academy of Sciences (1699-1791)*, Berkeley, 1980. – RIBEIRO J.S., *Historia dos estabelecimentos científicos, literários e artísticos de Portugal*, Lisbonne, Academia Real das Ciências, 5 vol., 1871-1876. – SALOMON-BAYET C., *L'Institution de la science et l'expérience du vivant : méthode et expérience à l'Académie royale des sciences (1666-1793)*, Paris, Flammarion, 1978. – SPRAT T., *The History of the Royal Society for the Improving of Natural Knowledge*, Londres, 1667 (Johnson reprint, 1958, avec introd. J.I. Cope & H.W. Jones). – STIMSON D., *Scientists and Amateurs. A History of the Royal Society*, New York, H. Schuman, 1948.

Jean DHOMBRES

→ Enseignement des sciences ; Museum national d'histoire naturelle ; Prix Nobel des sciences ; Royal Society ; Sociétés savantes.

ACIDE ET BASE

Bien avant d'être l'objet de l'attention des chimistes, les acides et les bases – ou ce que nous désignons aujourd'hui sous ces termes – ont été des substances utiles. Le vinaigre est un acide artificiel connu depuis la plus haute Antiquité. Le natron, mélange équimolaire de carbonate et d'hydrogencarbonate de sodium, est un produit naturel que l'on trouve dans un lac salé de Tanzanie. Les cendres de bois sont utilisées dans la fabrication des verres et des savons. C'est déjà leur faculté d'entrer en réaction qui sous-tend l'intérêt que l'on porte à ces substances et qui en font l'objet de commerce. Plus tard, ce sont les fabrications d'acide sulfurique, puis de soude artificielle, qui seront les piliers de l'industrie chimique naissante.

Les acides et les bases se sont imposés aux chimistes tels des objets incontournable hérités du passé, et la compréhension de leurs réactions est pour eux un défi toujours renouvelé. La partie n'est pas facile, il suffit de regarder comment se sont transformés au cours des siècles ces concepts d'acide et de base pour s'en convaincre.

La théorie des sels

On reconnaît souvent aux Académies la vertu d'avoir transformé les sciences. Lieux d'échanges, lieux de débats, lieux de controverses, elles ont institué un mode de construction et de transmission du savoir scientifique que nous reconnaissons encore comme nôtre. La chimie, héritière d'un patrimoine ancestral à la fois artisanal, économique et expérimental, participe de cette transformation. Nicolas Lémery est une haute figure de la chimie du *xvii^e s.* Les idées qu'il a développées sont représentatives de son temps, et son *Cours de chymie*, qui a obtenu un succès éditorial considérable, a profondément marqué les générations de chimistes à venir.

Au cœur de la doctrine chimique de cette époque, il y a la théorie des sels. Le concept de sel est extrêmement large. Tout ce qui est soluble est un sel, que ce soit le sel commun ou l'acide sulfurique alors appelé huile de vitriol. La propriété acide consiste à dissoudre et à former donc un sel, la propriété appelée alors « alcaline » étant d'être soluble. Lémery voit dans le « combat des acides et des alcalis » l'unique cause de tous les phénomènes chimiques. La réaction des acides sur les alcalis organise tout le champ du savoir chimique.

La conception que Lémery a de la matière et de ses transformations le situe dans la tradition cartésienne. Il imagine des corpuscules en interaction mécanique : « Je dirai que l'acidité d'une liqueur consiste dans des particules de sel pointues lesquelles sont en agitation, [...] il ne faut que le goûter pour tomber dans ce sentiment. [...] L'alcali est une matière composée de parties roides et cassantes, dont les pores sont figurés de façon que les pointes acides y étant entrées, elles se brisent et écartent tout ce qui s'oppose à leur mouvement [...] »

Largement contemporain de Lémery, Robert Boyle a apporté une contribution considérable à l'étude des acides et des alcalis. Il remarque que la réaction s'accompagne parfois d'effervescence, alors qu'il n'y en a pas dans d'autres cas. Il met au point le premier indicateur coloré, le sirop de violette, rouge en milieu acide et vert en présence d'alcali. À une notion démesurément large de « faculté de dissoudre », Boyle substitue la réponse à un test expérimental qualitatif mais précis. La classification des substances s'en trouve largement nuancée. On reconnaît les sels acides, comme l'huile de vitriol, les sels alcalins, comme le sel de tartre, et les sels « moyens » issus de la combinaison des deux premiers. On distingue aussi les alcalis qui produisent l'effervescence et ceux qui ne la produisent pas.

Vers le milieu du XVIII^e s., Rouelle introduit le concept de base, comme étant une substance partenaire de l'acide. « J'ai étendu le nombre de sels autant qu'il était possible, en définissant génériquement le sel neutre, un sel formé par l'union d'un acide avec une substance quelconque, qui lui sert de base et lui donne une forme concrète ou solide. » La notion de base est alors beaucoup plus large qu'aujourd'hui puisqu'elle comprend les « alcalis », les « terres », les métaux et les huiles.

Contribution de la chimie pneumatique

L'effervescence observée ou non lors de l'action des acides sur diverses substances va prendre une importance considérable grâce au travail de Black. Comparant la magnésie et son produit de calcination, il constate que la calcination a fait perdre au solide sept douzièmes de son poids. Par ailleurs la magnésie calcinée donne les mêmes substances que la magnésie par action des acides, mais ne produit pas d'effervescence. Black vient de mettre en évidence l'importance des « airs » dans la réaction chimique, il inaugure la chimie pneumatique qui va dominer la seconde moitié du XVIII^e s.

Confinés grâce à l'invention de matériels habiles, soumis à la caractérisation et à la pesée, les « airs » vont rapidement se diversifier. L'« air » formé par action d'un acide sur un métal n'est pas celui obtenu par action du même acide sur la craie, l'air commun n'est plus un « élément » mais un mélange ; il y a l'air inflammable, l'air fixe, l'air déphlogistiqué que Lavoisier nommera oxygène en 1777.

Sous l'influence de Lavoisier, la nature des substances, leur composition, devient l'enjeu fondamental de la chimie de la fin du XVIII^e s. L'analyse qualitative et quantitative sont les techniques les plus employées. La conservation de la matière, qui, même avant Lavoisier, ne faisait guère de doute, s'écrit en termes de conservation de la masse de chaque élément au cours de la réaction chimique.

La décomposition est aussi une technique de fabrication comme en témoigne cette offre de l'Académie

datant de 1775 et proposant un prix d'un montant de 2 400 livres « à celui qui aura trouvé le procédé le plus simple et le plus économique pour décomposer en grand les sels de la mer, en extraire l'alcali qui lui sert de base, dans son état de pureté, dégagé de toute combinaison acide ou neutre, sans que la valeur de cet alcali minéral excède le prix de celui que l'on tire des meilleures soutes étrangères ». Partir d'un sel dans lequel ni le cation ni l'anion ne possède de propriété acido-basique en solution aqueuse semble paradoxal au chimiste moderne. Cependant, Nicolas Leblanc relève le défi en 1791. Autre paradoxe, son procédé ne fera pas sa fortune mais celle des industriels britanniques pendant l'Empire.

Mais de quoi sont faits ces acides et ces bases ?

Lavoisier, qui reconnaît à l'oxygène son caractère de corps simple et qui lui donne son nom, ne choisit pas par hasard un mot qui ressemble au mot acide. Il croit que c'est l'oxygène qui est responsable de l'acidité. Alors que les oxydes, anciennement appelés chaux, sont composés d'un métal tels l'étain, l'argent ou le mercure, et d'oxygène, les acides sont constitués d'oxygène et d'une « base acidifiable » non métallique, comme le carbone, l'azote, le phosphore ou le soufre. Le mot « base » s'applique alors à n'importe quel corps simple et le classement des corps simples en métaux et non-métaux se superpose à celui des corps simples à oxyde basique ou à oxyde acide.

La pile électrique de Volta ouvre de nouvelles voies, et l'obtention de nouveaux corps simples par décomposition s'accélère au début du XIX^e s. Ce sont à chaque fois des succès pour la théorie lavoisienne puisque, entre autres, le sodium, le baryum, et le magnésium dont les oxydes sont basiques s'avèrent être des métaux.

Cependant, un acide banal, l'acide chlorhydrique, alors appelé muriatique, pose difficulté puisque la mise en évidence de la présence d'oxygène dans le gaz sec échoue malgré les efforts des expérimentateurs. Les *Recherches sur l'acide prussique* menées par Gay-Lussac en 1815 ajoutent une exception nouvelle. La situation n'est guère plus confortable du côté des bases puisque l'ammoniac dont la composition est connue depuis Berthollet n'est pas un oxyde métallique. On a même proposé de considérer l'azote comme l'oxyde d'un corps simple non isolé pour contourner la difficulté.

En 1838, Liebig propose de considérer les acides comme des composés contenant de l'hydrogène « échangeable » contre un métal et un « radical » de nature variée. On notera $\text{Cl}^2 + \text{H}^2$ l'acide chlorhydrique, $\text{H}^2 + \text{Cl}^2\text{O}^2$ l'acide hypochloreux ou $\text{P}^2\text{O}^3 + \text{H}^6$ pour l'acide phosphorique. Une base en revanche est un composé oxygéné. Dans la réaction, l'hydrogène de l'acide se combine avec l'oxygène de la base pour former de l'eau, réaction dont on rend compte par la célèbre formule : acide + base = sel + eau. Cette

présentation ne règle pas le cas de l'ammoniac, au moins à l'état de gaz, mais les solutions aqueuses et leur conductivité attirent de plus en plus l'attention des chimistes. Les acides, les bases, et leurs sels sont des électrolytes. Il faut comprendre que leur solution aqueuse conduit l'électricité et qu'ils se décomposent sous l'effet du courant. Daniell montre que le radical proposé par Liebig se retrouve toujours à l'anode.

Des espèces électriquement chargées en solution

Les années 1884-1888 vont être particulièrement riches de développements nouveaux concernant l'acidobasité en solution aqueuse. Les choses commencent mal cependant puisque la thèse proposée par Arrhenius est très fraîchement reçue. Il y traite de la conductivité des solutions aqueuses fortement diluées et propose une théorie chimique des électrolytes dans laquelle les substances seraient présentes sous deux formes en constant échange dynamique, l'une d'entre elles étant électriquement active. Pour un acide « fort », il n'y aurait que la forme active, et ce serait le cas de tous les électrolytes aux très fortes dilutions.

Après des études sur la pression osmotique de Van't Hoff et l'analogie qu'il fait entre gaz parfaits et solutions, Arrhenius poursuit en 1887 en proposant une structure ionique des électrolytes en solution, les ions existant même en absence d'électrolyse. Un acide fournit des ions hydrogène, une base des ions hydroxyde, et la réaction acido-basique observée est toujours celle de ces ions entre eux. On comprend pourquoi la chaleur dégagée par la réaction est la même quels que soient l'acide fort et la base forte employés.

En 1888 Ostwald, qui avait été l'un des rares à soutenir Arrhenius, applique la loi de Guldberg et Waage aux espèces ioniques. La valeur de la constante d'équilibre avec l'eau, constante d'acidité dans un cas, de basicité dans l'autre, permet de donner une définition numérique de la force d'un acide ou d'une base. Elle permet également de justifier le comportement des électrolytes faibles en solution fortement diluée. Ostwald détermine aussi pour la première fois la constante d'ionisation de l'eau. L'état d'une solution aqueuse est désormais calculable comme on calcule la trajectoire d'un point en mécanique newtonienne.

Les systèmes biologiques étant particulièrement sensibles à l'acidité du milieu, ce sont les biologistes, dont Sørensen fait partie, qui vont apporter une amélioration au traitement de ces problèmes d'état d'équilibre thermodynamique en introduisant en 1909 la notion de pH ($\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$), la concentration en ion hydrogène étant exprimée en mol.L⁻¹). La notion mettra une bonne dizaine d'années à s'imposer chez les chimistes. L'introduction de coefficients d'activité a permis d'étendre la notion aux solutions concentrées, mais elle a aussi posé des problèmes théoriques délicats.

Deux nouvelles définitions des acides et des bases

Dans la définition d'Arrhenius, l'ammoniac, encore lui, pose problème. Si l'on veut que la solution fournisse des ions hydroxyde, il faut noter cette base NH_4OH , formule qui a certes été utilisée pendant des décennies mais qui représente médiocrement la réalité. En 1923, Brønsted publie simultanément avec Lowry une nouvelle définition d'acide et de base qui lève la difficulté : un acide est une espèce qui fournit un proton alors que la base le capte. Le proton est la particule, jamais libre, qui s'échange entre les deux espèces. On substitue à l'ancienne notation : acide + base = sel + eau, la nouvelle : acide 1 + base 2 = acide 2 + base 1. La nouvelle définition englobe celle d'Arrhenius : un acide réagit sur l'eau, qui se comporte alors comme une base pour fournir l'ion hydrogène solvaté qui en est l'acide conjugué ; les bases réagissent sur l'eau, qui agit alors comme acide pour fournir l'ion hydroxyde qui en est la base conjuguée. Tantôt acide, tantôt basique, l'eau est un ampholyte.

La définition de Brønsted possède l'avantage d'être généralisable aux solvants non aqueux qui sont eux aussi des ampholytes, avec une définition adaptée du pH, ainsi qu'aux réactions en phase sèche. De plus l'analogie formelle mise en place entre les réactions d'oxydo-réductions et les réactions acido-basiques fournit un parallélisme satisfaisant entre les traitements algébriques que l'on fait de ces deux types de réactions.

Cependant, la définition de Brønsted singularise excessivement le proton. À la même période, Lewis propose une définition plus générale encore. Lewis a construit un modèle moléculaire en 1916 dans lequel les atomes, qu'il conçoit alors de forme cubique, possèdent, dans les structures stables, un électron à chaque sommet du cube, soit huit en tout. Quand un atome ne possède pas huit électrons, il peut en gagner ou en perdre et former alors des structures ioniques : il peut aussi en mettre deux en commun avec un autre atome, ce qui forme une liaison de covalence entre deux cubes possédant une arête commune.

Si le modèle du cube est rapidement apparu comme une approche très primitive de la structure de l'atome, l'idée du partage d'un doublet d'électrons a eu un succès considérable qui a conduit Lewis à proposer comme définition des acides et des bases : une base possède un doublet d'électrons libres susceptible d'être partagé pour former une liaison de covalence ; un acide est une espèce pauvre en électrons et susceptible d'accepter un doublet d'électrons supplémentaire. Le composé porte généralement le nom d'adduit de Lewis.

Si les deux définitions semblent très voisines dans le cas des bases, il n'en est pas de même des acides pour lesquels la définition de Lewis est beaucoup plus vaste que celle de Brønsted. Il n'y a guère de formations de liaison covalente entre espèces à nombre pair d'électrons qui ne puissent être considérées, au moins formellement, comme des réactions de formation d'adduits de Lewis. A nouveau, le concept d'acide et de base s'étend pour rendre compte de toute la chimie, ou peu s'en faut.

HSAB

La généralisation du concept d'acide et de base, introduite par Lewis, a rendu quelque peu inopérante la notion de force d'un acide et d'une base. Certaines bases, formant des adduits très stables avec certains acides, forment des adduits de stabilité médiocre avec d'autres. Le fait que certains métaux, comme le plomb ou le mercure, se trouvent à l'état de minéral sous forme de sulfure alors que d'autres forment des oxydes ou des carbonates est un fait connu depuis longtemps.

Analysant les constantes de stabilité de très nombreux adduits, Pearson observe que l'ordre de stabilité des adduits de Lewis de l'acide H^+ avec une liste de bases est conservé dans le cas de certains autres acides, et inversé dans d'autres cas. Il propose en 1963 de diviser les acides et les bases en deux catégories : les bases « molles » sont des donneurs fortement polarisables de faible électronégativité, faciles à oxyder ; les bases « dures » sont des donneurs faiblement polarisables très électronégatifs, difficiles à réduire ; les acides « durs » sont accepteurs de doublets fortement chargés, de petite taille, peu polarisables et ne disposent pas d'électrons facilement excitables ; les acides « mous » sont des accepteurs faiblement chargés, de grande taille, fortement polarisables.

Pearson pose le principe des réactions entre ces espèces : les acides durs « préfèrent » former des adduits de Lewis avec les bases dures, les acides mous avec les bases molles. Cette théorie, connue en anglais sous l'appellation HSAB pour « hard and soft acids and bases », porte en français le nom guère heureux de théorie des acides-bases durs-mous. Il ne s'agit d'ailleurs pas d'une théorie au sens de dogme fondateur, mais d'une organisation phénoménologique des données numériques. La définition totalement qualitative et la formulation très particulière du principe qui attribue des « préférences » aux acides et aux bases en rendent compte.

Très utile et efficace, cette théorie a été également très contestée en raison de l'absence de fondement théorique explicite. Les choses ont évolué et, en 1987, Pearson examine comment le principe HSAB peut être lu dans le contexte théorique du moment. Si on trace l'énergie d'une espèce en fonction du nombre d'électrons, courbe dont seuls certains points sont connus, ceux qui correspondent à des nombres entiers d'électrons, les caractéristiques locales de la courbe (dérivée et concavité) peuvent être estimées ; pour la dérivée première par l'électronégativité au sens de Mulliken changée de signe ; ou encore la demi-somme de I et A , énergie d'ionisation et affinité électronique au signe près ; pour la dérivée seconde par la différence entre I et A , quantité que l'on pose égale à deux fois la dureté de l'espèce.

L'égalisation des potentiels chimiques électroniques de deux espèces en interaction montre que la quantité d'électrons qui s'échangent, quantité généralement

fractionnaire, est d'autant plus grande que la différence d'électronégativité des espèces est plus forte, mais qu'elle diminue quand la somme des duretés des espèces augmente. La dureté indique la résistance des espèces à voir varier leur nombre d'électrons. L'interaction entre les espèces dures est donc de nature principalement coulombienne ; elle est particulièrement favorable dans le cas d'espèces petites et fortement chargées, conformément à la définition qualitative initiale. En revanche, les espèces molles d'électronégativités voisines ont des interactions de type orbitalaire. Le diagramme orbitalaire d'une espèce à nombre pair d'électrons permet une visualisation de l'électronégativité au sens de Mulliken et de la dureté. L'écart entre l'orbitale haute occupée et la basse vacante est le double de la dureté. Le point milieu entre les deux niveaux donne la valeur de l'électronégativité, au signe près. On retrouve, là encore, les critères qualitatifs mis en place en 1963 : une espèce molle possède des électrons faciles à promouvoir dans l'orbitale vacante ; les molécules poly-insaturées conjuguées, connues pour être fortement polarisables, seront aussi particulièrement molles ; enfin, les interactions entre deux espèces sont d'autant plus importantes que l'écart entre orbitale haute occupée de l'une et basse vacante de l'autre est faible.

Présentes dès les origines, les théories sur les acides et les bases ont organisé partiellement, et parfois totalement, le savoir du chimiste. Elles ont subi des mutations profondes qui ont été le reflet des mutations technologiques et des modes de pensée de leur époque. À observer les évolutions les plus récentes de ces concepts ancestraux, il serait décidément hardi de croire que la compréhension des acides et des bases soit désormais cristallisée pour l'éternité. Elle est plus probablement datée, comme le sont sans doute toutes les vérités scientifiques. À nous de savoir relever le défi, le jour où une découverte nouvelle nous contraindra à reconstruire tout l'édifice.

► BENSUADE-VINCENT B., *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte, 1992. — GILLISPIE C.C., *Dictionary of Scientific Biography*, 1970, 1981. — LAVOISIER A.L., *Traité élémentaire de chimie*, 1796 ; rééd., Paris, Culture et civilisation, 1965. — METZGER H., *Les doctrines chimiques en France du début du XVIII^e siècle à la fin du XVIII^e siècle*, Paris, Blanchard, 1969. — PATTISON MUIR M.M., *A chemistry of chemical theories and laws*, New York, 1907. — PEARSON R.G., « Recent advances in the concept of hard and soft acids and bases », *Journal of Chemical Education*, vol. 64, juillet 1987. — SERVOS J.W., *Physical chemistry from Ostwald to Pauling*, Princeton Univ. Press, 1990.

Jean-Claude COMPAIN

→ Catalyse ; Electrochimie ; Électron ; Lavoisier ; Sel.

ACTION IMMÉDIATE À DISTANCE → Champ

ACTUALISME OU UNIFORMITARISME

Vocabulaire

Le terme d'uniformitariens (anglais, *uniformitarians*) vient de William Whewell (1794-1866), qui l'oppose à celui de catastrophistes, pour caractériser les idées de Lyell (1797-1875) et celles de ses adversaires, à l'occasion de la parution du second volume des *Principles of Geology* (*Quarterly Review*, 1832, 47, p. 126 ; « The two antagonist doctrines of geology », *History of the Inductive Sciences...*, 1847, II, p. 658-677). Pour les premiers, « les changements qui nous mènent d'une époque géologique à l'autre ont été, dans leur moyenne, d'intensité uniforme », tandis que les seconds imaginent des « époques d'activité catastrophique et paroxysmique séparées par des périodes comparativement tranquilles ». En bref, les deux doctrines s'opposent sur le thème : continuité ou discontinuité.

Si l'uniformitarisme est nommé aussi actualisme, c'est que les phénomènes d'intensité constante sont pris dans la nature actuelle. Les seules catastrophes admises sont celles qui bouleversent notre monde : séismes, tornades et autres cataclysmes « naturels ». C'est pourquoi le principe correspondant est dit doctrine des causes actuelles.

Toutefois, ce dernier terme ne date pas de Charles Lyell, contrairement à ce qu'a longtemps dit l'historiographie. Il est antérieur : on le trouve chez Cuvier (1769-1832). Et qui plus est pour désigner... une thèse ancienne, qu'il estime inadéquate et abandonnée. « On a cru longtemps pouvoir expliquer par [des] causes actuelles, les révolutions antérieures. [...] Mais [...] le fil des opérations est rompu ; la marche de la nature est changée ; et aucun des agents qu'elle emploie aujourd'hui ne lui aurait suffi pour produire ses anciens ouvrages » (*Discours préliminaire*, 1812). Mais Cuvier, lui-même, n'est pas le premier à soutenir cette idée : il la reprend de Jean-André De Luc (1727-1817) qui avait émis le même avis dans ses *Lettres à Delamétherie* (*Observations sur la physique*, 37, 1790, p. 216), puis des *Lettres à Blumenbach* (1798 p. 61). Dans la mesure où ces causes sont de faible intensité, on peut aussi les dire « lentes » (terme utilisé par le même auteur dès 1779).

L'origine française du terme permet d'exclure une interprétation qu'on lit dans maints ouvrages, même récents. L'expression étant supposée venir de Lyell, sous la forme « actual causes », sa traduction française correcte serait cause réelle, non actuelle. Du coup, il faudrait l'opposer à cause imaginaire. L'erreur remonte à Charles Sainte-Claire Deville (1814-1876), successeur d'Élie de Beaumont au Collège de France. Adversaire des causes actuelles qui ne mettent en jeu que des « forces relativement microscopiques », il explique que le terme est absurde dans sa forme française, et inutile en anglais, puisque personne ne fait délibérément appel à des causes imaginaires.

En fait, l'expression est rarissime chez les auteurs

anglais. Lyell, lui-même, n'en fait usage que par mégarde (*Principles of Geology*, III, plan du chapitre 1, où il oppose « former and actual causes of change »). En revanche, en France, d'abord sporadique, elle revient en force quand Stanislas Meunier (1843-1925) en fait le titre de ses leçons de 1875-1876 au Muséum.

Ancienneté de l'uniformité de la nature

Si Cuvier dénonce l'actualisme comme une doctrine périmée, c'est qu'elle a des partisans antérieurs qu'il convient de trouver. Le prêtre italien Lazzaro Moro (1687-1764), qui cherche dans les volcans actuels des modèles explicatifs de la formation des montagnes, pose l'axiome que les mêmes causes produisent les mêmes effets, en le nommant principe de Newton. En effet, disait l'auteur des *Principia*, « il faut assigner les mêmes causes aux effets naturels de même genre autant que faire se peut » (livre III). Mais l'axiome est beaucoup plus ancien. « Les choses de même nature produisent les mêmes opérations selon leur nature », dit au XIII^e s. Grosseteste (A. Crombie, *Histoire des sciences de saint Augustin à Galilée*, trad. fr., Paris, PUF, 1959, I, p. 228). Et Duns Scot aussi bien que Guillaume d'Ockham adhèrent au même principe d'uniformité, condition d'intelligibilité de l'univers. Ce qui, à travers les auteurs de l'école d'Oxford, nous permet de remonter à la pensée d'Aristote (*Seconds Analytiques*, 99b). En géologie, Aristote professe des idées sur les lentes variations des terres et des mers, dans un monde éternel, qui en font un archétype du modèle de Lyell. Seule entrave à l'uniformité, au niveau spatial, la distinction des mondes sublunaire et supralunaire, qui exige des lois différentes de part et d'autre de la lune. Mais précisément, la révolution astronomique brisera la séparation, et proclamera l'universalité des lois naturelles. Et si Aristote forme l'archétype de l'uniformitarisme, ses adversaires stoïciens offrent celui du catastrophisme avec leur cataclysmes destructeur périodique du cosmos. Ce qui permet de faire du catastrophisme des adversaires de Lyell une sorte de retour du Stoïcisme.

Modèles historique et stationnariste

Revenons à De Luc. Si les causes qui ont façonné le monde ancien ont « cessé d'agir », c'est qu'il ne s'opère rien de semblable dans la mer actuelle, qui a perdu certains des composants qui, par précipitation chimique, ont formé nos couches de terrains. Ce n'est donc pas seulement que les forces étaient antérieurement plus considérables. La nature s'est modifiée qualitativement. Deux ordres de phénomènes contredisent la doctrine actualiste. L'intensité des forces agissantes est actuellement trop faible pour rendre compte de certains faits, comme le renversement des couches qui crée les montagnes, et la distribution des blocs erratiques. Mais aussi, leur nature est différente parce que l'histoire de la mer (le « liquide » dit De Luc) l'a privée

des constituants qui se sont déposés et, à l'inverse, l'a dotée de matières volatiles échappées des profondeurs du globe par l'effondrement de cavernes souterraines. Les géologues contemporains, qui nous disent que l'atmosphère primitive de la terre était réductrice, et que l'oxygène s'est formé graduellement, en contrepartie de la fixation du carbone dans les sédiments, soit en gisements houillers ou d'hydrocarbures, soit dispersé, raisonnent de même façon. Également, lorsqu'ils expliquent les blocs erratiques et autres phénomènes glaciaires et périglaciaires par un changement de climat.

Les successeurs immédiats de De Luc disposeront d'un phénomène expliquant à la fois la variation d'intensité et l'histoire linéaire. Ce sera le « refroidissement séculaire » de la terre. Le globe ancien était incandescent, et les actions plutoniques s'y produisaient avec une intensité que ne connaît plus la nature actuelle. Le refroidissement (phénomène continu), en produisant la contraction de la terre, provoque l'effondrement périodique de sa croûte (phénomène discontinu). La lenteur du refroidissement en fait un phénomène graduel, conforme aux lois actuellement existantes. Mais son irréversibilité le place dans un cadre évolutionniste qui déplaît à Lyell. Celui-ci, en effet, tient autant à l'uniformité de l'état de la terre qu'à l'uniformité de ses lois. Faute de pouvoir nier la chaleur souterraine, il en attribua la source à des phénomènes d'ordre chimique, afin de disposer d'un moteur permanent.

Le paléontologue et historien britannique M. Rudwick qualifie ce modèle de « steady state » (que je traduis par « stationnariste ») et l'oppose à celui de Conybeare, l'un de ses adversaires, réputé « historical », parce qu'il fait appel à un « continued directional change » tel qu'on peut le déclarer directionnaliste (M. Rudwick, *Pr. Am. Phil. Soc.*, 1967). On voit donc que l'uniformitarisme combat, en quelque sorte, sur deux fronts : contre le catastrophisme *stricto sensu*, caractérisé par la discontinuité des mouvements, et le directionnalisme, caractérisé par l'irréversibilité.

La discontinuité du passage d'une époque à l'autre, de même que la brutalité des soulèvements des montagnes, est dans les années 1830 une évidence pour la plupart des géologues. Ami Boué (1794-1881), cofondateur de la Société géologique de France, qui passe plutôt pour actualiste, dit en 1834 que Lyell est seul à nier que les redressements des couches soient « violents et prompts » (« Résumé des progrès des sciences géologiques... », *Bull. Soc. Géol. France*, 5, 1834, p. 217).

Quant au directionnalisme, il résulte de la théorie du refroidissement, qui fait l'accord de la plupart des gens après les travaux de Fourier, ceux de Cordier, et l'autorité d'Élie de Beaumont qui l'adopte dès 1830. Il ne s'éloigne cependant pas trop de l'actualisme dans la mesure où le refroidissement est un phénomène actuel.

Certains épistémologues, à la suite de R. Hooykaas, ont cherché à distinguer un uniformitarisme qui croirait que les causes anciennes ont même nature et même

intensité que les causes actuelles, et un actualisme qui se contenterait de causes de même nature, sans exclure les variations d'intensité (R. Hooykaas, *Continuité et discontinuité en géologie et biologie*, trad. fr., 1970). En fait, il est rare de voir des auteurs faire appel à des causes qui n'auraient aucun équivalent actuel. Des causes imaginaires sont hors du champ de la science. Sainte-Claire Deville le disait ; S.J. Gould le répète en montrant qu'en tant que principe méthodologique l'uniformitarisme appartient au passé de l'histoire de la géologie, puisque les interventions divines sont exclues de la science contemporaine (Gould, « Is Uniformitarianism necessary ? », *Am. Journ. Sci.*, 263, 1965). En fait, les causes physiques sont constantes pour tout chercheur. Sauf encore dans la première moitié du siècle dernier pour expliquer les créations répétées qui semblent échapper au domaine des « causes secondes ». Pour le reste, comme dit très bien De Luc qui est allé le plus loin dans le directionnalisme, les mêmes causes générales ne produisent pas les mêmes effets quand les circonstances sont différentes » (*Lettres à Blumenbach*, 1798, p. 173).

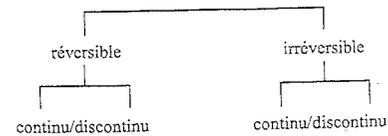
D'ailleurs Hooykaas ne trouve aucun auteur ayant invoqué des causes physiques anciennes. Seules les causes géologiques ont pu varier, et ce en fonction de leur complexité. « Plus un phénomène est compliqué, moins il y a de chances pour que ses nombreuses séries causales indépendantes qui viennent converger en lui se retrouvent en coïncidence à un autre moment. [...] Dans les séries de complexité croissante – réactions physico-chimiques, genèse des minéraux, pétrogenèse, formation des montagnes – une réaction chimique peut être répétée à volonté tandis que l'édification d'une chaîne de montagnes possède un caractère individuel et ne peut être reconstituée que par la pensée » (R. Hooykaas, *op. cit.*, 1970, p. 75).

La remarque est pertinente, mais elle ne justifie pas la distinction que l'auteur fait entre actualisme et uniformitarisme. Ce qui est le plus contestable dans le schéma de Lyell, c'est qu'il imagine une terre ancienne identique à la terre actuelle. Cela relève d'un uniformitarisme qu'on peut, avec Gould, qualifier de « substantiel » (Gould, *op. cit.*, 1965), et qui suppose non seulement l'uniformité des vitesses mais aussi des conditions.

C'est au schéma opposé que nous avons donné le nom de directionnalisme. Qu'on pourrait aussi nommer évolutionnisme, selon un terme proposé par Thomas Huxley (1825-1895), l'ami de Darwin, dans une allocution présidentielle à la Société géologique de Londres. Le célèbre biologiste montre qu'uniformité et catastrophe sont deux aspects d'une même réalité, prenant l'exemple de l'horloge dont le mouvement régulier est ponctué des appels brusques de la sonnerie. Il ajoute que l'évolutionnisme, qui permet aussi bien d'expliquer la croissance du système solaire que la formation de la terre ou le développement d'un être vivant, englobe les phénomènes continus et les événements brutaux (*Quart. Journ. Soc. Geol. London*, 25, 1869).

Plus près de nous, G. Simpson, célèbre paléontologue, l'un des fondateurs de la théorie synthétique de l'évolution, et qui appartient donc au même courant de pensée que Huxley, a fait le recensement des divers termes utilisables. Il regroupe sous un même mot, historicisme : le modèle stationnariste cyclique de Hutton, le modèle stationnariste statistique de Lyell et le modèle historique de Conybeare. Il réserve, en revanche, le terme d'évolution à l'histoire biologique (Simpson, *Uniformitarianism. An inquiry...*, 1970).

La multiplicité des termes (Simpson y ajoute notamment le gradualisme) risque de conduire à la confusion. On peut résumer l'ensemble en posant trois alternatives : modèle stationnariste vs modèle évolutionniste (ss. lt.). Cela sépare l'évolutionnisme *stricto sensu* ou évolutionnisme biologique de l'uniformitarisme lyellien ; réversibilité vs irréversibilité, ce que Gould nommait récemment temps cyclique vs temps sagittal (Gould, 1990) ; continuité vs discontinuité (en biologie contemporaine : gradualisme vs saltationnisme). Un modèle stationnariste strict impliquant une terre en équilibre plus ou moins dynamique, il exclut le recours aux deux autres alternatives. Cela peut surprendre quand on oublie que Lyell fut l'adversaire de la gradation lamarckienne, et, au-delà, de tout le courant progressionniste. Mais il faut comprendre que l'évolution par sélection naturelle suppose l'acceptation d'un développement cumulatif que justement l'uniformitarisme refuse (W. Cannon, « The Uniformitarian-Catastrophist Debate », *Isis*, 51, 1960, p. 38-55). En revanche le modèle évolutionniste se divise doublement selon le schéma suivant :



▷ CANNON W.F., « The Uniformitarian-Catastrophist Debate », *Isis*, 1960, n° 51, p. 38-55. – CUVIER G., « Discours préliminaire », *Recherches sur les ossements fossiles de Quadrupèdes...*, Paris, Déterville, 1812, rééd., Paris, Flammarion, 1992. – ELLENBERGER F. & GOHAU G., « À l'Aurore de la stratigraphie paléontologique. J.-A. De Luc, son influence sur Cuvier », *Revue d'Histoire des Sciences*, 1981, n° 34, p. 217-257. – GOULD S.J., « Is Uniformitarianism Necessary ? », *American Journal of Sciences*, 1965, n° 263, p. 223-228 ; *Aux racines du temps*, trad. fr., Paris, Grasset, 1990. – HOYKAAS R., *Continuité et discontinuité en géologie et biologie*, trad. fr., Paris, Le Seuil, 1970. – RUDWICK M.J.S., « A Critique of Uniformitarian Geology : a letter from Conybeare to Lyell », *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1967, n° 21, p. 272-287. – SIMPSON G.G., « Uniformitarianism. An Inquiry into Principle, Theory and Method in Geology and Biohistory », in ALBRITTON C.C. éd., *Philosophy of Geohistory 1785-1970*, Stroudsburg (Pennsylvania), Dowden, Hutchinson & Ross, 1975, p. 256-309.

Gabriel GOHAU

→ Catastrophisme ; Lyell ; Origines de la vie ; Orogenèse.

ADN

L'acide désoxyribonucléique ou ADN est une macromolécule : un double polymère non monotone formé par l'enchaînement de quatre nucléotides différents. Chaque nucléotide est lui-même formé d'une base, petite molécule organique cyclique, d'un sucre, le désoxyribose, et d'un groupement phosphate. L'ADN fut isolé pour la première fois par le physiologiste bâlois Frederic Miescher en 1869 comme un des composants chimiques essentiels du noyau, d'où son nom d'acide nucléique.

Sa structure ne fut déterminée que progressivement. La démonstration que l'ADN était une molécule de très grande taille et que l'enchaînement des nucléotides y était irrégulier n'intervint qu'entre les années 1940 et 1950. En 1953, James D. Watson et Francis Crick proposèrent le modèle en double hélice de la molécule d'ADN que toutes les études ultérieures devaient confirmer. Dans ce modèle, les deux chaînes de la molécule d'ADN sont orientées dans des directions opposées. Les nucléotides présents dans une chaîne sont complémentaires des nucléotides de l'autre chaîne. Chaque chaîne de la molécule d'ADN est donc capable, en présence des enzymes et des molécules chimiques adéquates, de donner naissance à sa chaîne complémentaire. Ce modèle expliquait ainsi comment la molécule d'ADN pouvait se répliquer en deux molécules filles identiques. Il expliquait aussi les erreurs possibles dans cette duplication et l'origine des mutations. Le modèle permettait enfin d'imaginer comment l'ADN stockait l'information génétique.

En effet, on ne peut dissocier l'histoire de l'ADN de celle des gènes. Bien qu'isolé du noyau, et montré peu de temps après présent dans les chromosomes, pendant longtemps l'ADN ne fut pas considéré comme un composant essentiel des gènes. Sa structure semblait trop « monotone » pour jouer un rôle spécifique dans les phénomènes héréditaires. Associé aux protéines au sein des chromosomes, c'est à ces dernières que l'on attribuait le rôle principal dans la structure et la fonction des gènes. Dominait alors en biologie ce que l'historien anglais Robert Olby a appelé la théorie enzymatique de la vie : les phénomènes fondamentaux du vivant étaient dus à l'action d'enzymes et de protéines et les mécanismes de l'hérédité n'échappaient pas à cette règle. Dans la théorie nucléoprotéique de la nature des gènes qui domina dans les années 1930, la partie nucléique apparaissait comme un simple support des gènes « protéiques », une réserve énergétique pour la division des chromosomes.

Cependant, deux expériences montrèrent que l'ADN avait un rôle plus important que celui de simple support. En 1944, Oswald T. Avery purifia le facteur transformant des pneumocoques. Ce facteur, extrait de pneumocoques d'un type particulier, permettait de transformer le type de pneumocoques receveurs, c'est-à-dire d'en modifier la capsule polysaccharidique, et cela de manière stable au cours des générations. Avery montra que le facteur transformant était

formé d'ADN. En 1952, Alfred Hershey et Martha Chase démontrèrent que c'était l'ADN (et non les protéines) des virus de bactéries, les bactériophages, qui permettait leur reproduction et était donc essentiel pour l'infection.

L'ADN se révélait donc être le constituant fondamental des gènes, la molécule porteuse des caractères héréditaires. Les biologistes moléculaires montrèrent entre 1961 et 1965 que la succession des nucléotides dans la molécule d'ADN était le code qui détermine l'enchaînement des acides aminés dans les protéines. L'ADN n'est pas directement traduit en protéines. Il est d'abord recopié en une molécule simple chaîne d'acide nucléique, appelée acide ribonucléique ou ARN, très semblable mais non identique à l'une des deux chaînes de la molécule d'ADN. Cette molécule d'ARN, dite messager, est ensuite traduite en protéines sur des particules intracellulaires appelées ribosomes. Les protéines ont des fonctions multiples dans la cellule. Elles assurent la structuration de la cellule, participent aux réseaux moléculaires permettant l'échange d'informations à l'intérieur des cellules et entre cellules, catalysent les réactions chimiques formant l'ensemble du métabolisme cellulaire – elles sont alors appelées enzymes – ou participent à la régulation de l'expression des gènes. Ce sont les protéines qui donnent au vivant sa richesse fonctionnelle. L'ADN n'est que la mémoire, transmise de générations en générations, qui contient le code permettant la synthèse de ces protéines en temps, lieu et quantité voulus.

Chaque chromosome est formé d'une seule molécule d'ADN qui correspond à plusieurs centaines ou milliers de gènes. La correspondance entre un fragment de cette molécule d'ADN et un gène particulier est cependant difficile à établir : l'existence de signaux de régulation, la possibilité pour une même molécule d'ADN d'engendrer plusieurs molécules d'ARNs et de protéines, compliquent la définition de cette relation. Cette difficulté n'est que le reflet de la difficulté actuelle à définir ce qu'est un gène au niveau moléculaire.

À partir de 1974, se développèrent les méthodes du génie génétique qui permettent de couper l'ADN en fragments, de séquencer ces fragments, de les amplifier et de les réintégrer dans les cellules dont ils proviennent ou dans d'autres organismes vivants. Les outils du génie génétique autorisent la création de nouvelles espèces, animales ou végétales, dites transgéniques car contenant une information génétique venant d'un organisme appartenant à une espèce différente. Pour la première fois, l'humanité a à sa disposition les outils lui permettant d'orienter l'évolution des êtres vivants.

L'ADN joue donc un rôle essentiel dans l'histoire de la biologie moderne. La beauté et la simplicité de sa structure furent en grande partie responsables de l'essor rapide de la biologie moléculaire. L'attribution de la fonction génétique à l'ADN, et non aux protéines, accompagna le développement de la vision informationnelle des êtres vivants. L'ADN est une molécule chimique, et les méthodes qui en permettent l'étude et la

manipulation sont des méthodes chimiques. Ces techniques ont été néanmoins tellement standardisées, automatisées, que leur contenu chimique s'en est estompé. L'étude de l'ADN n'apparaît plus que comme la simple lecture d'un texte. Les programmes, actuellement en plein développement, de séquençage des génomes animaux, végétaux ou bactériens, qui ne représentent que l'étude chimique fine des molécules d'ADN présentes dans ces organismes, ne sont pourtant conçus que comme la lecture et l'interprétation de textes, d'informations contenues au cœur des êtres vivants. Ces informations sont doubles : d'une part, il y a l'information structurale qui permettra, après décodage, la synthèse des protéines. L'ADN porte en plus une information de régulation, permettant l'expression des gènes, c'est-à-dire leur copie en ARN de manière correcte, en réponse aux signaux venus de l'extérieur de la cellule, pendant la phase appropriée du développement ou dans les tissus dans lesquels le gène doit s'exprimer. La molécule d'ADN contient aussi les signaux permettant de réguler la synthèse des protéines, ainsi que les informations nécessaires à sa propre duplication.

Les études récentes sur l'origine de la vie font de la molécule d'ADN un produit tardif de l'évolution. C'est après plusieurs centaines de millions d'années que les êtres vivants ont appris à séparer les molécules qui permettent la conservation de l'information au cours des générations (l'ADN) de celles qui assurent les fonctions du vivant (les protéines). La logique et les observations expérimentales imposent l'idée que, chez les premiers êtres vivants, ces deux fonctions aient été réunies dans une même molécule : celle-ci était l'ARN, et non l'ADN dont la structure chimique, bien trop inerte, ne permet pas d'assurer d'autres fonctions que celle de « stockage ». L'ARN est aussi un acide nucléique, capable de coder une information par l'ordre des nucléotides qui le forment. Certains virus sont formés d'ARN et de protéines et non, comme le bactériophage, d'ADN et de protéines. L'information héréditaire semble donc avoir été toujours transmise, au cours de l'histoire du vivant, sous forme d'acide nucléique. La découverte, ces dernières années, des prions, ces agents pathogènes non conventionnels, ne contenant pas d'acides nucléiques mais seulement des protéines, a pu sembler remettre en cause le rôle fondamental des acides nucléiques dans la transmission héréditaire au sein du monde vivant. La nature chimique de l'agent pathogène responsable des maladies dites à prions reste cependant l'objet d'après débats. Même si la nature protéique de ces agents pathogènes est confirmée, la place des phénomènes d'hérédité protéique, indépendante des acides nucléiques, restera probablement très limitée dans le monde vivant. Les acides nucléiques, en particulier l'ADN, sont bien l'incarnation des phénomènes héréditaires caractéristiques des êtres vivants.

Objet central de la nouvelle biologie dont la caractérisation et la manipulation ont accompagné la naissance et le développement, l'ADN a perdu son statut chimique pour devenir un simple synonyme d'information génétique, le support passif du texte fondamental du vivant.

► Y AVERY O.T., MACLEOD C.M. & McCARTY M., « Studies on the Chemical Nature of the Substance Inducing Transformation of Pneumococcal Types », *J. Exp. Med.*, vol. 79, 1944, p. 137-158. – HERSHEY A.D. & CHASE M., « Independent Functions of Viral Protein and Nucleic Acid in Growth of Bacteriophage », *J. Gen. Physiol.*, vol. 36, 1952, p. 39-56. – MORANGE M., *Histoire de la Biologie Moléculaire*, Paris, La Découverte, 1994. – OLBY R., *The Path to the Double Helix*, Londres, MacMillan, 1974. – PORTUGAL F.H. & COHEN J.S., *A Century of DNA. A History of the Discovery of the Structure and Function of the Genetic Substance*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1977. – WATSON J.D. & CRICK F.H.C., « A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid », *Nature*, vol. 171, 1953, p. 737-738.

Michel MORANGE

→ Biotechnologies ; Clonage ; Crick ; Génétique ; Information ; Jacob ; Origines de la vie ; Prion ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Virus ; Vivant (Théorie du) ; Watson.

AFFINITÉ

CHIMIE

Le terme affinité vient du mot latin *affinitas* ou *adfinitas*. Le premier sens strict de ces deux mots est celui de voisinage géographique. Au début du XVIII^e s. on trouve les trois sens suivants : celui de l'alliance par mariage qui unit l'un des conjoints à la famille de l'autre ; un sens analogue dans le domaine spirituel : l'alliance acquise par le baptême entre le parrain ou la marraine d'un enfant et les parents de ce dernier ; et un sens figuré : celui de liaison entre les choses qui ont un rapport entre elles et qui se ressemblent. Dans la seconde moitié du XVIII^e s. un sens nouveau apparaît : celui de la liaison intime qui s'établit entre deux personnes. Corrélativement on commence à parler d'affinité chimique comme un concept scientifique bien établi et bien adopté qui signifie l'union ou la tendance à l'union entre deux substances. Actuellement, l'affinité chimique représente la tendance de deux substances à s'unir pour former une ou plusieurs substances nouvelles. Cette notion d'affinité convient aussi bien aux cas où les deux substances sont de natures totalement différentes, semblables ou même identiques.

De la notion générale au concept scientifique

À travers la grande diversité des doctrines qui caractérisent la chimie jusqu'à la première moitié du XVIII^e s., le terme affinité est constamment employé dans les œuvres chimiques pour tenter d'expliquer les phénomènes naturels du monde minéral et du monde vivant. Dans des contextes bien différents, le terme et la notion d'affinité se retrouvent d'une manière très proche. Le terme exprime toujours la ressemblance de nature et la notion de tendance à l'union est considérée comme une qualité occulte – cachée ou, dans le langage moderne, potentielle – qui dérive du postulat suivant : le semblable attire et s'unit à son semblable. Cette notion

s'intègre dans des conceptions vitalistes exprimées par les termes de sympathie, appétit ou affection. En conséquence, la réaction chimique est représentée comme une union, sans violence, une alliance ou un mariage entre deux substances qui, tout en n'étant pas identiques, présentent entre elles une similitude de nature. Par ailleurs, toutes ces doctrines reconnaissent les deux caractères fondamentaux de l'affinité chimique : sa sélectivité (électivité) et sa potentialité. Malgré la séduction qu'elles pouvaient exercer sur des contemporains, ces doctrines ne pouvaient pas aider l'expérimentateur pour le guider dans ses opérations afin de comprendre le mécanisme de ces dernières et surtout d'en prévoir le résultat. En conséquence, ces théories sont appelées à disparaître au profit des philosophies mécanistes et corpusculaires.

Dans la seconde moitié du XVIII^e s., la notion d'affinité ne se trouve pas nettement exprimée dans les œuvres des chimistes qui prennent parti pour les principes et méthodes mécanistes ou corpusculaires. Ces chimistes rejettent les qualités occultes en tant que causes requises pour expliquer les phénomènes observés et, en conséquence, ils refusent les sympathies-antipathies qu'exprimait l'ancienne notion d'affinité. Le chimiste Nicolas Lémery, suivant rigoureusement la méthode cartésienne, explique les phénomènes chimiques en se fondant sur la forme et le mouvement des particules de matière. Dans son *Cours de Chymie* les images mécaniques se succèdent et la notion d'affinité semble absente de l'esprit de l'auteur ; les réactions parcourent sans faire intervenir la notion d'affinité. Néanmoins, dès le début du XVIII^e s., l'idée et le terme d'affinité réapparaissent en chimie, établis sur des bases plus « scientifiques ». Ce progrès, qui marque le passage de l'affinité du stade de notion générale à celui de concept scientifique, est dû à l'action combinée des mécanistes et des conceptions newtoniennes qui donnent un support nouveau aux vieilles idées d'attractions.

Isaac Newton n'a pas apporté à la chimie une systématisation qui puisse être comparée à celle de son œuvre en mécanique ou en optique. Newton considère que la réactivité chimique et sa caractéristique essentielle – la sélectivité – sont explicables par une théorie corpusculaire de la matière, laquelle présuppose forcément celle de l'attraction universelle. Dans la question XXXI de l'*Optique*, Newton s'attache avec beaucoup d'intérêt aux expériences dans lesquelles un métal, placé dans une solution d'un sel d'un autre métal, déplace ce dernier en le précipitant. En reprenant à son compte l'idée d'attraction interparticulaire à petite distance, Newton donne une explication cohérente et satisfaisante du phénomène. Il présente cette idée comme induite de l'ensemble des expériences au cours desquelles un corps A est transféré de sa combinaison avec un corps B, dans une nouvelle combinaison avec un troisième corps C. Dans chaque cas Newton expose le fait puis induit son explication : l'attraction des particules de C pour celles de A est plus forte que celle de B pour ces dernières. On peut conclure que, pour lui, l'affinité chimique est due à

l'attraction que leurs particules exercent les unes sur les autres. L'influence de Newton a été déterminante sur l'évolution des doctrines chimiques qui, grâce à lui, vont subir un profond changement d'orientation.

Le « rêve newtonien »

Les chimistes trouvent chez Newton deux concepts scientifiques fondamentaux, la masse et l'attraction à petite distance, avec lesquels ils vont tenter de progresser en recherchant les lois du mécanisme de la réaction chimique. C'est en quelque sorte la poursuite du « rêve newtonien ». L'attraction à petite distance est considérée comme la cause immédiate des affinités, donc la cause des réactions chimiques. Si, à partir de la deuxième moitié du XVIII^e s., les idées newtoniennes ont atteint le monde des chimistes dont certains vont adopter la conception des affinités-attractions, il existe une autre école de chimistes qui refusent délibérément ces conceptions. Néanmoins, l'attraction newtonienne refusée pour interpréter l'affinité chimique va se retrouver sous le nom de *Rapport* chez les chimistes antinewtoniens. Ces chimistes entendent par ce mot l'aptitude de certaines substances à s'unir chimiquement à certaines autres substances. Ils emploient cette notion d'affinité dans l'acception de concept qualitatif, comparatif et classificatoire qui est sous-jacent à la constitution des tables d'affinité.

On désigne sous le nom générique de *Tables d'affinité* toute une série de tentatives réalisées dans le but de consigner dans un tableau les connaissances concernant les résultats des réactions chimiques. La première table apparut en 1718, dans un mémoire du chimiste français Étienne-François Geoffroy. Bien que le mot affinité ne figure ni dans le titre ni dans le texte, le tableau doit être considéré comme le prototype d'une table d'affinité. Geoffroy eut l'idée de ranger en seize colonnes les substances, par ordre de la tendance à l'union les unes avec les autres, idée qui n'est pas nouvelle puisqu'on la trouve déjà en particulier chez Newton et chez Stahl. Le fondement empirique de la construction de la table est l'observation des réactions au cours desquelles une substance s'élimine par précipitation ou dégagement gazeux, en soulignant l'un des caractères essentiels de la tendance à l'union : sa sélectivité. Entre 1730 et 1790 les essais de classement des substances par ordre d'affinités se succédèrent, mais la table du savant suédois Torbern Olof Bergman, publiée en 1775, fut la plus renommée.

La seconde moitié du XVIII^e s. marque l'apogée du succès de l'affinité chimique autant comme terme que comme concept. La vogue de l'« affinité » est telle que les chimistes se sentent obligés d'employer le terme, le concept, et même de dresser ou reproduire une « table d'affinité ». Mais seuls ceux qui se rattachent à la tradition newtonienne tendent à construire une théorie cohérente avec l'espoir de pouvoir la quantifier. Bergman, newtonien convaincu, présenta ses idées sur les attractions chimiques ou affinités en 1775 dans une célèbre

dissertation. Ce texte révisé et augmenté fut traduit en français en 1778 sous le titre de *Traité des Affinités chimiques* et constitue une somme des connaissances du moment, classées et ordonnées. Le fondement de sa théorie est que l'ordre des affinités propres des substances est toujours constant, mais qu'il est souvent perturbé par des circonstances extérieures : la chaleur et l'eau qui sert de solvant. Le résultat de ses expériences le conduisit à donner une nouvelle table des affinités qui comprend 59 colonnes. Louis-Bernard Guyton de Morveau publia en 1786, dans l'*Encyclopédie Méthodique*, l'exposé le plus important de l'époque consacré aux affinités chimiques. L'article « Affinité » écrit par Guyton peut être considéré comme le dernier grand traité sur les affinités chimiques à la fin du XVIII^e s.

Les travaux de Claude-Louis Berthollet marquent un tournant décisif dans l'évolution du concept d'affinité conçu dans la perspective newtonienne. Il construisit une théorie générale de l'action chimique ambitieuse qui tenta de remplacer celle des affinités électives. Pour Berthollet, la concentration d'une substance dans le milieu réactionnel est un facteur capital de l'action chimique. Cette intervention de la quantité de substance réagissante, comme facteur qui peut renverser le sens d'une réaction, est un apport très important de Berthollet aux conceptions newtoniennes des affinités. La théorie proposée par Berthollet, publiée en 1803 dans le texte *Essai de Statique Chimique*, accorde un rôle prépondérant aux concentrations, ce qui est en contradiction avec le principe des affinités électives constantes. À ce sujet, Berthollet ruina définitivement les tables d'affinités en démontrant que les tableaux ne traduisaient pas les différences de degrés des affinités, mais les différences de solubilité ou volatilité des substances considérées.

Pendant les premières décennies du XIX^e s., le concept d'affinité s'intègre dans le mouvement de la « Naturphilosophie » allemande et anglo-saxonne qui stimule la recherche d'une unicité de force dans la nature. Dans cette perspective, la découverte de la pile électrique et celle des effets chimiques que le courant qu'elle débite peut produire, conduit des savants comme Humphry Davy, Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère et Michael Faraday à tenter d'identifier les forces électriques polaires et les forces chimiques pour expliquer à la fois la production du courant électrique par les piles et le mécanisme de l'action chimique au centre duquel ils placent l'affinité. Parallèlement, le système dualiste de Jons-Jacob Berzelius, fondé sur l'idée que chacune des particules qui composent tous les corps possède une polarité électrique — une partie de la particule est électrisée positivement et l'autre négativement —, propose de comprendre que l'inégale intensité de cette polarité constitue la cause de la différence d'intensité avec laquelle les substances exercent leurs affinités. On peut conclure qu'avec les chimistes physiciens, l'affinité chimique a atteint un sommet ; mais elle est restée encore un concept qualitatif.

La quantification de l'affinité

Après l'évanouissement du « rêve newtonien », dans les années 1810-1830, l'évolution du concept d'affinité est restée bloquée. Les tentatives des chimistes se heurtaient à un obstacle infranchissable : le passage du niveau microscopique, adopté dans l'hypothèse des interactions interparticulaires, au niveau macroscopique imposé par les mesures des variables bien définies. À partir de 1850 les chimistes sont prêts à abandonner l'interprétation des affinités par les forces interparticulaires pour des explications directement tirées des expériences. Le lien quantitatif déjà établi entre la chaleur dégagée par une réaction et l'intensité des affinités mises en jeu va pouvoir devenir une liaison quantitative. Ce changement traduit une tendance épistémologique profonde : la renonciation de la recherche des causes premières, donc du mécanisme réactionnel, pour s'attacher uniquement à la traduction immédiate des effets de l'affinité qui seuls sont observables. À l'origine de cette mutation, nous trouvons associés les efforts des expérimentateurs et ceux des théoriciens de la thermochimie tout juste née, en particulier le Danois Julius Thomsen, Marcelin Berthelot, Henri Sainte-Claire Deville et Léon Péan de Saint-Gilles. Dans les années 1864-1879, les savants norvégiens Cato-Maximilien Guldberg et Peter Waage, abandonnant les voies suivies par leurs prédécesseurs immédiats, s'associent pour tenter de déterminer les valeurs des affinités chimiques. Leur point de départ est la notion de « force d'affinité » qu'ils cherchent à exprimer en fonction des concentrations des réactifs et des vitesses de réaction qui opèrent dans un système chimique en équilibre. Ces travaux peuvent sembler un retour en arrière, par rapport au « rêve newtonien », néanmoins ils inaugurent un chapitre nouveau de la mécanique chimique.

Presque en même temps, l'Allemand Hermann von Helmholtz et l'Américain Josiah Willard Gibbs établissent que les conditions physicochimiques de l'équilibre peuvent être exprimées par une fonction d'état du système chimique en réaction. En particulier Gibbs introduit en 1876, à partir de cette fonction d'état, le concept de « potentiel chimique » pour fixer les conditions caractéristiques de l'équilibre chimique. Avec cette notion de potentiel chimique, diffusée et utilisée par Pierre Duhem, la tendance à l'union se trouve déjà mesurée par une grandeur thermodynamique qui préfigure la « grandeur affinité ». Il faudra attendre les années 1920 et les travaux du physicomathématicien belge Théophile de Donder, aidé de Pierre van Rysselberghe, pour arriver à une définition thermodynamique de la grandeur affinité.

► DUNCAN A.-M., *Laws and Order in Eighteenth-Century Chemistry*, Oxford, Clarendon Press, 1996. — GOUPIL M., *Du Flou au Clair ? Histoire de l'Affinité Chimique*, Paris, Éd. du CHS « Mémoires de la Section d'Histoire des Sciences et des Techniques », 1991. — GUYTON DE MORVEAU L.-B., « Affinité », *Encyclopédie Méthodique. Chimie, Pharmacie et Métallurgie*,

1789, 1, p. 535-612. — KIM M. G., « Affinity, that Elusive Dream. A Genealogy of the Chemical Revolution », The MIT Press, Cambridge, Mass., London, 2003. — LEVERE T.-H., *Affinity and Matter. Elements of Chemical Philosophy 1800-1865*, Oxford, Clarendon Press, 1971. — STENGERS I., « L'Affinité Ambiguë : Le Rêve Newtonien de la Chimie du XVIII^e Siècle », in SERRES M. dir., *Éléments d'Histoire des Sciences*, Paris, Bordas, 1989, p. 297-319.

Pere GRAM

→ Classification (CHIMIE) ; Electrochimie ; Valence.

AGRONOMIE

Le terme agronomie a actuellement deux acceptions, un sens large (dont il est question ici) et un sens restreint. Au sens large, il désigne un vaste domaine qui réunit l'ensemble des études scientifiques et techniques s'intéressant à la production et à la valorisation agricoles. Au sens restreint, il désigne une discipline liant plantes cultivées, techniques culturales, sol et climat. Une longue histoire des techniques, des savoirs et pratiques paysannes précède et accompagne les théories savantes et l'agronomie qui les intègre dans leurs argumentaires et dans leurs propositions. Une théorie sur la fertilité des sols devra prendre en compte le rôle de la charrue. L'intitulé de quelques unités logistiques ou de programmes de recherche interne exprime la très grande diversité du vaste complexe technico-scientifique que l'agronomie représente : sélection porcine, sériciculture, vecteurs rétroviraux, bioclimatologie, rhéologie du bois, arômes alimentaires, études économiques sur les industries agricoles et alimentaires, cryocomportement des cellules animales, technologie des anti-corps monoclonaux, écosystèmes forestiers, phénomène de stress en élevage, biométrie, système locomoteur de la dinde, analyse du génome du blé, carte pédologique, etc. À la lecture de la petite liste ci-dessus, on peut être tenté de considérer l'agronomie comme un terme commode désignant l'ensemble des disciplines ou sous-disciplines scientifiques liées à l'exploitation de la matière vivante. On peut au contraire insister sur le fait que cet ensemble constitue un champ disciplinaire original par ses caractéristiques contextuelles, épistémologiques, idéologiques, institutionnelles, déterminant en partie ses questions, ses méthodes et ses résultats.

Les débats contradictoires depuis le XVIII^e s. pour tenter de définir ce terme d'agronomie (ou un concurrent) et ce qu'il représente ont mené à des choix différents, sur les stratégies en matière d'enseignement, de recherche, de contrôle et de vulgarisation agricole. Le mot ne s'est imposé en français qu'à partir de la fin de la première moitié du XIX^e s. lorsqu'une législation a créé, en précisant leurs rôles, les institutions agronomiques, définissant ainsi ceux de l'agronome. Dans plusieurs langues, notamment en espagnol et en anglais, il a obtenu le même succès. En revanche, en allemand, on

a *Landwirtschaftskunde* (« science de l'économie rurale »). Aujourd'hui les termes *agriculture sciences* dominant dans les pays anglophones pour exprimer l'agronomie au sens large, *agronomy* étant conservé pour le sens restreint. En espagnol, on trouve aussi parfois, selon les pays, *ciencias agropecuarias*. Le terme agronome apparaît en 1760 (agronomie en 1761) mais d'autres alors continuent à être plus utilisés, « agriculteur » (*agriculturist* en anglais) et « œconome », pour désigner ces auteurs qui cherchent à utiliser la science pour améliorer l'agriculture. Certains considèrent que ce nouveau domaine de connaissance savante appelé généralement « agriculture » n'est que la simple application d'une science à laquelle elle appartient totalement, tels Francis Homes (1757) ou Fourcroy (1782, 1792) qui pensent à la chimie, ou bien tels Daubenton (1751) ou Domingos Vandelli (1770) qui pensent à la botanique. D'autres, tel Wallerius (1761) qui lie ensemble « économie », « agriculture » et « chimie », cherchent une discipline globalisante. D'autres encore, tel l'abbé Tessier (1802), considèrent l'« agriculture » ou l'« agronomie » comme un domaine théorique et technique particulier induit à partir des pratiques agricoles à la façon dont l'architecture prend ses origines dans « les métiers de charpentier et de maçon. » Pour d'autres enfin, tel Desplaces (1772), aucune science de l'agriculture n'est possible, tout « code général de l'agriculture » est une chimère car les exceptions et les combinaisons « décident du bien, du mieux ou du mal ».

À chaque fois que l'on discute sur la nécessité d'un enseignement agricole, ce type de débat s'engage. Ainsi, Carrasquilla, directeur du Departamento de Agricultura de Colombie, lors de la création de l'Instituto Nacional de Agricultura, écrit en 1881 que la science pratiquée par l'agronome consiste à prendre appui sur les sciences naturelles au sens large pour expliquer et généraliser les nombreux faits isolés de la pratique agricole afin de faire connaître les résultats favorables et les appliquer dans d'autres situations et à d'autres productions. Derrière ces débats et ces définitions on devine plusieurs questions sous-jacentes : qui choisit les problèmes à résoudre (les responsables politiques, les scientifiques, les paysans, etc.), où et comment doit-on chercher les réponses (dans les lois, les champs, la ferme, les laboratoires, les marchés, etc.), quelles disciplines enseigner aux futurs agronomes ? À différents moments on a ainsi insisté sur l'aspect transfert des connaissances ou recueil des savoirs dont devait être chargé l'agronome, ou bien rencontre et échange entre deux savoirs liés à deux logiques, agronomiques et paysannes. Ces dernières décennies, ces oppositions ont nourri plusieurs débats ayant trait au développement des pays du Sud. Certains aujourd'hui présentent l'agronomie comme une écologie appliquée, ou bien, à l'heure de la biologie moléculaire et des biotechnologies, comme une maille d'un réseau de recherche-développement s'intéressant au vivant et intégrant, outre la recherche agronomique, notamment la recherche médicale.

L'émergence de l'agronomie

Alletz propose, en 1760, le terme « d'agronome » pour désigner un nouveau type de personnage, apparu dans les années 1730-1740, qui s'intéresse d'une manière scientifique à l'agriculture. Ce n'est généralement pas un savant mais une personne dont le métier ou la fonction est lié à l'agriculture. Il se propose d'analyser et d'améliorer quantitativement et qualitativement l'agriculture en utilisant les connaissances et les méthodes de la science. Cette ambition est liée à un contexte idéologique favorable : d'abord l'engouement général pour l'agriculture sous l'influence des thèses économiques physiocratiques ; ensuite le courant utilitariste en œuvre dans l'ensemble de la société qui s'exprime en particulier autour du projet des dictionnaires des arts et métiers sous la direction notamment de Duhamel du Monceau ; enfin le courant scientifique en faveur du choix des méthodes et des connaissances de la science moderne définie alors par la primauté de l'observation et de l'expérience. Il faut ajouter que cet intérêt pour l'amélioration de l'agriculture accompagne un mouvement général d'acculturation et d'alphabétisation des campagnes. Ces personnalités, qui proposent d'utiliser la science pour améliorer l'agriculture, commencent par s'exprimer dans des périodes de vulgarisation relativement grande. On les retrouve ensuite dans les différentes « Sociétés d'agriculture et d'économie » de la première génération (entre 1760 et 1780) qui éclosent un peu partout en Europe : la première société à Dublin en 1751, l'Academia dei Georgofili à Florence en 1753, la première en France à Rennes en 1757, la Société économique de Berne en 1759, etc. Ces différentes sociétés échangent mémoires, ouvrages, parfois semences. Elles en reçoivent aussi des personnalités individuelles. De nombreuses expériences se mettent en place dans les champs essentiellement pour l'étude des maladies des plantes et de la préparation des semences, de la « nouvelle culture » (semis en ligne et à faible densité) préconisée par Tull (1733), de nouveaux matériaux agricoles (semoir, charrue) et de la conservation des blés. Ce travail en plein champ (ou dans la grange), observations et expériences, est revendiqué comme un signe d'appartenance à cette communauté nouvelle. Il permet de se démarquer à la fois des chimistes et des naturalistes. Delille évoque cet engouement pour l'amélioration de l'agriculture par la science : « Cette matière est devenue l'objet d'une foule de livres, de recherches et d'expériences. Dans toutes les parties du Royaume, je vois s'élever des Sociétés d'Agriculture. On a imaginé de nouvelles façons de labourer et de semer. Plusieurs Citoyens ont eu la générosité de sacrifier des arpents de terre et des années de récolte à des essais sur l'économie rurale » (Delille, *Les Géorgiques*, Paris, C. Bleuet, 1770).

Le début des années 1780 voit une nouvelle génération de Sociétés caractérisée par une part plus grande prise par des auteurs savants qui participent de plus en plus aux débats sur les moyens d'améliorer

l'agriculture. Ce sont des chimistes puis des naturalistes et quelques médecins qui rejoignent ainsi la communauté des « savants agriculteurs ». Pendant la période révolutionnaire, on cherche à créer une « société libre d'agriculture » dans chaque département. Le phénomène se généralise alors à travers l'Europe et le monde sous influence européenne. À la fin du XVIII^e s. ainsi en Espagne, puis dans ses territoires d'Amérique, se créent les *Sociedades Económicas de Amigos del País*. Immédiatement après l'indépendance, des *Agricultural Societies* commencent à apparaître aux États-Unis. George Washington et Benjamin Franklin sont membres de la *Philadelphia Society for the Promotion of Agriculture* créée en 1785.

L'organisation et l'institutionnalisation

Dès les années 1750 on cherche le moyen de diffuser les propositions techniques des « savants en agriculture ». On compte d'abord sur l'imitation par les cultivateurs proches des lieux d'essais. Certaines personnalités proposent des prix pour récompenser les meilleurs cultivateurs, organisent des veillées autour de lectures ou proposent de faire appel aux pasteurs ou aux curés. Des *Instructions* issues des pouvoirs centraux sont diffusées. Quelques tentatives d'enseignement agricole échouent en France mais une école vétérinaire est créée à Lyon en 1761 et une à Alfort en 1765.

Au XIX^e s., surtout à la suite de la création du ministère de l'Agriculture (1839 en France), ou de son équivalent (comme le Department of Agriculture américain en 1862) l'institutionnalisation s'accélère. Dans certains pays, comme en Allemagne, il faut ajouter le développement de l'aide privée provenant d'industries liées à l'agriculture. Le domaine de l'agronomie se précise alors par la mise en place d'organismes d'enseignement, de contrôle et d'analyse. On voit d'abord éclore, essentiellement sous l'effet d'initiatives privées, des « fermes-écoles », pour recevoir les fils d'exploitants, qui lient étroitement formation théorique et travaux pratiques et qui se proposent comme modèle aux agriculteurs locaux. Ce sont aussi des fermes expérimentales et on y trouve des champs d'essai, parfois des fabriques de machines. Parmi les plus célèbres citons les établissements fondés en Suisse par Fellemberg à Hoffwyll en 1799, en Allemagne par Thaër à Celle la même année, à Roville près de Nancy par Mathieu de Dombasle en 1821, en Toscane par Ridolfi à Meleto en 1834. Quelques tentatives de développement d'une formation supérieure voient le jour. Dès 1797 Festetic fonde à Keszthely en Hongrie le *Georgikon*, comprenant huit « instituts » dont une « école agricole scientifique », une de formation de « fermiers », une de « juristes », une de « jardiniers », une de « ingénieurs et architectes », etc. En 1790, l'université d'Édimbourg, en 1796, celle d'Oxford, accueillent des *faculties of Agriculture*. En 1806, une chaire d'agriculture est créée à l'École vétérinaire d'Alfort.

En 1821, ouvre le Gardiner Lyceum à Gardiner aux États-Unis d'Amérique. En 1839, commence un cours d'agriculture au Conservatoire national des arts et métiers. En 1848, une instruction ministérielle organise l'enseignement agricole en France, pris en charge par l'État et fondé sur trois degrés d'enseignement (l'Institut national agronomique à Versailles, supprimé en 1852 puis recréé à Paris en 1876, les écoles régionales et les fermes-écoles dans chaque département). En 1879, une loi prévoit la mise en place d'une chaire d'agriculture dans chaque département dont le titulaire est notamment chargé de cours pour les futurs instituteurs et tenu d'apporter une formation aux agriculteurs. En Espagne, le pouvoir central crée, en 1855, l'Escuela central de Agricultura qui deviendra, en 1876, l'Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. En Allemagne, notamment sous l'influence de Liebig, l'enseignement supérieur en agriculture s'installe essentiellement dans les universités. En 1862 est ainsi fondée la chaire d'agriculture de l'université de Hall, suivie par plusieurs créations. Aux États-Unis d'Amérique, le *Land Grant Act* (1862) organise l'établissement d'un collège dans chaque État pour l'étude des « arts agricoles et mécaniques ». Auparavant quelques États avaient déjà fondé leur école, telle la *Farmers' High School* de Pennsylvanie en 1855. L'Escuela Nacional de Agricultura de Chapingo au Mexique (1850) et l'Escola agronómica de Bahia (1877) sont les premiers enseignements supérieurs créés en Amérique latine. Ces différents lieux d'enseignement, depuis les fermes-écoles jusqu'aux universités supérieures, sont autant de lieux où se développent, sur des parcelles de terrain, dans des ateliers ou des laboratoires, les recherches sur des questions liées à l'agriculture (fertilité des sols, nutrition des plantes, action des engrais organiques et minéraux, nouvelles variétés ou espèces, nouveaux systèmes d'assolement et de rotation, nouvelles machines pour semer et labourer, etc.).

Après l'éducation, les pouvoirs publics tentent d'organiser ce qui finit par être désigné sous les termes génériques de « station expérimentale ». Citons les exemples de la France et des États-Unis d'Amérique. En 1868, un arrêté ministériel, suivi d'autres, détermine en France les conditions d'organisation des « stations agronomie ». Celles-ci sont des établissements destinés « aux analyses chimiques sur les végétaux, les terres, les eaux, les engrais » ainsi « qu'aux expériences de physiologie végétale ou de zoologie et de zootechnie ». Outre des travaux de recherche, en relation avec les conditions de leur « circonscription », les stations ont une fonction de lutte contre les fraudes. En 1885, un arrêté ministériel crée le Comité consultatif des stations agronomiques et des laboratoires agricoles chargé du suivi et de la coordination des recherches. En 1911, il existe 90 stations et laboratoires répartis entre plusieurs disciplines : agronomie, œnologie, phytopathologie, entomologie, physiologie végétale, pisciculture fluviale et marine, essais de semences, etc. En 1921 est fondé l'Institut des recherches agronomiques, supprimé en 1934 mais recréé en 1946 sous la forme de

l'Institut national de la recherche agronomique (INRA). L'Institut de 1921 et celui de 1946 administrent l'ensemble des stations et laboratoires de recherches dont certains sont rassemblés en centres régionaux. Aux États-Unis d'Amérique, le *Hatch Act* (1887) et le *Morrill Act* (1890) prévoient l'installation d'une Agricultural experiment station auprès de chaque collège issu du *Land Grant Act* et l'organisation de l'ensemble des stations américaines. Entre 1875 et 1885, 16 États américains accueillent une station définie par la loi, 13 autres ont des collèges pratiquant des recherches en laboratoire ou en parcelles expérimentales. Au début du XX^e s., l'ensemble des États ont une station et un Comité national des directions des stations expérimentales puis un Bureau des stations expérimentales sont mis en place. En 1932, le Congrès autorise la construction de 4 grandes stations de recherche et 9 stations régionales spécialisées : plantes, prairies, soja, porc, mouton, volaille, maladies animales, sols, nutrition. En 1942, est créée l'Agricultural Research Administration chargée de coordonner l'ensemble des recherches. Un centre de recherche fédéral du Département américain d'agriculture est installé à Beltsville, dans le Maryland. Dans les dernières années du XIX^e s., des rencontres internationales sont organisées (congrès international des directeurs de stations agronomiques, conférence internationale d'agriculture, etc.) qui aboutissent, en 1905, à la création d'un Institut international d'agriculture à Rome, à l'origine de la Food and Agriculture Organisation après la Seconde Guerre mondiale. À la suite des épidémies que subissent différentes cultures, une réglementation internationale organise les échanges agricoles ainsi que la recherche agronomique et son application au niveau international. C'est le cas notamment de la première Convention sur le phylloxera signée par cinq pays à Berne en 1881. C'est aussi le cas de la Convention phytopathologique internationale, établie en février 1914 lors d'une conférence à Rome réunissant une trentaine de pays, qui engage les États signataires à créer un Service de phytopathologie chargé de recherches scientifiques et techniques. Tout au long du XX^e s., des organismes de recherche sont mis en place dans les pays du Sud, pour une grande part à l'initiative des puissances coloniales. Différentes communautés de scientifiques s'organisent au sein de l'agronomie, notamment par l'intermédiaire de revues et de rencontres internationales : généticiens des animaux d'élevage, phytopathologistes des plantes cultivées, spécialistes du coton, du maïs, de la maîtrise de l'eau, etc. Plusieurs pays, essentiellement dans le dernier quart du XX^e s., tentent de coordonner leurs recherches. C'est l'objectif d'Euragri regroupant les directions des principaux organismes de recherche européens ou de la Conférence annuelle tétrapartite de recherche agronomique regroupant les responsables de la recherche américaine, anglaise, canadienne et française. De nombreux contacts, projets et contrats bilatéraux sont mis en place. L'Institut national de la recherche agronomique français établit ainsi des liens réguliers avec par exemple l'Instituto nacional de investigación agropemaria du Chili, la

Chinese Academy of Agriculture ou le Conseil suédois de la recherche agronomique.

Malgré les ressemblances, des différences importantes existent entre les pays à différentes époques, notamment dans les relations entre la recherche et la vulgarisation, organisées dans les mêmes lieux aux États-Unis d'Amérique, séparées en France dans des instituts différents ; dans les relations entre recherches et industries liées à l'agriculture, proches dans les universités allemandes dès le XIX^e s. et dans les collèges et les stations des États aux États-Unis d'Amérique au XX^e s., relativement faibles dans les organismes français jusque dans les années 1960. Au côté de la recherche publique (stations, laboratoires universitaires, instituts, etc.), parfois en liaison avec elle, se construit en effet dès le début du XIX^e s. une recherche dans le cadre d'entreprises privées. Au départ, il s'agit de simples ateliers de machines, pépinières, boutique d'apothicaire, fermes de semences, etc., qui, dans le courant du XIX^e s., aboutissent à des entreprises plus ou moins importantes d'engrais, de pesticides, de machinisme, de sélectionneurs de semences, etc. ; entreprises dont le développement et l'importance en agriculture s'intensifieront au XX^e s. jusqu'à jouer un rôle majeur dans la seconde moitié. Il faut aussi ajouter la recherche avant tout appliquée, organisée par la profession agricole elle-même essentiellement dans le cadre de coopératives, qui prend une grande ampleur à partir des années 1960.

Thèmes et objectifs de recherche

Deux grandes périodes semblent marquer l'histoire de la recherche agronomique. La première commence avec les « essais sur l'économie rurale » du XVIII^e s. et s'achève dans les années 1960-1970. Elle correspond à la volonté d'améliorer et de développer la production et la transformation des produits agricoles. Sans que cela soit nécessairement une conséquence univoque de la recherche, la surproduction constatée pour la plupart des produits de l'agriculture marque dans les années 1960-1970 une limite aux ambitions originales. La seconde période, qui débute dans les années 1970-1980, élargit les objectifs et les moyens pour obéir à des priorités déterminées par un nouveau contexte, à savoir en effet la surproduction, la mondialisation accrue des marchés, l'expansion de la biologie moléculaire, l'arrivée des biotechnologies, l'accroissement des agroindustries, le développement de la sensibilité pour la protection de l'environnement et de l'exigence, en qualité et en diversité, du consommateur. Ce nouveau contexte, d'une certaine manière, redonne un souffle à la recherche agronomique. Parallèlement, dans les pays du Sud, se développe, à partir des années 1960, une forte remise en cause du modèle de développement fondé sur la recherche et la vulgarisation importé du Nord.

Aux XVIII^e et XIX^e s., l'objectif des études, même si certains imaginent qu'il est envisageable d'aller plus loin, est d'éviter les accidents et d'obtenir une relative

constance du niveau des productions sur l'exploitation et une extension des zones cultivées (prise sur les marais, les landes, etc.). Dès le XVIII^e s. sont mises au point des méthodes de préparation des semences de blés à base de chaux puis de sulfate de cuivre, permettant de les protéger contre la maladie de la carie. Plusieurs produits anti-fongiques apparaissent ou se généralisent au cours du XIX^e s. notamment le soufre sous différentes formes et la bouillie bordelaise proposée par Millardet en 1882 contre la maladie de la vigne. Tout au long du XIX^e s., plusieurs agents phytopathogènes ont été identifiés par des botanistes, notamment dans les années 1860 *Phytophthora infestans*, champignon microscopique responsable de la maladie de la pomme de terre par de Bary. Au début du XIX^e s., plusieurs travaux tournent autour des échanges chimiques entre la plante et l'air, entre la plante et le sol. Ils aboutissent à l'idée que l'azote des plantes provient du sol. On cherche ensuite à préciser les cycles des principaux éléments fertilisants. Dans les années 1810-1830 s'impose la théorie de l'humus de Thaer selon laquelle les plantes absorberaient directement la matière vivante en décomposition, puis dans les années 1840, celle de Liebig selon laquelle les végétaux se nourrissent de substances minérales. De nombreux travaux portent sur la nature et l'évolution des terres agricoles. Les influences qui les modifient et qui aboutissent dans les années 1880 à la classification des sols de Dokouchaev. Dans les décennies qui suivent, des méthodes d'analyse de terre sont précisées (granulométrie, calcimétrie, dosage des éléments fertilisants) et le rôle des oligo-éléments est mis en évidence, notamment par Gabriel Bertrand. Dès le XVIII^e s., des méthodes de sélection des plantes sont élaborées par des savants et des jardiniers. Par exemple, une sélection morphologique à partir de betterave fourragère (Marggraf, 1747, et Delessert, en 1801) aboutit à une betterave à teneur en sucre supérieure (passage de 5,5 % à 7,5 %). Au XIX^e s., la famille Vilmorin propose d'autres méthodes de sélection de la betterave sucrière fondée sur la densité qui aboutit à des teneurs de l'ordre de 18 %.

Le XX^e s. voit l'intensification des recherches précédentes, notamment en matière d'identification des agents phytopathogènes, de sélection de variétés, de contrôle des maladies ou des insectes parasites par la voie chimique ou biologique, d'étude du rôle des oligo-éléments. On envisage désormais, jusque dans les années 1970, une augmentation régulière du niveau de production. Le premier agent bactérien de maladie est identifié à la fin des années 1870 (le feu bactérien du poisier par Burrill). Dans les années 1930, après plusieurs travaux cherchant à isoler une protéine responsable, un « virus » (nom donné à l'agent causal recherché), celui de la mosaïque du tabac, est identifié comme une nucléoprotéine (Bawden et Pirie). Les besoins en éléments fertilisants sont précisés par espèce végétale cultivée. L'industrie chimique propose des engrais et des pesticides de plus en plus sophistiqués, cherchant sans cesse pour ces derniers à

contourner les problèmes de résistance qu'ils provoquent. Tout au long du XX^e s., on cherche à préciser les fonctionnements biologique, chimique et hydrique. Les recherches en bioclimatologie définissent notamment les zones géographiques des espèces et les facteurs intervenant au cours de la végétation sur le rendement. En 1909, Shull découvre, lors de recherche sur l'hérédité quantitative utilisant le maïs, la technique des hybrides simples utilisée pour la sélection de cette plante allogame, suivie en 1919 par celle des hybrides doubles mise au point par Jones. Ces méthodes ont permis, essentiellement aux États-Unis d'Amérique dans la première moitié du siècle, l'obtention de variétés à haut rendement puis de variétés présentant d'autres différents caractères : résistance à la verse, à des insectes, des maladies, etc. Dans les années 1950, la recherche française a sélectionné des lignées permettant la création de maïs précoces éliminant les variétés précoces américaines, ce qui a permis une extension de la culture au nord de la France et dans de nombreuses autres contrées dans le monde. De nombreuses autres plantes sont améliorées, autogames ou allogames, sur différents critères (résistance au froid, à la verse, à la sécheresse, à des maladies, aux herbicides, meilleure qualité meunière et boulangère, etc.). Dans la seconde moitié du siècle, la sélection bénéficie de nouvelles méthodes issues de la biochimie et de la biologie moléculaire : androgénèse, stérilité mâle cytoplasmique, culture de méristème, fusion de protoplastes, génétique et sélection des facteurs cytoplasmiques, fécondation végétale *in vitro*, plantes transgéniques, etc. La sélection animale est traditionnellement fondée empiriquement sur l'aspect et les qualités des ascendants. Au cours du XX^e s., dans le cadre de l'agronomie s'est développée une sélection sur de nombreuses espèces (des bovins aux abeilles), sur différents critères (quantité de lait, de miel, matières grasses et azotées du lait, viande, production de jumeaux, etc.), fondée sur les descendants et les collatéraux. De nouvelles techniques, dans la seconde moitié du siècle, ont permis d'agir plus rapidement et d'obtenir de nouvelles performances : insémination artificielle, à partir des années 1950 (du cheval à la poule), fécondation *in vitro* à partir des années 1960 (des lapins aux chevaux), sexage et clonage embryonnaires à partir du début des années 1990 (de l'agneau à la truite), animaux transgéniques dans les années suivantes (lapin pour la production d' α -antitrypsine, protéine déficiente chez certaines personnes). Les travaux sur les sols s'intéressent, à partir des années 1960, à la maîtrise des transferts chimiques pour des raisons de protection de l'environnement, notamment des nappes phréatiques.

Lieu de développement des sciences du vivant

Recherches à visée agricole ou ayant pour objet la compréhension du vivant ou encore d'autres objectifs notamment médicaux sont généralement étroitement

liées. Les méthodes de fécondation artificielle pour la sélection bovine sont à l'origine de ces mêmes techniques chez l'homme. Les études sur l'hérédité qualitative et quantitative dans le cadre des débats sur le transformisme et le darwinisme ont abouti à des méthodes de sélection végétale ou animale. Les techniques de manipulation cytologique utilisées dans l'amélioration végétale (stérilité mâle cytoplasmique, fusion cytoplasmique, etc.) et les recherches sur les maladies virales et bactériennes des plantes (virus de la mosaïque du tabac, plasmide de l'agent bactérien de tumeurs sur pêcher, etc.) ont contribué à la construction de la biologie moléculaire. L'agronomie a permis le développement de connaissances théoriques variées telles que celles, par exemple, sur la transmission des caractères héréditaires, la mutagenèse, le déterminisme de la diversité des populations, les physiopathologies animale et végétale, l'alimentation minérale des plantes, l'anatomie et le cycle des champignons des sols, etc. Les exemples de « découvertes » notamment récentes dans le cadre de l'agronomie sont nombreuses et diverses : rôle antigénique d'une des protéines de structure du virus de la fièvre aphteuse, nature lipo-oligosaccharide du « signal symbiotique » produit par la bactérie responsable de la fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses, détermination des seuils de résistance du matériel biologique aux accidents climatiques, mécanisme d'action des antibiotiques en alimentation animale, lien entre alimentation et cycle de reproduction, théorie synthétique sur l'évolution et la place de l'agriculture dans les économies développées, etc.

L'agronomie s'est développée dans le rapprochement de divers groupes appartenant à des traditions et des formations différentes autour de l'amélioration de l'agriculture : gestionnaires, économistes, sociologues, chimistes, naturalistes, hybridateurs, géologues, biochimistes, écologues, nutritionnistes, biologistes moléculaires, etc. Elle a été un lieu d'épanouissement de nouvelles professions et disciplines telles que les sciences vétérinaires, la phytopathologie, les sciences piscicoles, les biotechnologies, etc., et a largement contribué au développement des sciences du vivant au XX^e s. L'agronomie a émergé au tout début de l'industrialisation à un moment où la ruralité était presque tout. Ses objectifs étaient l'enrichissement des pays et de leurs habitants mais elle n'a pu empêcher l'exode rural massif, comme certains politiques l'espéraient dans les années 1870 ; les historiens pensent plutôt qu'elle l'a au moins accompagné sinon provoqué. Les très hauts niveaux de production atteints dans les pays développés permettent aujourd'hui à une poignée d'agriculteurs d'y nourrir les populations et de fournir en matières premières les entreprises agro-alimentaires et autres agro-industries. Certes la recherche agronomique ne fut pas le seul facteur du changement dans les campagnes, mais il suffit d'observer chaque geste, chaque décision de l'agri-

culteur et d'en étudier leur origine pour constater l'omniprésence et l'importance de celle-ci.

Depuis les années 1980, l'augmentation de la productivité agricole n'est plus généralement un des objectifs prioritaires de la recherche agronomique dans les pays développés. On se tourne vers les industries de transformation des produits agricoles, la protection de l'environnement et de la santé et les demandes en qualité et en diversité des consommateurs. Les priorités s'orientent vers deux pôles, le niveau d'échelles très fines, cellulaires ou moléculaires, et le niveau d'organisation plus élevé, populations végétales, écosystèmes et agrosystèmes. A nouveau se pose le sens du terme agronomie. S'agit-il d'un terme commode qui tendra à disparaître à partir du moment où les divers secteurs mobilisés autour de la productivité agricole peuvent se rassembler différemment, avec d'autres, autour de deux préoccupations croissantes : la gestion de l'environnement d'une part et la maîtrise de la matière vivante pour la production quantitative et qualitative et comme matière première industrielle d'autre part ; l'agronome devenant gestionnaire de l'espace rural ou « ingénieur biotechnologiste » ? Ou bien le contexte rural et para-rural (ses traditions, son histoire, ses institutions, sa façon de poser et de résoudre les questions, etc.) restera déterminant pour identifier et maintenir l'agronomie.

- BOULAIN J., *Histoire de l'agronomie en France*, Paris, Tec et Doc/Lavoisier, 1992. — BOURDE A., *Agronomie et agronomes en France au XVIII^e siècle*, Paris, SEVPEN, 1967. — BUSCH L., LACY W., BURKHARDT J. & LACY L., *Plants, Power and Profit : Social, Economic, and Ethical Consequences of the New Biotechnologies*, Cambridge (Mass.), Blackwell, 1991. — CHARMASSON T., LELORRAIN A. & RIPA A., *L'enseignement agricole et vétérinaire de la Révolution à la Libération*, Paris, Institut national de la recherche pédagogique/éd. de la Sorbonne, 1992. — DENIS G., « Préambule à une histoire de l'agronomie française », *Bulletin d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie*, vol. 2, n° 2, Strasbourg, Société d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie, 1996. — FITZGERALD D., « Mastering Nature and Yeoman, Agriculture Science in the Twentieth Century », in PESTRE D. & KRIDGE J., *Science in the Twentieth Century*, Harwood, Academy Publ., 1997. — MARCUS A., *Agricultural Science and the Quest for Legitimacy : Farmers, Agricultural Colleges, and Experiment Stations, 1870-1920*, Ames, Iowa State Univ. Press, 1985. — RESTREPO O., ARBOLEDA L. & BEJARANO J., *Historia natural y ciencias agropecuarias*, Bogota, Teicor Mundo Ed., 1993. — SÉBILLOTTE M., « Agronomie et agriculture, essai d'analyse des tâches de l'agronome », *Cahiers ORSTOM*, série Biol., n° 24, Paris, ORSTOM, 1974. — SIGAUT F., « Histoire rurale et sciences agronomiques, un cadre général de réflexion », *Histoire et sociétés rurales*, n° 3, 1^{er} sem. 1995, Rennes, Univ. de Rennes 2, 1995. — TESSIER H., « Extrait Des Opinions et Discours prononcés au Tribunal, relativement à l'Agriculture », *Annales de l'Agriculture française*, t. XII, Paris, Huzard, An X, p. 184-216. — Coll. : Académie d'agriculture de France, *Deux siècles de progrès pour l'agriculture et l'alimentation (1789-1989)*, Paris, Lavoisier, 1990.

Gilles DENIS

→ Biotechnologies ; Lyssenkisme ; Nature (Système de la).

ALCHIMIE

D'origine extrême-orientale (Chine) et orientale (Inde), l'alchimie est un corpus de doctrines et de pratiques relatives, d'une part, à la transmutation des métaux vils en or (chrysopée), d'autre part, à la recherche d'une drogue dont l'ingestion assurerait l'immortalité (panacée). Elle connut un grand développement, vers les débuts de notre ère, en Égypte et en Grèce, en liaison avec les philosophies néoplatoniciennes. Les principaux textes témoignant de cette alchimie alexandrine sont des papyrus conservés à Leyde, pour l'un, à Stockholm, pour l'autre.

Après un hiatus de plusieurs siècles durant le haut Moyen Âge, ou tout au moins d'une quasi totale absence de documentation, les alchimistes arabes, surtout à l'époque faste du califat de Bagdad (Jabir, souvent orthographié Geber, est le plus connu), prirent le relais, à la fois pour la transmission des textes grecs de l'Antiquité et pour l'avancement du savoir alchimique.

L'alchimie médiévale fut d'abord en Europe occidentale une avancée et une excroissance de l'alchimie arabe : la péninsule ibérique, l'Andalousie en particulier, servit d'interface à sa diffusion. Puis la traduction de manuscrits arabes en latin par Robert de Chester, et bien d'autres, inaugura au XI^e s. une alchimie occidentale d'abord l'apanage de moines, au premier rang desquels on doit citer Roger Bacon.

Le XIV^e s. connut — à nouveau autant qu'on peut en juger par les manuscrits survivants — l'apogée de cette alchimie médiévale, dont l'un des grands succès, pratique et théorique à la fois, fut l'extraction alcoolique des principes actifs des plantes, venant compléter la distillation dans la quête de l'évasive quintessence. À la Renaissance, les humanistes érudits de la cour des Médicis, à Florence, Pic de la Mirandole et Marsile Ficin entre autres, redécouvraient avec exaltation, traduisaient et publiaient les écrits hermétiques, attribués légendairement à Hermès Trismégiste.

Après le Moyen Âge dominé, pour l'alchimie comme pour d'autres disciplines intellectuelles, par l'aristotélisme, ces publications s'inscrivirent dans un regain du néoplatonisme. Au XVI^e s., l'alchimie participa de l'ébullition intellectuelle et connut des visages très divers : tantôt associée au mysticisme, en Rhénanie en particulier, tantôt sous la protection de princes au mécénat pas toujours désintéressé, l'alchimie fut aussi liée à divers occultismes et avec des associations secrètes comme celle des Rose-Croix.

Au XVII^e s., l'alchimie conserve un visage multiple. L'alchimie spirituelle coexiste avec une alchimie matérielle, l'une et l'autre se donnant comme des entreprises rationnelles, pour l'une de souveraineté sur l'homme intérieur, pour l'autre d'élucidation de la nature. La chimie naît à la même époque, des traités tels que le *Tyrocinium chymicum* de Jean Béguin en témoignent. Plus d'un siècle durant, jusqu'à l'âge des Lumières, rédaction de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert y compris, alchimie et chimie coexistent pacifiquement il semblerait.

On peut dater leur rupture et l'acte officiel de décès de l'alchimie comme savoir rationnel, ayant une respectabilité presque académique et considérée en tout état de cause au titre d'un artisanat comme les autres, de la nouvelle nomenclature chimique publiée dans les années 1780 par Fourcroy, Guyton de Morveau et Lavoisier. Celle-ci mit un terme à la profusion lexicale caractéristique de l'alchimie, qui obstruait l'identification d'un signifié unique au travers d'une multitude baroque de signifiants. Dorénavant, la science chimique se veut (et se sait) autonome de l'alchimie : elle s'est donné un programme propre d'isolement et d'identification des substances, ainsi que d'investigation de la réactivité mutuelle des éléments et des composés chimiques pour former de nouveaux produits. Désormais, l'alchimie se laissera glisser au seul statut d'une science occulte réservée à des initiés.

La doctrine

La doctrine alchimique, telle qu'elle se perpétue à peu près intacte durant deux millénaires, voit la Terre comme un organisme, au sein duquel les métaux germent et croissent à l'instar des végétaux. Ils sont ensemble par les astres correspondants (l'or par le Soleil, l'argent par la Lune, le cuivre par Vénus, etc.) et leurs effluves. S'ensuit une longue période de maturation dans le sol, au bout de laquelle les cinq métaux imparfaits (fer, cuivre, étain, plomb, mercure) se transforment en métaux parfaits (argent et or). Le but de l'alchimie est d'accélérer au laboratoire cette lente maturation des métaux. Cela s'effectue en principe par la projection, sur la matière métallique à transformer, d'un opérateur puissant, la Pierre des Philosophes, sous l'influence d'une chaleur douce. Ladite pierre est l'une des variantes d'une Médecine universelle, l'Élixir ou Panacée. À la fin du XVI^e s., sous l'influence durable de Paracelse, cette préoccupation thérapeutique de l'alchimie prend le pas sur la visée métallurgique.

Le laboratoire

Les alchimies grecque et égyptienne de l'Antiquité ont laissé des recueils de recettes : pour fabriquer des pigments, altérer l'aspect d'un métal par une « teinture » et le faire passer pour de l'or (aurification), contrefaire d'autres métaux, voire tenter de transformer un autre métal en or (aurifaction). Ces pratiques, parfois frauduleuses, s'accompagnaient de raisonnements sur la constitution de la matière. Des siècles durant, jusqu'à la Renaissance et au-delà, cette argumentation empruntait l'essentiel de ses concepts à Aristote, à sa théorie des quatre éléments (air, terre, eau, feu) et des quatre qualités (sec, humide, chaud, froid).

Le dualisme théorie-pratique est présent dans de nombreux textes antérieurs au X^e s., avec un sens du mot « théorie » différent du nôtre, se rapportant davantage à la doctrine inhérente aux textes légués par la tradition, tels que les écrits d'Aristote. Des alchimistes

arabes comme Jabir firent écho à cette distinction, héritée de l'alchimie alexandrine et qui pénétra ensuite toute l'alchimie médiévale en Occident.

Une contribution majeure de l'alchimie à la science, difficile à dater précisément, fut, vers les X^e-XI^e s., l'invention du laboratoire. Elle s'enracina dans la correspondance posée entre le microcosme – l'esprit et l'âme de l'alchimiste, mais aussi le récipient où il menait ses essais et conduisait son Œuvre – et le macrocosme créé par Dieu. Dans les monastères, certains moines (Roger Bacon reste le plus connu) se partageaient ainsi entre l'oratoire et le laboratoire – un mot issu de la tripartition de la société médiévale en *bellatori, oratori et laborati*, guerriers, prêtres et paysans.

Les alchimistes pratiquaient dans leurs alambics, athanors, cornues, creusets, cucurbites, pélicans, retortes et autres récipients, des macérations, distillations et sublimations. Ils suivaient les modifications d'aspect, de couleur en particulier, de la matière de l'Œuvre, les dégagements gazeux. Bref, ils se comportaient en observateurs attentifs aux changements d'état de la matière. Tantôt les opérations de transformation de la matière première (un terme dû aux alchimistes) et de purification des produits se faisaient à sec (« voie sèche ») ; tantôt des solvants (nommés « menstrues » à l'âge classique, les règles féminines étant censées dissoudre les matériaux les plus divers) servaient à effectuer ces transformations en milieu liquide (« voie humide »).

La symbolique

L'alchimie est inséparable d'un langage et d'une iconographie codés. Bien des clés nous échappent. Les différents ingrédients étaient représentés par des symboles nombreux et variables, sans correspondance biunivoque entre une graphie et son signifié, saipêtre par exemple. De surcroît, très tôt (papyrus de Leyde et de Stockholm), les textes comportent des récits oniriques, à l'évidente prégnance visuelle, participant sans doute du théâtre de la mémoire prôné par des manuels de rhétorique comme ceux de Cicéron et de Quintilien. Le recours à la mythologie grecque est fréquent, dans les textes alchimiques comme dans leur iconographie, au Moyen Âge et à la Renaissance. Outre les épisodes évoquant l'or (Danaé, pommes d'or du jardin des Hespérides, Toison d'or...), de nombreux mythes grecs resservent, par allégorie ou métaphore, à l'encodage des procédures alchimiques. Un exemple en est le filet de bronze qu'Héphaïstos jeta sur Aphrodite et Arès, surpris dans leurs ébats amoureux. Pour Newton, ce filet de Vulcain était un mixte d'antimoine (Mars) et de cuivre (Vénus), qu'il vouait à teinter l'or.

L'épisode Newton

À l'Âge classique, au moment où la Nouvelle Science se met en place, l'alchimie n'est pas déconsidérée. Elle maintient une influence, y compris sur de grands esprits. On a fait de Robert Boyle, avec un

schématisme excessif, le pionnier de la science expérimentale rationnelle. Or, si sa mécanique était réductionniste, il la séparait nettement de sa chimie. Et Boyle était un homme préoccupé de spiritualisme et empreint d'alchimie. Son portrait, complexe, est néanmoins représentatif de bien des scientifiques du temps.

Le cas d'Isaac Newton est lui aussi exemplaire. On a retrouvé toute une malle remplie de ses méditations et notes alchimiques, alors que ses écrits publiés – hormis certains passages des *Opticks* – ne laissaient pas deviner un intérêt majeur de sa part pour l'alchimie. La lecture de ces inédits du physicien anglais manifeste une extrême familiarité avec les traités alchimiques, le rendant apte à identifier aisément tel ou tel composé derrière une appellation symbolique et hermétique. On peut supposer que Newton accompagnait d'opérations matérielles ses lectures et réflexions alchimiques. Sa préoccupation majeure, semblerait-il, dans cette recherche poursuivie en secret des décennies durant, était de débusquer dans la matière la force attractive assurant la cohésion de ses granules et responsable de la gravitation universelle. Cette partie de l'activité de Newton est restée strictement privée, sa correspondance n'en fait pas mention.

La tradition

Nostalgie d'un Âge d'or et d'un Savoir disparus, l'alchimie fut probablement un ensemble de pratiques et de théories transmises oralement, dans une large mesure, d'un maître à un apprenti subissant une initiation, dont les degrés correspondaient aux divers stades de l'Œuvre. Puisqu'il fallait redécouvrir un Savoir ancien, les textes se recopiaient les uns les autres ; et ils se plaçaient souvent sous l'égide et au nom d'un personnage prestigieux. C'est ainsi qu'ont été attribués à Jabir (ou Geber), au philosophe et mystique catalan Raymond Lulle, à saint Albert ou à saint Thomas de multiples textes dont ils n'ont pas été les auteurs, et dont on ignore souvent qui les a écrits. Ce problème de pseudépigraphie est lancinant tout au long du parcours de l'alchimie et depuis l'Antiquité : Olympiodore, dans le corpus des alchimistes grecs, était-il un exégète alexandrin du VI^e s. ? Les écrits attribués à Nicolas Flamel, un écrivain calligraphe et riche bourgeois parisien du XV^e s., ne seraient-ils qu'une supercherie littéraire commise bien plus tard par Beroalde de Verville ? Le texte de « Lamsprink » (un évident pseudonyme) que le Dauphinois Nicolas Barnaud aurait traduit au début du XVII^e s. est-il en fait de ce dernier ?

Quoi qu'il en soit de ces attributions, la volonté de ne pas s'affranchir des auteurs anciens, de reproduire telles quelles leur pensée et les réalisations qu'on leur prête, apparaît un puissant frein à l'accession de l'alchimie au statut d'une science, par définition révoicable en tout ou partie, aux conclusions éphémères et toujours remises en question, à la problématique constamment renouvelée. L'alchimie a coulé sous le poids de la tradition.

► BERTHELOT M., *Les Origines de l'alchimie*, Paris, Steinhil, 1885. – DOBBS B.J.T., *The Foundations of Newton's Alchemy; or « The Hunting of the Greene Lyon »*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1975. – FAIVRE A., *Toison d'or et alchimie*, Milan, Archè, 1990. – HALLEUX R., *Les alchimistes grecs*, Paris, Les Belles Lettres, 1981 ; « L'alchimiste et l'essayeur », *Die Alchemie in der europäischen Kultur- und Wissenschaftsgeschichte*, Wolfenbütteler Forscher, Wiesbaden, O. Harrassowitz, 1986, p. 277-291. – JOLY B., *Rationalité de l'alchimie au XVII^e s.*, Paris, Vrin, 1992 ; « Quand l'alchimie était une science », *Revue d'Histoire des sciences*, 1996, 49 (2-3), p. 147-157. – KOYRÉ A., *Mystiques. Spirituels. Alchimistes du XVI^e s. allemand*, Paris, Gallimard, 1971. – NEEDHAM J., *Science and civilisation in China*, vol. 5, *Chemistry and chemical technology*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1974. – OBRIST B., *Constantina of Pisa. The book of the secrets of alchemy. Introduction, critical edition and commentary*, Leyde, Brill, 1990. – VIANO C., « Aristote et l'alchimie grecque : la transmutation et le modèle aristotélicien entre théorie et pratique », *Revue d'histoire des sciences*, 1996, 49 (2-3), p. 189-213.

Pierre LASZLO

→ Élément ; Nomenclature ; Paracelse ; Râzi ; Symbole.

ALEMBERT Jean LE ROND D', 1717-1783

Mathématicien et philosophe français, Jean Le Rond d'Alembert joua un rôle de premier plan dans tous les débats de son temps. Une solide éducation lui fit découvrir les œuvres de Descartes mais aussi de Newton et de Locke. Ses travaux mathématiques lui ouvrent à 23 ans les portes de l'Académie de sciences, puis de l'Académie française dont il deviendra le secrétaire perpétuel. Son *Traité de Dynamique* (1743) démontre le théorème général de la dynamique, le « principe de d'Alembert », qui la rapporte aux trois lois du mouvement de Newton. Le *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* (1744) unifie hydrodynamique et dynamique. Les *Réflexions sur la cause générale des vents* (1746) donnent une démonstration du théorème fondamental de l'algèbre et inventent le calcul des dérivées partielles. Son ami Diderot l'associe à la conception et à la rédaction de l'*Encyclopédie*. D'Alembert écrit le *Discours préliminaire* en tête du premier volume et rédige ou révisé les articles de mathématiques et de physique ainsi qu'un certain nombre d'articles musicologiques et philosophiques.

Scientifique, d'Alembert est newtonien, philosophe il se réfère à Locke et Condillac, mais théoricien des sciences il adopte une position originale : une justification du caractère nécessaire des mathématiques, comme chez Descartes mais en les comprenant comme produites « par des abstractions successives » à partir des « sensations ». Les mathématiques, n'étant alors qu'« une espèce de métaphysique générale où les corps sont dépouillés de leurs qualités individuelles », laissent presque tout à trouver dans l'expérience ; ainsi de l'attraction newtonienne qui n'est pas déductible des principes mathématiques de la mécanique.

► Il n'existe pas d'édition complète des œuvres de d'Alembert, 5 vol. d'*Œuvres philosophiques et littéraires* ont été édités à Paris en 1821 reprod. par Slatkine, Genève, 1967. – Œuvres principales : *Traité de Dynamique* (1743) ; *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* (1744) ; *Recherches sur la précession des équinoxes* (1749) ; *Discours préliminaire de l'Encyclopédie* (1751), rééd., Vrin, 1984 ; *Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides* (1752), rééd., Bruxelles, 1966 ; *Éléments de musique théorique et pratique* (1752) ; *Recherches sur différents points importants du système du monde*, 3 vol. (1754-1756) ; *Essai sur les éléments de philosophie* (1758), rééd. Fayard, 1986 ; *Opuscules mathématiques*, 9 vol. (1761-1780) ; *Éclaircissements sur les éléments de philosophie* (1766).

► GRIMSLEY R., *Jean d'Alembert*, Oxford, Clarendon Press, 1963. – HANKINS T.L., *Jean d'Alembert, science and the enlightenment*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1971. – KINTZLER C., « D'Alembert, les éléments de philosophie, une pensée en éclats », *Corpus* n° 4, Paris, Fayard. – PATY M., « D'Alembert et son temps, Éléments de biographie », *Cahiers Fundamenta Scientiae*, Strasbourg, 1977. – Coll. : « D'Alembert et les sciences de son temps », Paris, Centre International de Synthèse, *Dix-huitième siècle*, n° 16, 1984. – *D'Alembert, savant et philosophe, portrait à plusieurs voix*, Paris, Archives contemporaines, 1989.

François REMOISENET

→ Automate ; Espace-temps ; Matière ; Nomenclature ; Progrès.

ANALOGIE

Parmi les quatre formes de ressemblances que M. Foucault considère comme à la base du savoir de la culture occidentale figure l'analogie. Comme convenue ou proportion, elle a, dans les écrits des alchimistes, un rôle quasi cosmique où ses aspects cognitifs et ontologiques sont étroitement liés ; l'homme « grand foyer des proportions – le centre où les rapports viennent s'appuyer » (*Les mots et les choses*, Gallimard, 1966, p. 38) est ce qui est en proportion avec le ciel, les animaux, les plantes, la terre, etc. Simple métaphore, ou expression authentique d'un rapport, l'analogie est un mode de connaissance qui n'a certes pas la certitude de la démonstration mais qui n'en a pas non plus l'étroitesse des domaines d'application : alchimie, droit, théologie, biologie, physique sont autant de domaines où l'analogie a permis une extension du savoir.

Analogie d'attribution et analogie de proportionnalité

De la thèse aristotélicienne selon laquelle « L'être se dit en plusieurs sens » (*Métaphysique*, G, 2, 1003, a33), la philosophie thomiste a dérivé une connaissance par analogie. Cependant il est difficile de dire que chez Aristote, cette thèse conduit à une telle connaissance. Mieux vaut parler d'une « signification focale » (G.L.E. Owen, *Logic, Science and Dialectic*, New York, Ithaca, 1986, p. 192) de l'être plutôt que d'une signification analogique dans la philosophie du Stagirite ; mais ce sont pourtant les affirmations

métaphysiques d'Aristote sur la pluralité d'acceptions de l'être et la reconnaissance d'un rapport paronymique entre les termes qui ont permis le développement médiéval d'une connaissance analogique.

Revenons à l'expression « l'être se dit en plusieurs sens » (*to on legetai pollakhos*) ; elle est présente dans *Métaphysique* N, 2, 1089, a7 : « Il y a l'être qui signifie substance, l'être selon la quantité, la qualité, et selon chacune des autres catégories. » Il n'y a donc pas un concept général, unique et commun de l'être. Les catégories ne sont ni réductibles les unes aux autres ni réductibles à un supposé concept commun. L'être n'étant pas un genre, quelle unité peut-elle lui être accordée ? À cette question, la première réponse est de dire que l'unification ne peut être que homonymique, vu que les différentes acceptions de l'être reposent sur des raisons diverses. Une seconde réponse est de promouvoir une forme d'unité analogique ; c'est ce qu'ont fait les philosophes thomistes à la lecture du passage suivant de la *Métaphysique* G, 2, 1003, a33 : « L'être se prend en plusieurs acceptions mais c'est toujours relativement à un terme unique, à une même nature. Ce n'est pas une simple homonymie, mais de même que tout ce qui est sain se rapporte à la santé, telle chose parce qu'elle la conserve, telle chose parce qu'elle la produit, telle autre parce qu'elle est le signe de la santé, telle autre parce qu'elle est capable de la recevoir [...] l'être se prend en de multiples acceptions, mais en chaque acception, toute dénomination se fait par rapport à un principe unique. »

Si saint Thomas, suivant en cela Averroès, interprète ce passage comme justifiant une analogie d'attribution ou de participation, il n'en reste pas moins que les passages explicites d'Aristote sur l'analogie concernent exclusivement l'analogie dite de proportionnalité, c'est-à-dire l'analogie comme proportion mathématique, l'analogie où il y a non pas participation mais égalité de rapports. Dans l'*Éthique à Nicomaque*, V, 6, 1131, a31, on lit ceci : « La proportion est une égalité de rapports et suppose 4 termes au moins » (voir aussi Euclide V, 8). Cette proportion dans l'ordre de la quantité est aussi possible dans l'ordre de la qualité ou dans la catégorie du lieu : « La ressemblance » nous dit Aristote (*Topiques*, I, 17, 108, a7) « doit être étudiée d'abord dans les choses qui appartiennent à des genres différents. de la façon suivante : ce qu'un terme est à un second, un troisième l'est à un quatrième (par exemple, ce que la science est à son objet, la sensation l'est au sensible) et : comme un terme est dans un second, aussi un troisième est dans un quatrième (par exemple comme la vue est dans l'œil, ainsi l'esprit est dans l'âme, et comme le calme est dans la mer ainsi le silence des vents est dans l'air). »

Si, comme le dit Aristote, l'être n'est pas un genre, il ne peut être attribué que de façon homonymique ou analogique. Les prédications univoques concernent la définition : identité de nom, identité de raison ; comme par exemple dire de l'homme qu'il est animal raisonnable ; les prédications équivoques sont en réalité, selon la terminologie aristotélicienne, homonymes :

identité de nom et diversité de raison ; exemple : chien qui se dit de l'animal et de la constellation. Les prédications analogiques sont des prédications qui n'ont pas de signification unique selon les sujets auxquels elles s'appliquent ; ni non plus des raisons si diverses comme c'est le cas des termes équivoques ; autrement dit l'homonymie n'y est pas fortuite ; ainsi par exemple « sain » qui se dit du vivant, de l'urine et du remède ; « en effet sain se dit de l'urine comme de l'indice de la santé, du vivant corporel comme du sujet de la santé, et du remède au titre de cause de la santé. Mais toutes ces raisons d'attribuer le prédicat "sain" se prennent eu égard à une fin unique, la santé » (Thomas d'Aquin, *De principiis nat.*, § 6).

Cet exemple est donné en général pour l'analogie d'attribution, celle pour laquelle existe une raison d'intention qui est identique (la santé) ; on peut y ajouter un exemple métaphysique : le rapport de la substance à l'accident relève aussi de cette analogie d'attribution. Ce type d'analogie, non explicite chez Aristote, repose sur une lecture groupée de passages du traité des *Catégories* (1 a13-15) où Aristote parle des paronymes et de passages de la *Métaphysique* (G, 2, 1003, a33) où il dit que les catégories autres que la substance sont des affections de celle-ci. En effet, de même que pour les paronymes, il y a une parenté entre les choses désignées fondée sur une parenté linguistique – c'est à partir d'une même racine de mot qu'on peut parler d'un art qui s'exerce (la grammaire) et de celui qui l'exerce (grammairien) – de même c'est à partir d'un même être (la substance) que l'on peut parler des affections de l'être (les catégories du lieu, de la quantité, de la qualité, etc). C'est l'analogie selon un seul et même terme, non celle qui met en proportion quatre termes.

Mais, on trouve aussi chez saint Thomas deux autres formes d'analogie ; l'une qui s'effectue selon « l'être et non selon la raison intentionnelle », l'autre qui s'effectue selon « la raison intentionnelle et selon l'être » (*Écrit sur les Sentences*, I, d.19, q5, a2).

Dans le premier cas, on peut dire univoquement de deux corps, l'un céleste, l'autre terrestre que ce sont des corps ; c'est ce que fait « le logicien qui ne considère que les raisons intentionnelles » (*ibid.*) et non les êtres ; l'équivocité du terme corps ne peut apparaître alors que chez le métaphysicien ou le physicien. Pour ces derniers, cette analogie est une analogie d'inégalité car ils tiennent compte de la notion de participation à l'être : les corps célestes ne participent pas à l'être dans la même proportion que les corps terrestres.

Dans le second cas, l'analogie est « selon l'être et selon la raison intentionnelle » (*ibid.*). C'est ce que l'on appelle l'analogie de proportionnalité : « Ceci est le cas lorsque les réalités considérées ne sont à parité ni quant à la raison de la notion commune, ni quant à l'être. » C'est ce type d'analogie qui convient quand on parle de la bonté de Dieu et de la créature ; il n'y a pas de ressemblance mais « deux proportions disposées en comparaison », par exemple : « Ce qu'est la vue pour l'œil, l'intellect l'est pour l'esprit. » L'analogie de

proportion est celle qui existe par exemple entre 1 et 2 ; l'analogie de proportionnalité est celle qui concerne « non pas deux réalités en rapport de ressemblance, mais bien plutôt deux proportions disposées en comparaison. Par exemple le nombre 6 rapporté au nombre 4, puis le nombre 3 réferé au nombre 2 » (*QD de verit.*, q2, a11, Resp. 95 s).

Dans ces trois cas (analogie d'attribution, d'inégalité, de proportionnalité), la prédication analogique est justifiée car elle est « intermédiaire entre la pure équivocité et l'absolue univocité » (Thomas d'Aquin, *S.Théol.*, I, q13, a5) et permet ainsi d'ouvrir le domaine d'un champ spécifique de connaissance : la connaissance par analogie.

Analogie versus démonstration

L'idée d'une connaissance analogique en lieu et place d'une connaissance démonstrative qui fait défaut est reconnue par Leibniz mais ses fondements remontent, comme on vient de le voir, à saint Thomas : puisqu'il est « impossible qu'un terme soit attribué de manière univoque à une créature et à Dieu » et qu'il « est aussi impossible qu'un terme commun soit prédié de Dieu et des réalités créées de façon totalement équivoque », alors on peut dire que le terme « connaissance » « est prédié du connaître divin et du nôtre, ni par mode de totale univocité, ni par mode de pure équivocité, mais selon l'analogie » (saint Thomas, *Questions sur la vérité*, q.2, a.11).

Ce qu'on ne parvient pas à démontrer, on le donne analogiquement : Leibniz ne fait-il pas l'analogie entre Dieu créant le monde avec le maximum de perfection et « un savant auteur qui enferme le plus de réalités dans le moins de volume qu'il peut » ? (*Discours de métaphysique*, V). L'analogie est alors le seul recours d'une intelligence qui, ne pouvant connaître en particulier les raisons de Dieu, peut cependant « faire quelques remarques générales concernant le gouvernement des choses » (*ibid.*).

La saisie des analogies fut ainsi, comme l'attestent M. Foucault dans *Les mots et les choses* et F. Jacob dans *La logique du vivant*, la forme de connaissance à l'honneur aux XVI^e et XVII^e s. Le principe qui guide le savoir se résume dans « le réseau d'analogies et de similitudes » qui donne accès à « certains secrets de la nature » (F. Jacob, *op. cit.*, p. 29), car de « la similitude des choses, on peut déduire les intentions divines » (J.B. Porta, *Phytognomonica*, cité par F. Jacob, *op. cit.*, Gallimard, 1970, p. 29). L'analogie est la méthode indirecte, oblique, qui capte quelque chose du dessein divin. Son omniprésence dans l'homme et l'univers est l'indice de l'unité et de l'harmonie de ce dessein : « Chaque animal, chaque plante devient une sorte de corps protéiforme qui se prolonge non seulement dans les autres êtres, mais aussi dans les pierres, dans les étoiles et même dans les activités humaines » (F. Jacob, *op. cit.*, p. 30). L'analogie, ainsi entendue, a eu comme domaine privilégié d'application l'alchimie et fut au XVI^e s. une grille de lecture vitaliste. Paracelse en est le

représentant le plus éminent. L'homme est considéré par lui comme un microcosme dans lequel on peut lire les secrets du macrocosme. Cette méthode a été jugée sévèrement par G. Bachelard ; après avoir cité un passage du livre de H. Metzger où sont rassemblées de nombreuses analogies paracelsistes, G. Bachelard indique ceci : « Est-il besoin de dire que ces analogies ne favorisent aucune recherche ? Au contraire elles entraînent à des fuites de pensée ; elles empêchent cette curiosité homogène qui donne la patience de suivre un ordre de faits bien défini. À tout moment les preuves sont transposées. On croyait faire de la chimie dans le cœur d'un flacon ; c'est le foie qui répond. On croyait ausculter un malade ; c'est la conjonction d'un astre qui influe sur le diagnostic » (G. Bachelard, *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, rééd., 1983, p. 88).

L'analogie : mode de liaison entre les phénomènes

Comme exemple d'analogie d'attribution ou de proportion, nous avons dit que saint Thomas citait le rapport d'une substance à ses accidents ; c'est l'analogie fondée sur la ressemblance entre un terme pris comme base et d'autres termes qui sont pour lui comme des flexions, des paronymes. Cette forme d'analogie métaphysique, fondée sur la nature des choses et sur laquelle repose le système de correspondances dont nous venons de parler, est convertie par Kant en principe régulateur de connaissance subjective : il ne s'agit plus de relier les choses pour y déceler une intention divine mais de rendre compte de la possibilité subjective d'une mise en liaison des phénomènes. La première des analogies de l'expérience que présente la *Critique de la raison pure* est dite « principe de permanence ». Cette analogie qui permet de penser le changement comme mode d'être de ce qui est permanent est explicitement une reprise par la philosophie transcendantale de l'idée thomiste et averroïste d'une substance diversement affectée par ses accidents : « Je trouve que, de tout temps, non seulement le philosophe, mais tous les hommes en général ont supposé cette permanence comme un substrat de tout changement des phénomènes et qu'ils l'admettront toujours comme indubitable ; seulement le philosophe s'exprime là-dessus de manière un peu plus précise, en disant que dans tous les changements qui arrivent dans le monde, la substance demeure et seuls changent les accidents » (*Critique de la raison pure*, trad. fr. A. Tremesaygues & B. Pacaud, PUF, 9^e éd., 1980, p. 179).

Alors que saint Thomas, « le philosophe plus précis » que le commun, cherchait à rendre compte de la permanence de la substance, Kant essaie de dire par les analogies de l'expérience pourquoi nous devons considérer les phénomènes comme résidant dans la nature et en quoi cette résidence fonde l'unité de leur expérience. La précision du philosophe médiéval ne le mettait pas, selon Kant, en garde contre certains malentendus : « Lorsqu'on attribue une existence particulière à ce réel dans la substance (par exemple au mouvement considéré comme un accident de la matière), on appelle

cette existence l'inhérence pour la distinguer de l'existence de la substance que l'on nomme substance. Mais il en résulte beaucoup de malentendus et on s'exprime d'une manière plus exacte et plus juste en ne désignant sous le nom d'accident que la manière dont l'existence d'une substance est positivement déterminée » (Kant, *op. cit.*, p. 180-181).

L'analogie n'est alors plus une analogie d'être, c'est une « analogie de l'expérience », c'est-à-dire de ce qui rend possible l'expérience en donnant les déterminations du temps. Ainsi la première analogie de l'expérience, « principe de permanence », rend possibles les modes du temps : « La permanence exprime en général le temps comme le corrélatif constant de toute existence des phénomènes, de tout changement et de toute simultanéité » (E. Kant, *op. cit.*, p. 178). Évitant les malentendus relatifs au vocabulaire scolastique de la « substance » de la substance et de « l'inhérence » de ses accidents, Kant pense la permanence comme « résidence » des phénomènes, condition de l'unité du temps et possibilité des manières d'être du temps. Les autres analogies de l'expérience (succession, simultanéité) confirment que l'analogie en philosophie est pour Kant moins un mode de connaissance qu'une règle pour toute connaissance possible. Ce sont les analogies de l'expérience qui permettent de lier entre elles les perceptions dans le temps : elles fournissent la règle de cette liaison. L'analogie signifie ici un rapport de tout phénomène à son existence dans le temps ; elle ne constitue pas une connaissance de ce phénomène.

L'analogie : une méthode extensive de connaissance

Dans le domaine du droit, on rencontre le problème d'une extension d'une règle prévue pour un cas à des cas apparentés. La loi ne peut pas prévoir toutes les situations. Le problème posé par l'analogie n'est pas un problème d'interprétation, c'est un problème que les situations nouvelles posent au texte, non un problème du sens du texte. Le texte est mis à l'épreuve des situations nouvelles. La question devient celle de la recherche des similitudes entre la situation décrite par la loi et la situation nouvelle sur laquelle il faut légiférer. De même que dans l'ordre métaphysique il y a l'être puis ses flexions accidentelles, de même dans l'ordre du droit il y a la loi, puis les analogies d'attribution ou de proportion qui permettent de rapporter une situation nouvelle à une ancienne, ou plus exactement de l'y réduire : l'essentiel étant de ne pas multiplier les lois.

Dans les écrits de méthodologie du droit des juristes musulmans nous trouvons une présentation du raisonnement juridique (*qiyas char'i*) fondé sur une analogie : ce raisonnement a quatre composantes : 1) Le cas de base ; 2) Le cas dérivé assimilé ; 3) La cause ou ressemblance selon laquelle se fait la qualification légale ; 4) Le jugement (*hukm*) ou qualification légale. Il y a transfert de jugement du cas original prévu par les textes (Coran, dits prophétiques) au cas assimilé (situation nouvelle pour laquelle rien n'est prévu)

quand, partageant la même cause, les deux cas sont considérés comme équivalents. La parenté formelle de ce raisonnement avec le syllogisme est plus grande qu'il n'y paraît à première vue : le moyen terme dans le syllogisme est la cause dans l'analogie ; la relation du moyen terme aux termes mineur et majeur est équivalente à celle qui existe entre la cause et les cas originel et assimilé. Tout ce qui est requis pour déterminer la vérité ou certitude de la prémisse universelle dans un syllogisme le sera pour prouver que la cause est concomitante au jugement. Cette preuve reste dans le domaine du probable avec un avantage pour l'analogie sur le syllogisme : l'analogie mentionne le particulier sur la base duquel la conclusion est établie ; ce que ne fait pas le syllogisme : la connaissance qu'un particulier donné implique un autre particulier est considérée comme plus conforme à l'intelligence naturelle de tout un chacun que la connaissance que tout particulier subsumé sous une proposition universelle conduit à une conclusion. R. Brunschwig avait saisi l'importance de ce raisonnement par analogie et celle de sa confrontation avec le syllogisme, après avoir rappelé que pour Al-Ghazâlî le *qiyas* ou raisonnement juridique reposant sur une analogie est une « opération normative concluant d'un particulier (*ju' i*) à un autre particulier, en raison d'une qualité qui leur est commune » ; il ajoute « un rapprochement légitime à effectuer avec le raisonnement par analogie si important dans les droits occidentaux comme dans le développement des sciences dans l'Occident, interdisent selon moi de voir dans le *qiyas* légal un trait logique propre à une pensée qualifiée d'"orientale" : pensée à deux temps, directe, spontanée, intuitive, qui s'opposerait à la pensée à trois temps, discursive, plus franchement rationnelle et de plus de poids » (*Logique et droit dans l'islam classique*, in *Études d'islamologie*, t. II, Paris, Maisonneuve & Larose, 1976, p. 360).

Cependant l'analogie n'est pas limitée à une inférence d'un particulier à un particulier. Les procédures en droit musulman devaient tenir compte de l'absence de tout cas identique dans lequel la cause ne produit pas le même jugement ; car si une telle cause existait alors il n'y a plus moyen de transférer le jugement du cas originel au cas assimilé (dans le contexte d'un syllogisme cela signifie que la prémisse universelle est hautement douteuse). Ainsi, établir le caractère universel de la prémisse majeure est équivalent à vérifier que partout où il y a une cause, il y a un jugement. C'est pourquoi l'équivalence supposée de l'analogie et du syllogisme catégorique repose sur une analogie dont la cause est établie par des méthodes qui présupposent un examen inductif de tous les particuliers pertinents. De ce point de vue le modèle du raisonnement juridique par analogie n'est pas l'analogie de proportionnalité mais l'analogie de proportion ou d'attribution ; dans celle-ci, on s'interroge sur la nature des termes en question pour en donner la similitude et l'analogie ; dans celle-là, aucun questionnement sur la nature des termes ne vaut.

De ce point de vue, l'analogie de proportionnalité

n'exprimant aucun rapport réel est reléguée au plan de la métaphore. L'exemple donné par Aristote dans la *Poétique* en 1457 b : « La vieillesse est à la vie ce que le soir est à la journée », relève d'une analogie de proportionnalité. Certes il peut persister entre la métaphore et l'analogie une différence : mais cette différence n'est pas une différence de structure, c'est seulement une différence de degré de réalité.

Analogie versus modèle

En histoire des sciences, P. Duhem reconnaît dans la pensée analogique une double vertu : elle aide à mieux classer les lois et les théories et par là même favorise une unité logique de la science ; par cet effort de classification, elle est féconde dans la découverte de nouveaux phénomènes. « Le physicien, qui cherche à réunir et à classer dans une théorie abstraite les lois d'une certaine catégorie de phénomènes, se laisse très souvent guider par l'analogie qu'il perçoit entre ces phénomènes et les phénomènes d'une autre catégorie » (p. 140) ; comme exemple de telles analogies, celle qui existe entre les aimants et les corps qui isolent l'électricité : la théorie du magnétisme et celle de la polarisation diélectrique sont deux théories qui ont pu profiter chacune des progrès accomplis par l'autre grâce au repérage d'analogies entre les phénomènes qu'elles décrivent.

Au principe de l'analogie, il y a une extension de relations d'un domaine à un autre. Faraday s'était intéressé à la transmission de la force électrique à travers la matière et l'espace. Maxwell reprend cette idée et développe l'analogie suivante : de même qu'une ligne magnétique fait apparaître une succession de pôles nord et sud dans le fer, une ligne de forces électriques crée dans un isolant une succession de charges positives et négatives ; la matière isolante est ainsi électriquement polarisée et de même que la magnétisation du fer disparaît lorsque l'aimant qui en était la cause est éloigné, de même la polarisation d'un isolant disparaît lorsque la ligne de force, c'est-à-dire les charges extérieures qui en étaient la cause, disparaît. Cet exemple montre : 1) comment l'analogie unifie des domaines distincts (lumière, électricité, magnétisme) ; les équations régissant le phénomène de la polarisation diélectrique et celles régissant le comportement des ondes lumineuses sont les mêmes ; 2) comment aussi une fécondité dans les découvertes est mise au jour par ce procédé de connaissance fondé sur l'interconnexion des relations susceptibles d'être étendues d'un domaine à un autre ; cette extension peut être soit une forme d'éclaircissement mutuel des deux domaines considérés, soit une manière d'inventer une forme de théorie nouvelle à partir de la connaissance d'une autre. De telles fécondités sont illustrées par la démonstration de Maxwell : la lumière est une onde électromagnétique d'un certain type et inversement les ondes électromagnétiques se plient à la réflexion, réfraction, et autres effets auxquels les ondes lumineuses obéissent, notamment les vibrations transversales de la lumière. On

comprend alors le propos de J. Clerk Maxwell : « Par analogie physique j'entends, cette ressemblance partielle entre les lois d'une science et les lois d'une autre science qui fait que l'une des deux sciences peut servir à illustrer l'autre » (cité par P. Duhem, *op. cit.*, p. 141).

Les règles de l'analogie ne dépendent que des propriétés syntaxiques de la connaissance et non du contenu spécifique des domaines. L'analogie doit être distinguée de la similarité.

Analogie et similarité

Soit l'analogie arithmétique : $3/6 = 2/4$, nous ne tenons pas compte des caractéristiques communes de 3 et de 2 ni de celles de 6 et de 4. Ce n'est pas le nombre des caractéristiques partagées ou non partagées qui compte ici, mais seulement la relation « deux fois plus grand » qu'entretient 3 avec 6 et 2 avec 4. D'ailleurs, l'analogie n'est pas plus ou moins quand nous considérons $3/6$ que $200/400$, « même si 3 a plus de caractéristiques en commun avec 2 qu'avec 200 » (Dedre Genter, « Structure-mapping : A theoretical framework for analogy », *Readings in Cognitive Science*, Morgan Kaufman Publ., 1988, p. 303). L'idée centrale est qu'une analogie est une assertion selon laquelle une structure relationnelle qui s'applique normalement dans un domaine peut aussi s'appliquer dans un autre domaine. Simondon (*L'individu et sa genèse*, PUR « Épiméthée », 1964, p. 264) indiquait en ce sens que l'analogie n'efface pas la différence des termes ; elle ne concerne que les opérations entre termes : elle établit « une identité de rapports opératoires » que l'on voit fonctionner selon lui dans le *Sophiste* de Platon quand celui-ci transfère les opérations de capture et de séduction du cas du pêcheur à la ligne à celui du sophiste. La méthode analogique n'est une méthode de connaissance que dans la mesure où elle reproduit non pas les êtres mais « le schème opératoire de l'être connu » (*ibid.*).

« A est analogue à B » : B est la base de l'analogie, c'est le domaine qui sert de source de connaissance et A est le but visé, c'est le domaine qu'on cherche à expliquer, dont on veut rendre compte. Il s'agit à la fois de transférer les prédicats relationnels de B à ceux de A et d'essayer de préserver les relations qu'entretiennent entre eux les objets de A. Il faut veiller à rejeter le transfert de propriétés d'objets d'un domaine à l'autre car cela renvoie plutôt à la similarité littérale : on dit que l'atome d'hydrogène est comme notre système solaire ; il y a bien là analogie et non similarité dans la mesure où l'électron fait sa révolution autour du noyau comme les planètes autour du soleil ; mais à aucun moment nous ne voulons dire que le noyau est jaune-massif comme l'est le soleil. Les relations d'attraction entre soleil et planète, entre électron et noyau, sont bien analogues l'une à l'autre, mais ce sont des relations ou des prédicats relationnels, non des propriétés d'objets.

L'analogie se distingue aussi de l'application d'une abstraction : dire que l'atome d'hydrogène est un système de force central signifie que le domaine de base

est une structure relationnelle abstraite qui est transférée au domaine visé. Le domaine de base suppose qu'on ait déjà acquis le savoir qui nous dit que l'objet central attire l'objet périphérique.

Dans les analogies, les relations sont prioritaires sur les propriétés d'objets. Mais elles ne sont pas toutes à préserver ; dans l'analogie de Rutherford, la relation « plus chaud que » n'est pas à préserver.

L'analogie donne lieu à une forme de connaissance connectée et non à une connaissance cumulative de faits indépendants. Les relations qui donnent lieu à un transfert sont interconnectées : la relation d'attraction (soleil/planète) et la relation de distance (soleil/planète) sont interdépendantes ; il en va de même pour les relations « tourne autour » et « plus massif que ». Le changement d'une relation affecte les autres. À ce sujet, on peut dire que ces relations ont « un halo analogique » selon l'expression de R. Thom qui, s'inspirant d'Aristote, appelle de ses vœux une théorie de l'analogie :

« En règle générale, tout concept (X) crée ce qu'on pourrait appeler son halo analogique, c'est-à-dire l'ensemble des concepts (Y) tels que le génétif Y de X fasse sens en contexte normal (la prégnance du concept (X) peut investir un référent générique de (Y)). C'est là ce qu'on pourrait appeler un genre "généralisé" dont les Y seraient les espèces, en général séparées par des différences spécifiques issues d'un genre plus restreint, mais à validité extensionnelle très étendue (comme la couleur par exemple) » (R. Thom, *Matière, forme, catastrophe*, in *Penser avec Aristote*, 1991, p. 388).

Mais malgré l'aide apportée par le vocabulaire aristotélicien, il n'en reste pas moins que l'analogie est une notion difficile à formaliser. Signe d'un savoir connecté, elle se distingue aussi bien d'une pensée par similitude que d'une pensée par modèle.

» ARISTOTE, *Métaphysique*, G. trad. fr., Paris, Vrin, 1964 ; *Éthique à Nicomaque*, V, 6, Paris, Vrin, 1959 ; *Topiques*, I, 17, trad. fr., Paris, Vrin. — BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, rééd., 1983. — BRUNTSCHWIG R., *Logique et droit dans l'islam classique*, in *Études d'islamologie*, t. II, Paris, Maisonneuve & Larose, 1976. — DUHEM P., *La théorie physique, son objet, sa structure*, 2^e éd., Paris, Vrin, 1989. — FOUCAULT M., *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966. — GENTER D., « Structure-mapping : A theoretical framework for analogy », *Readings in Cognitive Science*, Morgan Kaufman Publ., 1988. — JACOB F., *La logique du vivant*, Paris, Gallimard « Tel », 1970. — KANT E., *Critique de la raison pure*, trad. fr. A. Tremesaygues & B. Picaud, Paris, PUF, 9^e éd., 1980. — LEIBNIZ, *Discours de métaphysique*, Paris, Aubier Montaigne, 1972. — OWEN L.E., *Logic, Science and Dialectic*, Ithaca, NY, 1986. — SIMONDON, *L'individu et sa genèse*, Paris, PUF « Épiméthée », 1964. — THOM R., *Matière, forme, catastrophe*, in *Penser avec Aristote*, Paris, Érès, 1991. — Coll. : *Les Études philosophiques. L'analogie*, Paris, PUF, juil.-déc. 1989.

ALI BENMAKHOUB

— Abstraction ; Catégories et foncteurs ; Criticisme ; Dédution ; Démonstration ; Expérience ; Induction ; Kant ; Méthode ; Paracelse.

ANALYSE CHIMIQUE

Le visiteur de certains laboratoires d'analyse qui, sur la foi de la définition de l'analyse chimique donnée par Littré : « décomposition d'un composé au moyen de réactifs appropriés », s'attendrait à voir des étagères garnies de produits chimiques, pourra être surpris de ne trouver que des appareils produisant, par exemple, des rayonnements X, ou infrarouge, ou des générateurs de particules fonctionnant sous vide, et reliés à des ordinateurs. La consultation de dictionnaires récents, ou même de traités de chimie non spécialisés fournit le plus souvent des réponses analogues à « décomposition d'une substance en ses principes constituants ». Certains seulement ajoutent : « détection, détermination, et examen des substances ». Or ces opérations ont précédé la décomposition qui devint la méthode prépondérante avec la chimie lavoisienne, et ce sont elles qui, souvent aujourd'hui, utilisent les appareils de la physique. En effet les techniques analytiques se sont développées d'abord pour des besoins pratiques : détection des fraudes sur les teneurs en métaux précieux, puis analyses pour les médecins, la iatrochimie, et analyses d'eaux et de minéraux, dont s'occupent d'éminents chimistes au XVIII^e s.

Archimède, 250 ans avant notre ère, vérifia la pureté de l'or de la couronne de Hiéron en inventant la méthode de mesure de la densité. La méthode, dite à la touche, consistant à frotter une pierre avec l'objet à essayer et à en évaluer la teneur en métal précieux d'après la trace laissée, remonterait au VI^e s. avant J.-C. L'essai de l'or et de l'argent par le feu est mentionné dans la Bible ainsi que dans une réclamation concernant une quantité d'or reçue, adressée par le roi de Babylone au Pharaon vers 1360 avant notre ère. Pline décrit une sorte d'essai colorimétrique du cuivre. Au Moyen Âge la méthode de fusion avec du plomb, dite coupellation, est réglementée en France. Restée en usage jusqu'à nos jours, elle fournissait déjà des résultats très précis : seize échantillons d'argent retrouvés en Pologne, à Torun, avec les résultats complets d'analyses effectuées entre 1528 et 1534, ont été réanalysés en 1955. Les plus petits écarts relatifs entre les valeurs anciennes et modernes sont de quelques dix-millièmes, le plus grand de 7,6 pour mille (Gorski, in Hulanicki dir., *Euroanalysis*, V, Budapest, Akad. Kiado, 1986).

Le fondateur de l'analyse qualitative au moyen de réactifs colorés faits d'extraits de plantes naturelles, et l'inventeur du mot analyse est Robert Boyle, en Angleterre, au XVII^e s.

L'analyse objet de la chimie : une méthode empirique

Lorsque Lavoisier fonde sa méthode sur l'établissement des compositions exactes des corps étudiés, et, pour cela, avec la balance, établit des bilans précis des substances entrant en réaction, il écrit dans son célèbre *Traité élémentaire de chimie* : « La chimie, en soumettant à des expériences les différents corps de la nature, a pour objet de les décomposer et de se mettre en état

d'examiner séparément les différentes substances qui entrent dans leur combinaison... la chimie marche donc vers son but et vers sa perfection en divisant, subdivisant, et resubdivisant encore... » L'obtention des compositions de l'air et de l'eau consacre le triomphe de sa méthode. En fait partie la mention, dans les bilans établis, des écarts de mesure dus à des pertes ou toute autre cause ; et, chaque fois que cela est possible, la vérification de l'analyse est faite par synthèse du corps initial à partir des produits de sa décomposition. Des analyses quantitatives exactes conduisirent aux lois, dues à Proust et à Dalton, qui montrent l'une que les corps purs sont formés par des associations d'éléments en proportions fixes, l'autre que, lorsque des corps différents sont formés à partir des mêmes éléments, les rapports des proportions de ceux-ci dans ces corps sont simples. Ces lois à leur tour ont conduit Dalton à formuler l'hypothèse atomique une dizaine d'années seulement après la mort de Lavoisier. Les investigations n'étaient pas toujours faciles. Où s'arrêter dans la division et la subdivision des corps, se demandait-on encore au début du XIX^e s. ? Klaproth écrivait : « Il existe une limite où l'analyse s'arrête, c'est le simple de l'art. Il ne faut pourtant pas prendre le simple de l'art pour le simple de la nature. »

Alors que tous les corps organiques se révélaient formés essentiellement de quatre éléments : hydrogène, carbone, azote et oxygène, le nombre des éléments de la chimie minérale ne cessait de croître. Aussi lorsque le chimiste Curaudeau annonça, en 1808, qu'il avait décomposé le phosphore, le soufre et le fer, bien que cela parût surprenant, l'Institut n'en décida pas moins de procéder à une investigation détaillée qui mit en défaut les expériences de Curaudeau (*Ann. Chim.*, 1828, t. 68, p. 94-105), mais on sait que Proust, quelques années plus tard, se fondant sur le fait que les poids atomiques des éléments semblaient être tous des multiples de celui de l'hydrogène, émit l'hypothèse que celui-ci servait à former tous les autres. Cette proposition ne survécut pas aux objections fondées sur des exceptions notables, notamment celle, apparente, du chlore.

La découverte de nouveaux moyens de décomposition des corps purs facilita celle de nouveaux éléments. L'électrolyse, la décomposition par le courant électrique, permit à Davy de découvrir le chlore, le potassium, le calcium, le strontium, le baryum, le magnésium et le bore. Tout le XIX^e s. vit le nombre d'éléments augmenter grâce à l'analyse. Péligot isola l'uranium métallique dont Klaproth avait pris l'oxyde pour l'élément. Après avoir séparé les terres rares les unes des autres, et montré, en 1885, que celle nommée didyme était un mélange de néodyme et de praséodyme, après les découvertes du gallium et du germanium qui confortaient la classification de Mendéléiev en comblant des cases vides du tableau des éléments, les derniers grands succès de l'analyse chimique par les méthodes de fractionnement furent la découverte, par Marie Curie, du polonium et du radium, et en 1939, à la

suite des travaux de sa fille Irène, la preuve chimique de la fission par Hahn et Strassmann.

C'est que les méthodes d'analyse, au sens d'identification, se sont développées. Dès le XVIII^e s. l'analyse des minéraux se faisait en utilisant le chalumeau, appareil qui pouvait être portatif. En soufflant de l'air dans la flamme d'une bougie on en élevait la température au point de fondre la plupart des minéraux et on les identifiait soit par la couleur de la flamme soit, déjà, par des réactifs spécifiques. En effet, dès 1718, en établissant une table des rapports, Étienne François Geoffroy classait les acides suivant leur pouvoir de déplacer les sels des autres acides, ouvrant ainsi une piste à l'établissement de caractères analytiques. Le Suédois Bergman décrivit les deux méthodes en 1780. Le Dieppois Decroizilles, en inventant la burette, fonda la titrimétrie au tournant du XVIII^e s. Elle utilise les réactions colorées des acides et des bases avec les colorants végétaux, décrites déjà par Boyle, pour des dosages, c'est-à-dire des analyses quantitatives ; par des mesures de volumes de solutions de réactifs, Gay-Lussac mit bientôt au point une méthode d'analyse des métaux précieux par voie humide. En 1820 Berzélius, alors le maître de la chimie et de l'analyse, écrivit un traité sur le chalumeau, son instrument de prédilection.

Mais des méthodes d'identification ne faisant usage ni de décompositions ni de réactions chimiques apparurent. Déjà on reconnaissait un corps pur à la constance de ses propriétés vis-à-vis des températures de changement d'état, ou des essais de fractionnement par distillation ou fusion. Pour les substances organiques Chevreul, en 1824, utilisa l'action de la lumière, de l'électricité, et même du magnétisme à des fins analytiques. Et surtout, en 1860, Bunsen et Kirchhoff identifient les éléments en produisant leurs raies spectrales et découvrent le césium et le rubidium. Ainsi s'ouvre la voie de l'emploi des spectroscopies de toutes natures, au fur et à mesure de leur développement. Qualitatives d'abord, elles deviendront peu à peu des méthodes quantitatives, grâce notamment à des procédures d'étalonnage.

Au cours du XIX^e s. l'analyse avait fait l'objet de traités qui systématisaient ses opérations : Thénard (*Principes généraux de l'analyse chimique*, Paris, 1816) classait les métaux suivant leur affinité pour l'oxygène. Gerhardt et Chancel (*Précis d'analyse chimique qualitative*, Paris, 1862) divisaient les éléments en cinq groupes, et, bien qu'ayant utilisé le mot « chimique » dans le titre, discutaient l'emploi récent de la spectrométrie.

Frésenius (*Anleitung zur quantitativen chemischen Analyse*) fit autorité depuis 1846 jusqu'aux premières années du XX^e s. dans ses éditions successives. Il décrivait des méthodes chimiques de séparation et d'identification, qui, quoique classées avec logique, ont une base purement empirique. Sans discussion théorique, il faisait tous les calculs à l'aide non des poids atomiques mais des équivalents, poids des éléments qui s'unissent à 8 grammes d'oxygène. On avait retenu cette échelle qui donne la valeur 1 à l'hydrogène, après avoir

envisagé d'assigner 100 à l'oxygène, et corrélativement 12,5 à l'hydrogène. L'avantage pratique des équivalents était de permettre des dosages sans se soucier de la composition atomique des corps. Ainsi, même en Allemagne, où les chimistes avaient adopté massivement la notation atomique depuis le congrès de Karlsruhe en 1860, et où, de ce fait, la chimie avait fait des progrès plus rapides qu'en France (où Dumas et Berthelot niaient l'existence des atomes), les analystes n'adoptent pas cette notation, bien qu'ayant, au début du siècle, posé les fondements de la théorie atomique.

L'analyse, dotée de méthodes sûres, bien qu'empiriques, et souvent longues et pénibles, ayant permis de reconnaître les corps purs et d'établir leur composition élémentaire, de dresser la liste presque complète des éléments, avait accompli sa tâche comme objet de la chimie. Quel serait son nouveau statut ?

De l'analyse à la chimie analytique servante de la chimie

L'analyse s'était répandue en dehors des laboratoires des savants et était entrée dans les manufactures et les usines chimiques, remplaçant lentement, pour le contrôle des fabrications, les règles issues de la pratique par celles fondées sur l'analyse. Le grand physico-chimiste W. Ostwald, dans *Grundlagen der analytischen Chemie (Fondements de la chimie analytique)*, Dresde et Leipzig, Theodor Steinkopff, 1897), donna le premier des bases de calcul aux opérations de l'analyse, de la distillation au titrage. Il s'appuya sur la loi d'action de masse de Guldberg et Waage et sur la théorie des électrolytes d'Arrhenius. Mais, dans la partie consacrée à l'analyse des substances, il ne peut que constater certaines propriétés utilisées. Pour expliquer, en effet, pourquoi le calcium peut s'unir à deux atomes de chlore alors que le sodium ne le peut qu'à un seul, il faudrait recourir à la structure électronique des atomes, et celle-ci n'était pas encore conçue. Bien plus, Ostwald était farouche adversaire de l'atomisme.

Les méthodes de l'analyse furent désormais étudiées dans le cadre de la discipline appelée chimie analytique. Elle se développa en se fondant sur la classification périodique des éléments, sur la théorie des ions, avec Treadwell dès 1912, sur la notion de pH avec Kolthoff, sur les idées de Bjerrum sur l'oxydo-réduction, répandues en France par Charlot. Devenant moins empirique, sa vocation exclusive à l'analyse fut parfois contestée ; mais on suit Ostwald lorsque, affirmant que l'apport scientifique de l'analyse, indispensable par ailleurs, se borne à permettre d'équilibrer les formules décrivant les réactions chimiques, il l'appelle la servante de la chimie. Ainsi Charlot et Rosset écrivent (*Encyclopædia Universalis* France, 1989) : « L'analyse chimique [...] ne constitue qu'une partie de la chimie analytique, cette dernière, avec les mêmes moyens, a pour but non seulement de déterminer la structure des composés, mais d'analyser les phénomènes, en particulier les réactions chimiques et électrochimiques. [...] Par rapport aux autres branches de la chimie la chimie analytique joue le rôle d'auxiliaire. »

La fin du xx^e s. L'analyse phare et arbitre

Depuis le milieu du xx^e s. la nature des informations souhaitées a beaucoup évolué. On ne veut plus simplement une composition globale moléculaire ou élémentaire, on cherche la conformation, l'état chimique des espèces analysées. Dans les solides, on veut localiser les impuretés en surface, aux joints de grains, en profondeur avec une précision à l'échelle du millièmeter de millimètre. On identifie des atomes isolés sur des surfaces avec les microscopes à effet de champ. Pour les besoins de l'électronique, du nucléaire, de l'environnement, de la biologie, on dose certaines impuretés en parties par trillion (le millièmeter de milliardième), alors que « le pour mille » était la limite. En biologie, établir la séquence des bases attachées à l'acide désoxyribonucléique est une tâche majeure. On identifie des structures organiques en quelques minutes au lieu de plusieurs semaines, etc. Tout cela a été rendu possible par un arsenal de moyens accru. Ainsi, dans un article datant de 1995, on ne comptait pas moins de onze méthodes différentes de détection à distance d'explosifs.

Les nouvelles méthodes sont des séparations chimiques telles que les chromatographies, mais ce sont surtout les méthodes physiques utilisant les rayonnements électromagnétiques, des rayons X à l'infrarouge lointain, les réactions nucléaires ; la moitié environ des méthodes de détermination qui sont étudiées dans les traités généraux d'analyse récents ne sont pas chimiques. On utilise aussi des enzymes pour des analyses fondées sur des cinétiques de réaction, et des capteurs biologiques pour des détections de certaines traces. On prétend égaliser les performances des « nez » pour la reconnaissance des parfums. En plus des déterminations directes on fait précéder l'analyse de calculs destinés à optimiser le choix des méthodes et, si nécessaire, la combinaison de plusieurs. Il faut assurer la représentativité de ce qui est analysé par rapport à l'information recherchée, d'où une théorie de l'échantillonnage, en particulier lorsqu'il s'agit d'établir des valeurs caractérisant des ensembles d'objets. En effet, plus du tiers des résultats insatisfaisants sont attribués non aux déterminations au stade du laboratoire, mais à la mauvaise représentativité des échantillons. L'utilisation de moyens informatiques pour commander les appareils, devenus parfois des « boîtes noires », a automatisé des procédures et augmenté la vitesse et la répétabilité des analyses, mais d'autres calculs suivent l'analyse proprement dite : la transformée de Fourier est souvent utilisée pour le traitement mathématique des signaux fournis par les appareils, la précision et la justesse des résultats sont évaluées en se servant d'échantillons de référence et des méthodes de la métrologie, de comparaisons entre laboratoires et en utilisant des outils statistiques de plus en plus raffinés.

Devant cette situation deux tendances se font jour. L'une consiste à étendre le concept de chimie analytique à l'ensemble des opérations et méthodes conduisant à l'obtention de résultats d'analyse. C'est le parti

pris par la Commission de chimie analytique (WPAC) de la Fédération européenne des sociétés chimiques (FECS). Elle a suscité un concours pour définir à nouveau la chimie analytique ; les meilleures contributions ont paru dans le *Frésenius Journal of Analytical Chemistry* (vol. 343, n° 11, 1992), et elle a adopté la phrase suivante : « La chimie analytique est une discipline scientifique qui développe et applique des méthodes, des instruments et des stratégies pour obtenir des informations, qui peuvent être locales et temporelles, sur la composition de la matière. » L'alternative est de changer le nom donné à cette discipline. C'est ce qu'ont fait le *Journal of analytical sciences* au Japon, ou le Symposium on Analytical Sciences en Europe.

S'ils hésitent sur le nom à donner à leur activité, c'est que les analystes pensent que leur rôle est mésestimé, car ce n'est pas à la branche servante de la chimie d'Ostwald que font penser leurs symposiums quand ils s'intitulent : « Rôle de la chimie analytique dans le développement national », ou « La chimie analytique à la recherche de la vérité ». En effet, à la manière d'un phare, l'analyse met en lumière des problèmes insoupçonnés, et conduit à des découvertes importantes. Le cas le plus typique, peut-être, est celui des vérifications d'étalons de composition isotopique d'uranium qui ont mené à l'extraordinaire conclusion que des réactions nucléaires en chaîne avaient eu lieu dans la nature il y a deux milliards d'années, ceci 53 ans après la découverte de la fission, due aussi à l'analyse. D'autre part, le rôle d'arbitre que l'analyse a toujours eu en chimie et dans des litiges commerciaux s'est étendu aux hypothèses scientifiques en de nombreux domaines. Si elle met au point des méthodes pour lever ou confirmer des soupçons de fraude, par exemple pour déceler l'origine des vins ou leur taux de chaptalisation, elle permet de retracer les courants commerciaux de l'Antiquité, ou d'étudier les paléoclimats. En astronomie, des anomalies de composition isotopique du bore dans des météorites remettent en cause les schémas admis de formation des éléments. L'analyse, arbitre et phare, n'est plus tout entière une discipline de chimiste bénéficiant à la seule chimie.

► BURNS D. Th., *Some aspects of the history of education in analytical chemistry*, published syllabi and their authors : Shaw (1734), Watson (1771), Moyes (1784, 1786), Sullivan (1856), Frésenius J. Aal. Chem. 347, 17 (1997). — CHARLOT G., *Chimie analytique quantitative*, Paris, Masson, 1984. — FRESSENIUS C. REMIGIUS, *Anleitung zur Quantitativen Chemischen Analyse*, Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1875. — NINISTO L., « Analytical chemistry in Europe : its development and present status », *Trends in analytical chemistry*, vol. 12, n° 7, 1993, p. IV-VIII. — OSTWALD W., *Grundlagen der analytischen chemie*, Verlag von Theodor Steinkopff, Dresden und Leipzig, 1917. — PARTINGTON J.R., *A History of Chemistry*, Londres, Macmillan, 1964. — ROTH E., « Highlights in the history of analytical chemistry in France », in ROTH E. dir., *Euroanalysis*, VI, Les Ulis, Editions de Physique, 1988. — SZABADVARY F., *History of analytical chemistry*, trad. Svehla G., Oxford, Pergamon, 1966. — SZABADVARY F.

& ROBINSON A., « The history of analytical chemistry », in SVEHLA G. dir., *Comprehensive analytical chemistry*, vol. X, Amsterdam, Elsevier, 1980, p. 61-282.

Étienne ROTH

→ Chimie physique ; Sel ; Synthèse.

ANALYSE COMPLEXE MATHÉMATIQUES

On sait qu'à sa naissance, l'analyse complexe fut contemporaine de la constitution du concept abstrait de fonction numérique et qu'elle suscita l'invention des variétés différentiables ou « surfaces de Riemann » associées aux fonctions multifonnes. À travers l'histoire, le souci de fondamentalité qui naquit en même temps qu'elle a su la délivrer de ses liens provisoires avec les formules concrètes et la transformer en une théorie abstraite qui est à la fois système et analyse.

Les systèmes conceptuels qui sont au fondement des sciences exactes se sont formés par des changements graduels d'anciens systèmes conceptuels et les raisons qui ont engendré de nouveaux modes d'exposition peuvent être réduites à certaines contradictions ou improbabilités qui se sont révélées dans des modes d'exposition antérieurs. C'est donc dans l'analyse des diverses liaisons entre les concepts mathématiques et dans la fécondation réciproque de l'analyse et de la géométrie qu'il faut envisager les sources du développement de l'analyse complexe.

On sait que les nombres complexes, nés dans l'Italie du Cinquecento, sont apparus par miracle à travers la résolution de l'équation algébrique du troisième degré donnée par Tartaglia (1539) puis par Cardan (1547), alors qu'ils eussent pu demeurer enfouis dans les équations du second degré déclarées « impossibles ». Dans son *Algèbre* de 1572, Bombelli invente $\sqrt{-1}$ et donne en un poème resté célèbre les règles algébriques fondamentales auquel il se plie. Poursuivant cette brève évocation historique, on rappellera la naissance remarquablement spéculative du plan complexe qui a été imaginée par Argand. Dans son mémoire de 1806, Argand fit jouer la « nécessité métaphysique » de la dimension deux. Bien que les entiers de Gauss $a + ib$, $a, b \in \mathbb{Z}$, $i = \sqrt{-1}$ préfigurent l'interprétation vectorielle, la voie qu'a empruntée Argand se démarque de l'algèbre. Argand cherche en effet à exprimer un analogue multiplicatif du nombre négatif -1 qui satisfait à l'équation additive $1 + x = -x - 1$, et qui est en cela un « milieu multiplicatif ». À ce nombre -1 correspond un axe négatif répondant à l'axe positif. En y réfléchissant, et à la recherche du même succès, Argand trouve que ce troisième genre de direction qui devrait s'allier à l'idée de nombre imaginaire se dirigerait de telle manière que la direction positive fût à elle comme celle-ci est à la direction négative. Milieu multiplicatif qui satisfait à la proportion $\frac{1}{x} = \frac{x}{-1}$, le

nombre imaginaire se propulsera donc perpendiculairement et latéralement. Il pivotera autour de zéro, à distance égale des positifs et des négatifs : le plan est nécessaire.

En rapports étroits avec l'analyse infinitésimale, l'analyse circonstanciée des fonctions de variable réelle s'est concentrée aux XVIII^e et XIX^e s. sur l'étude des fonctions dites « usuelles » ou « élémentaires ». Du fait qu'elles comprennent les polynômes, le logarithme népérien, la fonction exponentielle, les fonctions trigonométriques et les expressions quelconques composées analytiquement de ces quantités, la théorie des fonctions s'est édifiée d'abord comme une combinatoire différentielle, visant à une classification des fonctions par ordre croissant de complexité. C'est le mathématicien suisse Leonhard Euler qui entreprit la première systématisation de leur diversité dans son *Introduction à l'Analyse des Infiniment petits*, parue en latin en 1748. Une telle multiplicité compositionnelle justifie la dénomination d'analyse mathématique.

Cependant, l'un des traits unificateurs marquants de l'Analyse fut la découverte de la possibilité de représenter les fonctions usuelles par la somme de séries convergentes de la forme $\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n$, lesquelles se prêtent d'une manière uniforme aux opérations arithmétiques. D'où un second sens du terme Analyse : de cette manière, les fonctions usuelles se trouvent décomposées en monômes $a_n (x - x_0)^n$; on les appelle donc fonctions analytiques.

Mais ce point de vue fut rapidement à l'origine de croyances erronées et contradictoires. L'opinion des géomètres sur la possibilité ou l'impossibilité de représenter une fonction arbitraire donnée graphiquement par une série convergente connut plus d'un siècle d'hésitations. L'Analyse devait se trouver alors confrontée à l'élaboration d'une « métaphysique mathématique » adéquate pour décider de cette question, qui avait pris naissance vers le milieu du XVIII^e s., à l'occasion des recherches sur les cordes vibrantes, dont s'occupaient Euler, Bernoulli, d'Alembert et Lagrange. Elle ne fut « résolue » par la négative qu'après la réévaluation des travaux de Bolzano, d'Abel et de Riemann par Weierstrass et par Cantor. Enfin, l'approfondissement de cette question devait susciter un champ immense de recherches, qui ne put se développer véritablement qu'au XX^e s., lorsque furent thématisées les classes de différentiabilité, les espaces de Hilbert, de Sobolev, de Hölder et de Banach.

En vérité, si le rôle des fonctions analytiques reste fondamental dans toutes les mathématiques (l'analyticité ou l'algébricité des objets constitue en effet un paradigme existentiel de la multiplicité qui autorise leur classification possible), il a néanmoins fallu reconnaître, dès le milieu du XIX^e s., l'existence de fonctions bien moins régulières que les fonctions indéfiniment dérivables ou analytiques. On sait que Bolzano, dès 1834, avait séparé le concept de continuité de celui de dérivabilité et qu'il illustre cette séparation au moyen

d'une fonction continue sur un intervalle mais nulle part dérivable. Parce que les travaux de Bolzano ne seront connus qu'à la fin du XIX^e s., c'est à Riemann que l'on doit la première distinction nette entre la continuité et la différentiabilité, laquelle sera formulée dans son mémoire d'habilitation de 1854. L'exemple de Riemann repose sur la série $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(nx)}{n^2}$, où (y)

est une fonction qui dénote la différence entre y et l'entier le plus proche, i.e. (y) = 0 si $2y$ est un entier naturel, (y) = $\pm \inf_{n \in \mathbb{Z}} |y - n|$ sinon. Alors $-1/2 < (x) < 1/2$. La fonction $f(x)$ est une série simplement convergente pour toute valeur de x , mais dont l'ensemble (dense) de points de discontinuité est constitué de la suite des rationnels de la forme $\frac{p}{2q}$, $p, q \in \mathbb{Z}$ premiers entre eux, points où f possède un saut dont la valeur est égale à $\frac{\pi^2}{8q^2}$. Plus célèbre à nos jours

est l'exemple construit par Weierstrass de la fonction $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b^n \cos(a^n \pi x)$, avec $a \in \mathbb{N}$ impair, $a \geq 1$, $0 < b < 1$ et avec $ab > 1 + \frac{3\pi}{2}$, fonction qui est continue mais dont la dérivée n'existe en aucun point. Ces pathologies sont inscrites à dessein dans ces séries, qui ne sont pas des séries de monômes. On appelle encore séries entières les séries de puissances $\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n$ qui sont le modèle local des fonctions analytiques.

Ainsi, contrairement aux fonctions analytiques, celles qui sont seulement continues, voire discontinues, se dérobent par nature à une saisie exhaustive. Il y a une indétermination nécessaire dans l'idée de « fonction arbitraire donnée graphiquement ». Lorsqu'il a été disposé d'une telle fonction sur un intervalle déterminé le mode de son prolongement en dehors de cet intervalle reste tout à fait arbitraire. Enfin, on peut à loisir modifier son graphe, le pincer près d'un point, le pousser sur des intervalles d'une longueur arbitrairement petite, tandis que l'ajout d'un terme $a_n (x - x_0)^n$ ou d'une somme quelconque convergente de tels termes retentit sur la totalité de son graphe. Il faut donc se représenter les fonctions continues arbitraires comme extrêmement plus générales et plus complexes que les fonctions analytiques.

Dans ce vaste univers des fonctions arbitraires, les fonctions analytiques jouissent de propriétés vraiment exceptionnelles. Elles sont étroitement associées à la structure sérielle des sommes convergentes $\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n$ de monômes. De plus, ces propriétés sont, dans le cas analytique complexe (i.e. $a_n, x \in \mathbb{C}$), harmonisées à un degré supérieur par la structure algébrique du corps des nombres imaginaires. L'analyse complexe est la théorie de ces propriétés exceptionnelles, que nous allons suggérer sur quelques exemples élémentaires.

D'une manière générale, le passage à l'étude des

fonctions de variable complexe est indispensable et aussi naturel que le passage du corps des réels à celui, algébriquement clos, des nombres complexes. Par exemple, la fonction $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$ est analytique en tout point de l'axe des réels et pourtant, sa série de Taylor à l'origine $\frac{1}{1+x^2} = 1 - x^2 + x^4 - x^6 + \dots$ = $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n x^{2n}$, $|x| < 1$, cesse de converger pour $|x| > 1$. La cause en est incompréhensible dans le domaine réel : en effet, les points $x_0 = \pm 1$ de divergence de la série n'ont rien de singulier pour $f(x_0) = \frac{1}{2}$. Mais le passage à un domaine complexe explique aussitôt cette situation : le cercle unité $S^1 = \{z = x + \sqrt{-1}y \in \mathbb{C}; |z| = (x^2 + y^2)^{1/2} = 1\}$ contient les points $z_0 = \pm \sqrt{-1}$ en lesquels la fonction $f^c(z) = \frac{1}{1+z^2}$ devient infinie et où la série cesse de converger.

Voici encore un deuxième exemple. La fonction $g(x) = \frac{1}{1-x^2}$ prend des valeurs infinies aux points $x_0 = \pm 1$, ainsi que sa série de Taylor en 0, $\frac{1}{1-x^2} = 1 + x^2 + x^4 + x^6 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} x^{2n}$, $|x| < 1$. Dans l'intervalle $] -1, 1[$, les deux points $x_0 = \pm 1$ semblent alors constituer une limite absolue à l'existence de la fonction, qui resurgit pourtant sur $] -\infty, -1[\cup] 1, \infty[$, avec la même expression algébrique. Mais le passage au plan complexe permet aussitôt de contourner l'obstacle « pôle en x_0 » le long de petits demi-cercles centrés en x_0 et appuyés sur l'axe des réels, et de reconstituer ainsi géométriquement l'homogénéité algébrique de la fonction $g^c(z) = \frac{1}{1-z^2}$. (Néanmoins,

il n'y a aucune raison que les valeurs que l'on obtient en contournant le point x_0 dans le plan complexe « au-dessous » et « au-dessus » de l'axe des réels coïncident : la fonction logarithme autour du point 0 produit une différence de valeurs de $2\pi i$.)

Ainsi, les singularités de la théorie des fonctions analytiques réelles prennent-elles, après complexification $f \mapsto f^c$, ($\mathbb{R} \ni x \mapsto f(x)$) \rightarrow ($\mathbb{C} \ni z \mapsto f(z)$), une allure géométrique entièrement nouvelle. Le point dans le plan complexe est circonscrit, isolable et contournable, provocateur d'autant de greffes circulaires qu'il ne délimite aucune frontière. Mais dans quelle mesure le passage à la théorie complexe est-il nécessaire et universel d'un point de vue spéculatif ? Ce point mérite encore d'être éclairci.

Les exemples précédents introduisent en vérité à trois raisons profondes, à trois faits philosophiques convaincants, qui argumentent chacun en faveur d'une universalité principielle de l'analyse complexe, en tant qu'elle constitue une extension de la théorie des fonctions d'une variable réelle.

Premièrement, les nombres complexes ont pu

apparaître provisoires dans la montée vers l'absolu jusqu'au moment où l'on maîtrisa les enjeux du théorème fondamental de l'algèbre, qui naquit graduellement dans les œuvres de Girard, de Descartes, d'Euler, de Lagrange, de d'Alembert et de Gauss. Tout polynôme $P(z)$ à coefficients complexes de degré $m \geq 1$ admet exactement m racines complexes comptées avec multiplicité. Clôture algébrique universelle des corps de nombres, le corps \mathbb{C} capture donc l'extension algébrique par excellence pour ces « soldats de l'algèbre » que sont les polynômes.

Deuxièmement, le plus étonnant est le célèbre théorème de Frobenius (1878), d'après lequel le corps des nombres complexes fournit la seule extension possible du corps des nombres réels avec préservation des opérations algébriques. (On sait cependant qu'en relaxant la commutativité s'ouvre le monde multiple de la géométrie et de l'analyse non commutatives, partie des mathématiques étroitement liée à la physique quantique.) Par conséquent, si \mathbb{C} est l'horizon algébrique de \mathbb{R} , l'étude des fonctions de variable complexe doit vraisemblablement constituer un univers fonctionnel adéquat pour l'étude des fonctions de variable réelle.

Enfin, du point de vue géométrique, on sait que l'idée cruciale de plan complexe (ou de la bidimensionalité des nombres complexes), absente des premiers travaux de Cauchy, n'apparut que tardivement dans l'histoire, dans les travaux précurseurs d'Argand, de Wessel et de Gauss. Or le plan instaure une géométrie là où l'analyste n'étudiait que des fonctions. Cette idée de plan qui est le support de l'algèbre des nombres imaginaires a inauguré et déployé la première interaction dans l'histoire des mathématiques entre géométrie et théorie fonctionnelle, dont l'approfondissement sans fin constitue l'un des thèmes majeurs des mathématiques contemporaines.

Fonctions analytiques complexes

La conception de fonction analytique selon les idées de Weierstrass (1861) est une conception locale et algébrique. Historiquement postérieure à la conception de Cauchy et de Riemann, elle repose sur l'idée de série convergente. Par définition, une fonction $f(x)$ est analytique au voisinage d'un point x_0 si elle se laisse développer par une série de puissances à coefficients numériques du type $\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n$, qui converge pour tout x près de x_0 . En fait, le concept d'analyticité est suffisamment général pour qu'il soit superflu ici de préciser les domaines d'appartenance de x et des coefficients a_n : le calcul sur ces séries possède en effet un sens sur le corps des réels comme sur le corps des complexes.

Pour fixer les idées, on désignera par x une variable réelle et par $z = x + iy$, $i = \sqrt{-1}$, une grandeur variable complexe, $|x| = \sup(x, -x) = (x^2)^{1/2}$, $|z| = (x^2 + y^2)^{1/2}$. On démontre alors – et c'est élémentaire – qu'une série $\sum_{n=0}^{\infty} a_n Z^n$ ($Z = (x - x_0)$ ou $Z = (z - z_0)$) converge et définit un nombre si et seulement

si la suite infinie des coefficients $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$, $a_n \in \mathbb{R}$ ou $a_n \in \mathbb{C}$ satisfait une majoration du type $|a_n| \leq C(\rho_0)^n$, pour des nombres réels $C > 0$, $\rho_0 > 0$. Autrement dit, la série $\sum_{n=0}^{\infty} a_n Z^n$ converge si elle est contrôlée terme à terme par la série connue

$$\sum_{n=0}^{\infty} C \rho_0^n Z^n = \frac{C}{1 - \rho_0 Z}$$

dont la somme est définie pour $|Z| < \rho_0^{-1}$. En vérité, seule la « queue » de la série infinie influe sur sa convergence, c'est-à-dire le système projectif des restes d'ordre N . $R_N(Z) = \sum_{n \geq N} a_n Z^n$, N arbitrairement grand. En effet, les sommes $S_N(Z) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n Z^n$ existent et sont toujours finies. Ainsi, on démontre aisément que la série converge dans l'ensemble des Z tels que $|Z| < \rho^{-1} = R$ (intervalle de longueur $2R$ si $Z \in \mathbb{R}$, disque de rayon R si $Z \in \mathbb{C}$), où ρ est la borne inférieure des nombres ρ_0 tels que $|a_n| \leq C \rho_0^n$ pour tous n proches de ∞ , i.e. supérieurs à un nombre N non précisé. La théorie des séries convergentes établit alors par le calcul que les fonctions analytiques sont indéfiniment dérivables (terme à terme), s'additionnent, se soustraient, se multiplient, se divisent (sous l'hypothèse de non annulation du dénominateur), se composent et s'inversent (sous des hypothèses naturelles).

Toutefois, la conception de fonction analytique selon les idées de Bernhard Riemann dévoile l'existence de mystères profonds (annoncés *supra*) dans le passage du réel au complexe, qui n'apparaissent plus dans la théorie de Weierstrass.

En 1851, Riemann présente à la Faculté de philosophie de Göttingen sa thèse de doctorat, *Principes fondamentaux pour une théorie générale des fonctions d'une grandeur variable complexe*, qui constitue le premier jalon théorique dans l'histoire de cette science. Si l'on en croit Félix Klein, la grande activité de travail mathématique, qui a eu son point de départ dans l'œuvre de Riemann et qui continue toujours, est uniquement la conséquence de la puissance incomparable de ses conceptions mathématiques, si originales et si profondes. De la thèse de 1851, comme de tous les textes qui lui sont postérieurs, émane une philosophie intrinsèque au développement des mathématiques que l'on peut qualifier de souci dialectique de l'extension des concepts et des liaisons de dépendance mutuelle qu'ils entretiennent entre eux. Les recherches de Riemann partent de concepts généraux, afin d'éviter que le travail ne soit entravé par des vues trop étroites et que le progrès de la connaissance des médiations dans la hiérarchie génératrice des notions ne trouve un obstacle dans les préjugés traditionnels. La base que Riemann a su conférer à l'analyse complexe mérite que l'on s'y attarde et qu'on la restitue.

Partant de l'idée de fonction d'une variable réelle comme grandeur u dépendant d'une grandeur réelle x , Riemann commence, dans sa thèse de 1851, par affirmer qu'une telle définition ne stipule aucune loi entre les valeurs isolées de la fonction, pour retourner

ensuite contre elle cette affirmation de généralité pure. Dans le cas des fonctions continues, il existe en effet des expressions analytiques par lesquelles on peut représenter explicitement une approximation de ces fonctions sur un intervalle donné. En effet, d'après le théorème attribué à Weierstrass et connu d'Euler et de Lagrange, pour toute fonction continue sur l'intervalle $[a, b]$, $a < b$, pour tout $\varepsilon > 0$, il existe un polynôme $P(x) = \sum_{0 \leq j \leq m} a_j x^{m-j}$ tel que $|f(x) - P(x)| < \varepsilon$, $x \in [a, b]$. Il est donc indifférent de définir la dépendance de la grandeur u de la grandeur x comme donnée arbitrairement ou bien comme reposant sur des opérations de calcul déterminées.

Si donc l'on souhaite indiquer ce que l'on devra entendre par fonction arbitraire d'une variable complexe, on pourra prendre comme base la classe des fonctions qui se trouvent définies, par extrapolation, comme les complexifiées de fonctions $f(x)$ de variable x , classes de fonctions où l'expression « fonction de $z = (x + iy)$ » contient un génitif approché et valable « à la limite ». Car ce génitif est déterminé dans le cas de polynômes $P(x) = \sum_{0 \leq j \leq m} a_j x^{m-j}$, pour lesquels P « de z désigne bien évidemment $P(z) = \sum_{0 \leq j \leq m} a_j z^{m-j}$.

Or, une grandeur arbitraire $w = u + iv$ dépendant de valeurs complexes $x + iy$ ne dépend pas forcément de z , mais peut dépendre tout aussi bien de $\bar{z} = x - iy$. En vérité, une telle fonction quelconque w dépend des deux variables x et y . Elle s'écrit indifféremment $\tilde{w}(z, \bar{z})$ ou $w(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$, puisque $x = (z + \bar{z})/2$ et $y = (z - \bar{z})/2i$. Ainsi, il est possible d'écrire la différentielle réelle de $w(x, y)$, $dw(x, y) = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + i \left(\frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \right)$ au moyen des différentielles $dz = dx + idy$ et $d\bar{z} = dx - idy$ et des opérateurs de dérivation définis par $\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} - i \frac{\partial f}{\partial y} \right)$ et $\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} + i \frac{\partial f}{\partial y} \right)$. On obtient $dw(x, y) = \frac{\partial w}{\partial z} dz + \frac{\partial w}{\partial \bar{z}} d\bar{z}$ et si

l'on définit les opérateurs ∂ et $\bar{\partial}$ par $\partial f = \frac{\partial f}{\partial z} dz$ et $\bar{\partial} f = \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} d\bar{z}$, on peut écrire $d = \partial + \bar{\partial}$. Maintenant, si la grandeur w est composée par une combinaison d'opérations élémentaires du calcul, la dérivée $\frac{\partial w}{\partial z}$ sera toujours indépendante de la différentielle dz . Elle est égale à $P'(z) = \sum_{0 \leq j \leq m-1} a_j (m-j) z^{m-j-1}$, si la grandeur $w = P(z)$ est polynomiale. En effet, $\lim_{h \rightarrow 0} ((z+h)^k - z^k)/h = kz^{k-1}$ coïncide formellement avec $\frac{\partial z^k}{\partial z}$, qui vaut donc kz^{k-1} , comme dans le cas où $z = x$ est une variable réelle.

Il est donc évident, en admettant le raisonnement

d'extrapolation précédent (dont la légitimité n'est pas établie) que $w(x, y)$ ne pourra être une fonction « de z » qu'à la condition que le terme de droite dans l'équation s'annule, i.e. $\frac{\partial w}{\partial \bar{z}} = 0$, ce qui s'écrit aussi $\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} + i \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0$. Réciproquement, si cette condition différentielle est satisfaite, on s'aperçoit qu'elle exprime que w ne dépend pas de \bar{z} . En ayant soin de notifier le saut et l'absence de justification complète dans ce raisonnement, Riemann prendra comme point de départ cette indépendance et énonce par conséquent la définition fondamentale : Une grandeur variable complexe w est dite une fonction d'une autre grandeur variable complexe z lorsqu'elle varie avec elle de telle sorte que la valeur de la dérivée $\frac{dw}{dz}$ est indépendante de la valeur de la différentielle dz , i.e. si $w = u + iv$ satisfait aux équations dites de Cauchy-Riemann,

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \text{ et } \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0.$$

Elles sont équivalentes à l'équation $\frac{\partial w}{\partial \bar{z}} = 0$, signifiant

précisément que w ne dépend pas de \bar{z} . Par convention, on notera $f(z)$ la dépendance de w par rapport à z et on appellera holomorphes les fonctions qui satisfont $\frac{\partial f(z)}{\partial \bar{z}} = 0$. Si $\omega \subset \mathbb{C}$ est ouvert, $\mathcal{O}(\omega)$ désignera l'algèbre des fonctions holomorphes sur ω .

Ce passage marque un tournant historique et conceptuel majeur dans la théorie des fonctions, provoquant l'intervention des techniques de la théorie des équations aux dérivées partielles et de la théorie du potentiel (en mathématiques et en physique), par ses relations étroites avec les fonctions harmoniques de deux variables. Mais le phénomène le plus spectaculaire de la théorie va être que la seule formulation de la définition précédente rend *ipso facto* la fonction $w = p(f(z))$ développable en série entière ; ou encore, la seule existence de la dérivée première $\frac{dw}{dz}$ la rend infiniment

dérivable et même analytique. Le destin de la théorie à une variable aura été marqué par l'usage de formules intégrales, dites « de Cauchy » (voir *infra*), mais le passage à plusieurs variables a conduit au XX^e s. à l'étude des opérateurs aux dérivées partielles elliptiques $\mathcal{A}(x, y, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$, dont $\frac{\partial}{\partial \bar{z}}$ ou $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = 4 \frac{\partial^2}{\partial z \partial \bar{z}}$ sont des exemples, et qui ont la propriété d'être très réguliers : Toute solution g de $\mathcal{A}g = f$ est C^∞ si le second membre f l'est.

L'outil le plus adéquat pour l'étude des fonctions holomorphes reste la formule intégrale de Cauchy, qui semble être la formule-clé de l'analyse complexe, d'où se déduisent ladite propriété et tous ses éléments fondamentaux.

Représentation de Cauchy

Dans les paragraphes suivants, partant d'une formule générale valable pour toute fonction différentiable (et pas forcément holomorphe), nous allons en déduire la formule de Cauchy (voir [4] *infra*). De cette formule intégrale presque « magique » jailliront alors les propriétés exceptionnelles des fonctions holomorphes que nous allons dévoiler succinctement en respectant leur harmonie logique.

Le théorème général dont nous partons est appelé formule de Cauchy-Green. Soit $\omega \subset \mathbb{C}$ un ouvert dont le bord $\partial\omega$ est une réunion finie de courbes différentiables (C^1) par morceaux. Ici, $\partial\omega$ est orienté de telle sorte que ω se situe à gauche de $\partial\omega$. Si $f \in C^1(\bar{\omega}, \mathbb{C})$ est une fonction de classe C^1 sur $\bar{\omega} = \omega \cup \partial\omega$ ($f(x, y)$ différentiable par rapport à x et à y), on a la formule de Stokes :

$$(1) \quad \int_{\partial\omega} f(\eta) d\eta + \int_{\omega} \partial f \bar{\partial} \eta d\eta \wedge d\bar{\eta} = 0.$$

Ici, la forme différentielle $d\eta \wedge d\bar{\eta} = -2i d\eta_1 \wedge d\eta_2$, $\eta = \eta_1 + i\eta_2$ doit être entendue comme un élément différentiel de surface (au sens des physiciens et orienté) « $d\eta_1 d\eta_2$ », par rapport auquel on intègre une fonction ou une densité. La formule précédente est tout simplement l'analogie bidimensionnel de la formule (tauto-

logique) de Taylor intégrale, $f(b) - f(a) = \int_a^b \frac{\partial f}{\partial u} du = 0$, pour toute fonction $f \in C^1([a, b], \mathbb{R})$. Sa démonstration repose sur la théorie des fonctions de variable réelle : il suffit de découper ω en bandes parallèles à l'axe des x et d'appliquer la formule de Taylor intégrale sur chaque bande.

Si f satisfait aux équations de Cauchy-Riemann, autrement dit si $\partial f \bar{\partial} \eta = 0$ dans ω , c'est-à-dire $f \in \mathcal{O}(\omega)$ on en déduit (voir éq. (1)) la première formule de Cauchy,

$$(2) \quad \int_{\partial\omega} f(\eta) d\eta = 0.$$

En désignant maintenant un point spécial $z \in \omega$, on peut l'isoler en traçant un cercle $\gamma(z, \varepsilon) = \partial D(z, \varepsilon)$ de centre z et de rayon $\varepsilon > 0$, bord d'un disque $D(z, \varepsilon)$, et appliquer la formule (1) à l'ouvert $\omega_1 = \omega - D(z, \varepsilon)$, de bord $\partial\omega_1 = \partial\omega \cup \gamma(z, \varepsilon)$, et à la fonction $\frac{f(\eta)}{\eta - z}$ au lieu de $f(\eta)$, faire tendre enfin ε vers zéro — telle est la recette —, pour en déduire la formule de Cauchy-Green :

$$(3) \quad f(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_{\partial\omega} \frac{f(\eta)}{\eta - z} d\eta + \frac{1}{2i\pi} \int_{\omega} \frac{\partial f \bar{\partial} \eta(\eta)}{\eta - z} d\eta \wedge d\bar{\eta}.$$

(La fonction $(\eta - z)^{-1}$ est intégrable par rapport à la mesure de Lebesgue sur le plan complexe. Le terme $f(z)$ vient de la limite, quand $\varepsilon \rightarrow 0$, de $\frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma(z, \varepsilon)} \frac{f(\eta)}{\eta - z} d\eta$. Enfin, $\int_{D(z, \varepsilon)} \frac{\partial f \bar{\partial} \eta}{\eta - z}$ s'évanouit quand $\varepsilon \rightarrow 0$.)

Si f satisfait aux équations de Cauchy-Riemann,

c'est-à-dire si $\partial f/\partial \bar{\eta} \equiv 0$ sur ω , on en déduit la deuxième formule de Cauchy :

$$(4) \quad f(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_{\partial\omega} \frac{f(\eta)}{\eta - z} d\eta$$

La valeur de f en un point $z \in \omega$ est déterminée par l'intégrale sur la frontière $\partial\omega$ des valeurs de $f(\eta)/(\eta - z)$.

La même formule vaut pour tout domaine $\omega_1 \subset \omega$, à bord $\partial\omega_1$ de classe C^1 par morceaux, si $z \in \omega_1$. En particulier, pour $\omega_1 = D(a, r) \subset \omega$ un disque de centre $a \in \omega$ et de rayon $r > 0$, contenu dans ω , de bord le cercle $\gamma(a, r)$. La formule (4) s'écrit alors

$$(5) \quad f(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma(a, r)} \frac{f(\eta)}{\eta - z} d\eta$$

et c'est la formule intégrale de Cauchy locale.

L'une des premières conséquences de (5) est le principe du maximum du module : le module $|f|$ d'une fonction holomorphe $f \in \mathcal{O}(\omega)$ non constante ne peut avoir de maximum local en aucun point $a \in \omega$. Sinon, si $|f(z)| < |f(a)|$ pour tout $z \in D(a, \varepsilon) \subset \omega$, $\varepsilon > 0$, $z \neq a$, on a (posant $\eta = a + \varepsilon e^{i\theta}$, $d\eta = i\varepsilon e^{i\theta} d\theta$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$) :

$$|f(a)| = \left| \frac{1}{2i\pi} \int_0^{2\pi} f(a + \varepsilon e^{i\theta}) d\theta \right| \leq \sup_{\eta \in \gamma(a, \varepsilon)} |f(\eta)| < |f(a)|,$$

ce qui est contradictoire. L'énoncé est valable pour le minimum (au lieu du maximum) de $|f|$ lorsque f ne s'annule pas dans ω (en effet, $\sup 1/|f| = \inf |f|$). Ainsi, le graphe $\Gamma_f = \{(z, |f(z)|) \in \omega \times \mathbb{R}^+\}$ de $|f|$ au-dessus de ω ne possède que des « points-selle » aux points $(a, |f(a)|)$ tels que $|f(a)| \neq 0$. Enfin, il en découle que $\sup_{z \in \partial\omega} |f(z)| = \sup_{z \in \omega} |f(z)|$ et $\inf_{z \in \partial\omega} |f(z)| = \inf_{z \in \omega} |f(z)|$: les extrema de $|f|$ sont situés sur le bord de ω . Ce sont typiquement les intuitions de la théorie du potentiel qui se prolongent dans la formule de Cauchy.

On déduit aussi de (5) l'analyticité locale des fonctions holomorphes. Soit $a \in \omega$. Après une translation $z \mapsto z - a$, on peut supposer $a = 0$. Dans la formule de Cauchy

$$f(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma(0, r)} \frac{f(\eta)}{\eta - z} d\eta, \quad \text{si } z \in D(0, r), \quad \eta \in \gamma(0, r),$$

on a $|\eta| = r > |z|$. On peut donc écrire $(\eta - z)^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} z^k \eta^{-k-1}$, d'où un développement en série entière de f :

$$f(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma(0, r)} f(\eta) \left(\sum_{k=0}^{\infty} z^k \eta^{-k-1} \right) \frac{d\eta}{\eta} \\ = \sum_{k=0}^{\infty} z^k \left(\frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma(0, r)} f(\eta) \eta^{-k-1} \frac{d\eta}{\eta} \right) =: \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$$

avec, directement, $|a_k| \leq \sup_{0 \leq \theta \leq 2\pi} |f(re^{i\theta})| r^{-k}$: ce sont les inégalités de Cauchy (ici, $r \leq \text{dist}(z, \partial\omega)$). On en déduit aussi le théorème de Liouville : Toute fonction holomorphe bornée sur \mathbb{C} est constante. En effet, $r^{-k} \rightarrow 0$ lorsque $r \rightarrow \infty$, si $k \geq 1$, donc $f \equiv a_0$. Et aussi le théorème fondamental de l'algèbre : Tout polynôme $P(z) = \sum_{0 \leq j \leq m} a_j z^{m-j}$, $m \in \mathbb{N}$, $a_j \in \mathbb{C}$, de degré $m \geq 1$, admet une racine complexe. Sinon, $1/P(z)$ est

holomorphe bornée sur \mathbb{C} , donc constante par Liouville, ce qui n'est pas !

Ainsi, la formule de Cauchy (4)-(5) délivre sans effort un faisceau d'informations remarquables sur les fonctions holomorphes. Réciproquement, étant donné une fonction $f(\eta)$ intégrable sur $\partial\omega$, il est clair que la

fonction qui à $z \in \omega$ associe $\frac{1}{2i\pi} \int_{\partial\omega} \frac{f(\eta)}{\eta - z} d\eta$ est holomorphe en z . La réciproque de (2) existe aussi, et c'est le théorème de Morera (1889) : Si une fonction f continue dans ω est telle que $\int_{\gamma} f(\eta) d\eta = 0$, pour tout contour $\gamma \subset \omega$, alors $f \in \mathcal{O}(\omega)$.

Théorie des résidus

Dans la formule de Cauchy, les conditions relatives à l'existence d'une dérivée $\frac{df}{dz}$ ne jouent plus le premier

rôle, mais puisque les ombres invisibles $\int_{\partial\omega} \frac{\partial f/\partial \bar{\eta}(\eta)}{\eta - z} d\eta \wedge d\bar{\eta}$

de (3)-(4) s'annulent pour tout ouvert $\omega_1 \subset \omega$, nous sommes entraînés dans un nouveau champ d'intuitions géométriques. En considérant la différence de (4) écrite pour ω et pour $\omega_1 \subset \omega$, nous sommes placés devant la nécessité d'inventer une nouvelle géométrie de Chasles bidimensionnelle sur les contours qui rende compte conceptuellement de l'égalité $\int_{\partial\omega} \frac{f(\eta)}{\eta - z} d\eta - \int_{\partial\omega_1} \frac{f(\eta)}{\eta - z} d\eta = 0$.

(On sait que la géométrie différentielle a conquis la généralité maximale pour cette nouvelle géométrie, à travers la célèbre formule de Stokes $\int_{\Sigma} d\varphi = \int_{\partial\Sigma} \varphi$, qui, si $d\varphi = 0$, entraîne $\int_{\partial\Sigma} \varphi = \int_{\Sigma - \Sigma'} d\varphi = 0$: L'extension géométrique de $\Sigma - \Sigma'$ s'évanouit du point de vue fonctionnel (relativement à φ). Ici, φ est une forme différentielle, Σ est une variété singulière à bord $\partial\Sigma$ plongée dans une variété différentiable M et la formule est valable en toute dimension. Dans notre cas,

$$\Sigma = \omega, \quad d(fdz) = (\partial + \bar{\partial})(fdz) = \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} dz \wedge d\bar{z} = 0$$

si $f \in \mathcal{O}(\omega)$.)

On a vu que tout ouvert ω instaure l'espace virtuel des bords d'ouverts $\partial\omega$, qu'il contient, comme autant de lacets découpés dans sa matière géométrique amorphe et traversable, extension vide ou éther holomorphe. Plus généralement, on est conduit à introduire l'espace des chaînes à coefficients entiers $\gamma = \sum_{j=1}^m n_j \gamma_j$ de lacets $\gamma_j : S^1 \rightarrow \omega$ orientés, $n_j \in \mathbb{Z}$, tracés dans l'ouvert. Ici, γ_j est une application différentiable définie sur le cercle unité S^1 et on note par abus γ_j l'image $\gamma_j(S^1)$ héritant de l'orientation naturelle de S^1 . Par exemple, un ouvert comme celui qui intervient dans la formule de Cauchy-Green, s'il est borné et connexe, est généralement bordé par un bord extérieur $\gamma_0(S^1)$ orienté dans le sens trigonométrique et m « trous » $\gamma_1(S^1), \dots, \gamma_m(S^1)$, orientés dans le sens inverse, c'est-à-dire le sens des aiguilles d'une montre. L'espace des chaînes ne fait qu'amener à l'existence la

généralisation des bords d'ouverts adaptée au calcul de l'intégrale $\int_{\gamma} f(\eta) d\eta$, qui est par définition égale à

$$\sum_{j=1}^m n_j \int_{\gamma_j} f(\eta) d\eta = \sum_{j=1}^m n_j \int_0^{2\pi} f(\gamma_j(e^{i\theta})) \gamma_j'(e^{i\theta}) i e^{i\theta} d\theta.$$

(Pour ce calcul, les lacets peuvent fort bien se recouper ; les chaînes sont plus générales que les bords de domaines différentiables par morceaux.) L'idée de traversée fantôme de l'étendue géométrique s'incarne alors dans le concept mathématique d'homotopie entre lacets, ou entre chaînes, dont le rôle est d'atteindre l'égalité

$$\int_{\gamma} f(\eta) d\eta = \int_{\gamma'} f(\eta) d\eta$$

à travers l'annulation dans (1) du terme $\int \partial f/\partial \bar{\eta}(\eta) d\eta \wedge d\bar{\eta}$: dans le cas des bords d'ouverts, on a vu que l'égalité $\partial(\omega - \omega_1) = \partial\omega - \partial\omega_1$, dans l'espace des chaînes faisait l'affaire : en général, l'égalité (1) montre que $\int_{\gamma} f(\eta) d\eta = \int_{\gamma'} f(\eta) d\eta$ si la chaîne γ , est une petite déformation de γ' dans ω , c'est un résultat technique naturel. Il est même facile de le voir : on se ramène au cas d'un seul lacet par linéarité, et alors γ et γ' bordent un ouvert ω' sur lequel $\int_{\partial\omega'} \partial f/\partial \bar{\eta}(\eta) d\eta \wedge d\bar{\eta} = 0$. Alors, par définition, deux lacets ou chaînes γ et γ' seront dits homotopes s'il existe une famille continue à un paramètre de lacets ou chaînes γ_t , tracés dans ω , $0 \leq t \leq 1$, telle que $\gamma|_{t=0} = \gamma$ et $\gamma|_{t=1} = \gamma'$. Dans ces conditions, le théorème généralisé de Cauchy est vrai et il s'énonce : Si les chaînes γ et γ' sont homotopes, $\int_{\gamma} f(\eta) d\eta = \int_{\gamma'} f(\eta) d\eta$. En effet, pour $0 \leq t, u \leq 1$ proches, γ_t et γ_u délimitent un domaine orienté $\omega_{t,u}$ multiple au-dessus de \mathbb{C} pour lequel $\int_{\partial\omega_{t,u}} \partial f/\partial \bar{\eta}(\eta) d\eta \wedge d\bar{\eta} = 0$ en comptant toutes les contributions. De proche en proche, l'égalité vaut donc pour les deux chaînes homotopes.

Les chaînes sont donc rangées dans des compartiments étanches et tout nombre $\int_{\gamma} f(\eta) d\eta$ dépend seulement de la classe d'homotopie de γ et donne un renseignement sur la topologie du domaine. On peut voir ainsi intervenir les propriétés structurales de connexion simple ou multiple relatives à la topologie du domaine de base ω . Si par exemple $\omega = D(0, 1) \setminus \{0\}$ est le disque unité épointé, un lacet qui fait une fois le tour de 0 n'est pas homotope à un lacet qui en fait deux fois le tour. Un domaine ω est dit simplement connexe si tout les lacets sont homotopes à un lacet constant. Il est dit m -connexe, $m \geq 0$, si m est le nombre minimal de rétrosections qu'il faut tracer pour le rendre simplement connexe. Par rétrosection, on entend un arc qui va du bord au bord du domaine.

Ce qui est remarquable en l'occurrence, c'est que l'étude structurale des propriétés algébriques de l'application $(f, \gamma) \mapsto \int_{\gamma} f(\eta) d\eta$, définie sur les classes d'homotopie de l'espace des chaînes, permet de reconstituer les propriétés topologiques du domaine ω , ou d'une surface de Riemann S . Pour illustrer l'interaction entre géométrie d'un domaine de référence et

structure de l'espace de fonctions holomorphes qu'il supporte, nous allons nous contenter d'évoquer le théorème des résidus.

Pour tout point $z \in \omega$ et tout lacet $\gamma : S^1 \rightarrow \omega$, on définit l'indice de γ par rapport à z comme étant « le nombre orienté de fois que γ tourne autour de z » et on le note $\text{Ind}(\gamma; z)$. Comme cet invariant intuitif est évidemment un invariant d'homotopie de $\mathbb{C} - \{z\}$, il suffit, pour le définir rigoureusement, et pour le deviner géométriquement, de choisir une déformation γ_1 de γ dans $\mathbb{C} - \{z\}$ qui s'enroule autour de z en demeurant sur un cercle de centre z et de rayon $\varepsilon > 0$ et de compter alors le nombre de tours positifs moins le nombre de tours négatifs de γ_1 autour de z . Les boucles de γ qui sont retenues par d'éventuels « trous » de ω situés au loin sont sans influence sur $\text{Ind}(\gamma; z)$. Aussi, cet indice peut être défini analytiquement par l'intégrale

$$\text{Ind}(\gamma; z) = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma} \frac{d\eta}{\eta - z}$$

La démonstration découle des indications précédentes.

La théorie des résidus répond au problème du calcul explicite d'intégrales de fonctions holomorphes sur des chaînes, lorsque le domaine ω d'existence est donné par $\omega = \Omega - \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$, où Ω est un ouvert simplement connexe de \mathbb{C} et q_1, \dots, q_m sont des points distincts de Ω . Il en est ainsi pour quasiment toutes les fonctions usuelles, algébriques, elliptiques, fonction Gamma, fonctions hypergéométriques de Gauss, fonctions de Bessel, Legendre, Jacobi, etc. Le théorème des résidus fait naturellement intervenir la notion d'indice d'une courbe par rapport à un point.

Pour traiter d'abord le cas $m = 1$, soit $q = 0$, soit $f \in \mathcal{O}(D(0, 1) - \{0\})$ une fonction holomorphe dans un disque épointé, soit $\gamma = \gamma(0, \varepsilon)$ le cercle de centre 0 et de rayon $\varepsilon > 0$, $0 < \varepsilon < 1$, et posons $a_k = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma(0, \varepsilon)}$

$f(\eta) \eta^{-k-1} d\eta$. D'après le théorème de Cauchy, a_k ne dépend pas de ε . De plus, $|a_k| \leq M_{\varepsilon} \varepsilon^{-k}$, où $M_{\varepsilon} = \sup_{|z|=\varepsilon} |f(z)| < \infty$, inégalité qui dépend de ε : nous allons l'exploiter. Fixons $z \in D(0, 1) - \{0\}$, choisissons $\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon > 0$ tels que $\varepsilon_1 < |z| < \varepsilon$ et considérons la série $\sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k z^k = \sum_{k=-\infty}^{-1} a_k z^k + \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$. Sa queue négative (resp. positive) est majorée par la série $M_{\varepsilon_1} \sum_{k=-\infty}^{-1} (|z|/\varepsilon_1)^k$ (resp. $M_{\varepsilon} \sum_{k=0}^{\infty} (|z|/\varepsilon)^k$), qui convergent toutes deux. La fonction $\sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k z^k$ est donc définie et holomorphe dans $D(0, 1) - \{0\}$, et comme à $\frac{\partial f}{\partial z}$ serait associée par le même calcul la

série $\sum_{k \in \mathbb{Z}} (1+k) a_k z^k$, on voit que $\frac{\partial}{\partial z} (f - \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k z^k)$ est identiquement nulle. On en déduit le développement de f en série de Laurent (1838) :

$$f(z) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \left(\frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma(0, \varepsilon)} f(\eta) \eta^{-k-1} d\eta \right) z^k.$$

Maintenant, et tautologiquement :

$$a_{-1} = \frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma} f(\eta) d\eta = \sum_{k \in \mathbb{Z}} a_k \int_{\gamma} \frac{1}{2i\pi} \eta^k d\eta = a_{-1},$$

puisque, pour tout $l \in \mathbb{Z}$ différent de -1 , on a $\frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma} \eta^l d\eta = 0$.

Ainsi, l'intégrale de f le long de γ ne conserve que le résidu $\text{Res}(f; 0) = a_{-1}$, qui est le coefficient devant le terme spécial $\frac{1}{z}$ de son développement en série de Laurent.

Évidemment, on aura $\frac{1}{2i\pi} \int_{\gamma} f(\eta) d\eta = \text{Ind}(\gamma; 0) \text{Res}(f; 0) = \text{Ind}(\gamma; 0) a_{-1}$ pour une chaîne γ quelconque tracée dans $D(0,1) - \{0\}$.

Le théorème des résidus s'énonce alors dans le cas général : Soit $\omega = \Omega - \{q_1, \dots, q_m\}$ un domaine simplement connexe épointé de m points q_i distincts, soit $f \in \mathcal{O}(\omega)$ et soit γ une chaîne tracée dans ω . Alors

$$\int_{\gamma} f(\eta) d\eta = 2i\pi \sum_{k=1}^m \text{Ind}(\gamma; q_k) \text{Res}(f; q_k)$$

donne la valeur explicite de l'intégrale de f prise sur γ .

Ce théorème inaugure un principe de calcul uniforme pour des intégrales exceptionnelles qui échappaient par nature aux méthodes réelles, telles que

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin x}{x} dx = \pi, \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-2imx}}{x^2 + a^2} dx = \frac{\pi}{a} e^{-2\pi m|a|},$$

$$\int_0^{\infty} \frac{x^{\alpha-1}}{x+1} dx = \frac{\pi}{\sin \pi \alpha}, 0 < \alpha < 1, \int_0^{\infty} \frac{x^{\alpha-1} \text{Log } x}{x+1} dx = -\pi^2 \frac{\cos \pi \alpha}{\sin^2 \pi \alpha}, \text{ etc.}$$

En jetant ses filets dans le plan complexe, l'analyste repêche donc les singularités qui orchestrent l'harmonie secrète et comme résiduelle des fonctions holomorphes.

► AHLFORS L., *Complex Analysis*, New York, McGraw-Hill, 1963. — BOURBAKI N., *Éléments d'histoire des mathématiques*, Paris, Hermann, 1960. — CARTAN H., *Théorie élémentaire des fonctions analytiques d'une ou plusieurs variables complexes*, Paris, Hermann, 1961. — CHABAT B., *Introduction à l'analyse complexe*, Moscou, Mir, 2 vol., 1990. — CHATELET G., *Les enjeux du mobile*, Paris, Le Seuil, 1993. — DIEUDONNÉ J., *Calcul infinitésimal*, Paris, Hermann, 1968. — HERMÉ M., *Les fonctions analytiques*, Paris, PUF, 1982. — HILLE E., *Analytic function theory*, Boston, Ginn & Co, 1959. — LAUTMAN A., *Essai sur les notions de structure et d'existence en mathématiques*, Paris, Hermann, 1938. — RIEMANN B., *Œuvres mathématiques de Riemann (Gesammelte mathematische Werke)* (1892), trad. L. Laugel, Paris, 1895, repr. en fac-similé, Paris, Gabay, 1991. — RUDIN W., *Real and Complex Analysis*, New York, McGraw-Hill, 1970. — SAKS S. & ZYGMUND A., *Fonctions analytiques*, Paris, Masson, 1970. — VALIRON G., *Cours d'analyse mathématique*, Paris, Masson, 2 vol., 1955. — WEYL H., *The concept of a Riemann surface*, Londres, Addison-Wesley, 1964.

Joël MERKER

→ Analyse et synthèse ; Géométries ; Local et global ; Structure ; Topologie.

ANALYSE DIOPHANTINNE

L'expression « analyse de Diophante », déjà utilisée par Lagrange, et, plus tard, « analyse diophantienne », désigne aujourd'hui plusieurs chapitres, dont certains n'ont effleuré ni Diophante, ni même Lagrange. « Équations diophantiennes », « géométrie diophantienne », « approximations diophantiennes »..., ces chapitres sont liés à la théorie des nombres et à la géométrie algébrique. On note donc que cette recherche, tout à fait moderne, a reçu en baptême le nom du mathématicien de l'Antiquité tardive : Diophante. Emprunt arbitraire ? assurément non. Qu'une recherche moderne soit ainsi investie du prestige de l'histoire, c'est certes vrai ; mais il y a des raisons plus profondes, on le verra plus tard. Qui est Diophante, et quelle est cette œuvre revendiquée au long d'immenses prolongements ?

Notre connaissance de la vie de Diophante reste pauvre, et même ses dates demeurent incertaines. On sait seulement qu'il s'agit d'un Alexandrin, dont la vie s'écoula probablement entre le I^{er} et le III^e s., et dura, si l'on en croit un célèbre épigramme de l'*Anthologie Palatine* attribué à Métrodore de Byzance (IV^e s.), quatre-vingt-dix ans. La connaissance de son œuvre, en revanche, a été l'objet, au cours des dernières décennies, de considérables rectifications, qui ont affecté jusqu'à son statut. Son ouvrage fondamental, les *Arithmétiques*, était initialement composé de treize livres, aux dres de Diophante. Six seulement ont survécu en grec, auxquels viennent de s'ajouter quatre livres de la version arabe, récemment découverts. Ces derniers ont singulièrement modifié notre conception de l'ouvrage de Diophante, de sa structure, mais aussi de son contenu. Les *Arithmétiques* se présentent comme un traité de problèmes numériques — équivalents dans leur grande majorité à des équations (ou systèmes d'équations) indéterminées de degré ≤ 9 , à deux ou plusieurs inconnues, et ne contenant que des quantités rationnelles ; les solutions de ces problèmes doivent être des nombres rationnels positifs. Cette recherche engagée par Diophante dans les *Arithmétiques* se présente, tant par son extension que par sa compréhension, comme un point singulier. Les travaux des mathématiciens babyloniens et égyptiens sur les triangles rectangles numériques, les problèmes très élémentaires formulés dans un papyrus de Michigan et dans l'*Anthologie Palatine*, un lemme du livre X des *Éléments* d'Euclide, « le problème des bœufs », d'Archimède, ainsi que des problèmes élémentaires donnés par Héron d'Alexandrie, aucun de ces problèmes n'est vraiment semblable à ceux de Diophante. Ce dernier cherche en effet à élaborer une « théorie arithmétique » au cours de son étude de quatre cents problèmes environ.

Après Diophante, il fallut attendre le IX^e s. pour que la recherche en ce domaine trouvât une nouvelle vigueur. Mais, aussi bien dans les mathématiques arabes que dans les mathématiques latines qui en dépendaient, et, plus tard, dans les mathématiques

des XVI^e-XVII^e s., et ainsi jusqu'à Euler, les *Arithmétiques* demeurent encore bien vivantes. C'est toujours en fonction d'elles, mais aussi contre elles, que se faisait la recherche. Aussi comprend-on que l'analyse diophantienne, de Diophante à Euler-Lagrange, soit associée au nom du mathématicien alexandrin. Ce sont les étapes de cette histoire que nous allons brièvement esquisser.

La plupart des problèmes traités dans les *Arithmétiques* consistent à trouver des nombres rationnels, soumis à certaines conditions arithmétiques fixées par Diophante : partager un nombre carré en somme de deux carrés ; partager un nombre cubique en différence de deux carrés, etc. Diophante procède en substituant aux variables des expressions (on dira plus tard des polynômes), de degré assez petit de préférence, et cherche de manière astucieuse les coefficients, de sorte qu'il ne reste qu'une espèce égale à une espèce, c'est-à-dire une équation du premier degré contenant deux coefficients (ou du second degré, au plus, avec des conditions fixées au préalable sur les coefficients, pour que soit obtenue une solution rationnelle positive). Le procédé est de part en part algorithmique, excepté le choix des coefficients. Or tout ceci était déjà observé, d'une certaine façon, par d'Alembert, lorsqu'il écrivait que la méthode de Diophante consiste à « manier tellement les inconnues ou l'inconnue, que le carré et les plus hautes puissances de cette inconnue disparaissent de l'équation, et qu'il ne reste que l'inconnue au premier degré » (*Encyclopédie*, IV, 1014). Mais quels sont les algorithmes qui ont permis à Diophante sa démarche, et qui en quelque sorte unifient cette collection de quatre cents problèmes qui constitue les *Arithmétiques* ? Ces algorithmes ont-ils survécu à Diophante ? Telles sont les deux questions concrètes auxquelles il nous faut répondre.

Dans les *Arithmétiques* (éd. et trad. R. Rashed, Paris, Les Belles Lettres « Collection des Universités de France », 1984, t. III), plusieurs algorithmes sont systématiquement appliqués, même si Diophante ne les élabore pas tous. Une fois fondés géométriquement, ces algorithmes ont acquis leur légitimité et trouvé leur nom. Il s'agit de la méthode de la corde et de celle de la tangente. Dans les *Arithmétiques* — notamment dans les sept premiers livres selon le nouvel ordre — Diophante traite toute une classe de problèmes que nous pouvons réécrire $P_2(x, y) = 0$, où P_2 est un polynôme du second degré. Il se donne une solution rationnelle de cette équation, soit (x_0, y_0) . Pour trouver les autres solutions (en fait Diophante cherche seulement une deuxième solution), il fait la substitution $x = x_0 + t, y = y_0 + ut$, et obtient

$$P_2(x_0, y_0) + tQ_1(x_0, y_0) + utQ_2(x_0, y_0) + t^2Q_3(x_0, y_0, u) = 0,$$

d'où

$$t = \frac{-(Q_1(x_0, y_0) + uQ_2(x_0, y_0))}{Q_3(x_0, y_0)}$$

On a donc pour chaque u une solution rationnelle de l'équation. Si l'équation donnée est de la forme $y^2 = ax^2 + bx + c$, on pose $x = t, y = at + u$. Cet algorithme, fondé géométriquement beaucoup plus tard, sera nommé « méthode de la corde », puisqu'il s'agit de couper la courbe définie par l'équation initiale par une famille de droites qui passent toutes par le point rationnel trouvé sur la courbe. Ce point, dans la dernière équation, est manifestement à l'infini. Un cas particulier de cette dernière équation est celui où $P(x, y) = y^2 - x^2 - c = 0$. On pose $x = t, y = t - u$; il vient : $x = \frac{(c - u^2)}{2u}$ et $y = \frac{(c + u^2)}{2u}$.

Diophante donne alors dans (2.11) la méthode de la « double équation », qui consiste à résoudre le système $z + a = y^2, z + b = x^2$; on en tire $y^2 - x^2 = a - b = c$, qui est le problème précédent. Diophante donne alors un algorithme de solution. Un autre algorithme est appliqué à des équations $P_3(x, y) = 0$ et $P_4(x, y) = 0$, où P_3 et P_4 sont des polynômes. L'algorithme qu'il donne cette fois, plus tard géométriquement fondé, sera appelé « méthode de la tangente ». Diophante traite la « double équation » du second degré, qui est le cas suivant : on cherche à résoudre en x, y, y_2 le système d'équations diophantiennes

$$ax^2 + bx + c_1 = y_1^2 \text{ et } ax^2 + bx + c_2 = y_2^2,$$

où a, a_2, b, b_2, c_1, c_2 sont des nombres rationnels, c_1 et c_2 étant des carrés. Diophante donne aussi un algorithme qui revient à celui de la méthode de la corde.

Ces algorithmes, sous-jacents à la démarche de Diophante ou explicitement formulés par lui sous une certaine forme, vont être dégagés, formulés ou réinventés par les successeurs du mathématicien alexandrin.

La recherche en analyse diophantienne fut reprise sur une autre base dans la tradition algébrique arabe après qu'al-Khwārizmī eut conçu cette nouvelle discipline : l'algèbre (*in* Rashed R. dir., *Histoire des sciences arabes*, Paris, Le Seuil, 1997, t. II). Le successeur d'al-Khwārizmī, le mathématicien Abū Kāmil, rédige vers 870 un livre, ensuite traduit en latin et en hébreu, dont un chapitre est consacré à l'analyse diophantienne. Abū Kāmil inaugure ainsi une tradition que l'on retrouvera encore chez Euler : chaque important traité d'algèbre comporte désormais un tel chapitre, et l'analyse diophantienne rationnelle s'intègre parfaitement à la discipline inventée par al-Khwārizmī. Le projet conçu par Abū Kāmil ne souffre aucune ambiguïté : il ne s'agit plus de donner l'énoncé de centaines de types d'équations diophantiennes et d'algorithmes de solution, comme le faisait Diophante ; il faut désormais, conformément à l'exigence introduite un demi-siècle auparavant par al-Khwārizmī, en donner « les raisons ». Les algorithmes de solution doivent être justifiés par des démonstrations algébriques, ou, comme l'écrit Abū Kāmil, par « un syllogisme convaincant ». Considérons à titre d'exemple l'équation diophantienne $ax - x^2 + b = y^2$. Abū Kāmil écrit : « S'il te parvient des problèmes analogues à

ce problème, multiplie la moitié du nombre des racines par elle-même ($\frac{a^2}{2}$), ajoute ce produit aux unités ($b + \frac{a^2}{2}$). Si la somme se partage en deux parties dont chacune a une racine carrée, $\left[b + \frac{a^2}{2} = u^2 + v^2 \right]$,

alors le problème est rationnel et a des solutions innombrables. Mais si la somme ne se partage pas en deux parties dont chacune a une racine carrée, alors le problème est irrationnel et sans solution. » Particulièrement important dans l'histoire de l'analyse diophantienne, ce texte donne une condition suffisante pour déterminer les solutions rationnelles positives de l'équation précédente. C'est vers cette même époque – 870 – que les *Arithmétiques* de Diophante ont été traduites en arabe. La combinaison des intérêts algébriques et la connaissance des *Arithmétiques* vont donner une impulsion à la recherche sur l'analyse diophantienne en arabe. Un mathématicien de la fin du X^e s., al-Karajī, amplifie les travaux d'Abū Kāmil en analyse diophantienne rationnelle. Les successeurs d'al-Karajī, ainsi que les mathématiciens italiens au fait du livre d'Abū Kāmil, Fibonacci notamment, se sont employés activement à cette tâche. C'est dans cette tradition que se situent les travaux de Luca Pacioli, Bombelli, et bien d'autres.

Mais l'exigence de démontrer les méthodes et les algorithmes a eu pour effet la séparation de l'analyse diophantienne entière de l'analyse diophantienne rationnelle. Les théoriciens des nombres, comme al-Khāzin au X^e s., ont précisément conçu l'analyse diophantienne lorsqu'ils se sont délibérément écartés des algébristes : ils voulaient démontrer, à la manière d'Euclide dans les livres arithmétiques des *Éléments*, les différents algorithmes, y compris celui de la double équation, $x^2 + a = y^2$, $x^2 - a = z^2$, pour résoudre le fameux problème des nombres congruents. Or ce sont précisément ces mathématiciens qui ont affronté – sans succès bien entendu – les deux premiers cas du théorème de Fermat.

La seconde grande étape de l'analyse diophantienne est marquée par la première édition du texte grec de six livres des *Arithmétiques*, et leur traduction latine : ainsi que par la recherche, engagée en même temps, par Bachet de Méziriac. Ce dernier, mais plus encore Fermat, consacre la séparation déjà entamée de l'analyse diophantienne rationnelle – considérée alors comme partie de l'algèbre – et de l'analyse diophantienne entière, domaine propre à la théorie des nombres. Cette direction, on vient de le dire, n'est pas nouvelle. Mais ce qui, en revanche, est novateur ce sont les algorithmes et les méthodes conçus par Fermat vers 1640, nécessaires au développement sans précédent de l'analyse diophantienne entière. Fermat commence par appliquer l'algorithme de la double équation, comme ses devanciers depuis Diophante. Cet algorithme algébrique, ou plutôt l'échec de son usage dans certains cas, a déterminé la conception du second algorithme par Fermat – celui de la

descente infinie – lequel a renouvelé l'analyse diophantienne entière (J. Itard, A. Weil, I. Bachmakova). Ainsi, pour la double équation étudiée par Fermat, $x^2 + 1 = y^2$, $1 - x^2 = z^2$, l'algorithme de la double équation n'opère plus. Pour démontrer que cette équation n'a pas de solution, Fermat a dû concevoir la méthode de la descente infinie, qui est de nature plus élaborée. Cet algorithme repose pour l'essentiel sur la propriété arithmétique suivante : toute suite décroissante d'entiers naturels est stationnaire. C'est cet algorithme que Fermat utilise pour démontrer les deux premiers cas de son théorème. Il recourt à cet algorithme non seulement négativement, c'est-à-dire pour montrer l'impossibilité d'une solution en entiers, mais aussi positivement. Il démontre ainsi que « tout entier n est somme de quatre carrés » ; il l'utilise également pour trouver les entiers de la forme $2x^2 - y^2$. Dans toutes ces variantes apparaît chez Fermat un trait, selon nous fondamental, de cet algorithme de la descente : il est l'élément unificateur de plusieurs domaines de l'arithmétique des entiers – nouvelle analyse diophantienne, congruences, représentation des entiers à l'aide des formes quadratiques, c'est-à-dire les domaines de recherche de Fermat en théorie des nombres.

C'est sur ce terrain, et grâce à la descente infinie, que les successeurs de Fermat continuent à développer l'analyse diophantienne. Euler (1736-1813) s'occupe activement de la représentation des entiers par des sommes de carrés, des formes quadratiques $x^2 + ay^2$, ou, plus généralement, $ax^2 + by^2$, où a et b sont des entiers donnés (positifs ou négatifs). Il s'intéresse aussi, entre bien d'autres sujets, aux équations diophantiennes $x^4 \pm y^4 = z^2$, $x^4 \pm y^4 = 2z^2$. Il formule aussi plusieurs conjectures sur une loi fondamentale de la théorie des nombres, la loi de réciprocité quadratique, partiellement démontrée ensuite par Legendre avant d'être finalement établie par Gauss (Dickson). À la suite d'Euler, Lagrange (1736-1813) s'occupe de l'analyse diophantienne pendant la décennie qu'il a passée à Berlin. C'est lui qui élabore enfin la théorie des formes quadratiques binaires, et en déduit les théorèmes de Fermat sur la représentation des nombres premiers par les formes $x^2 + 2y^2$ et $x^2 + 3y^2$. Lagrange développe alors la théorie des fractions continues pour résoudre l'équation de Fermat $x^2 = dy^2 + 1$, d sans facteurs carrés. Legendre continue l'effort ; avec ses travaux, et surtout ceux de Gauss, l'analyse diophantienne devient un chapitre de la théorie des nombres. Au cours du XIX^e s. et au début du XX^e s., beaucoup de mathématiciens, et des plus éminents, ont consacré leurs recherches à ce chapitre. La géométrie algébrique a permis d'interpréter la recherche des solutions des équations – ou systèmes d'équations – diophantiennes en termes de détermination des points rationnels sur une variété algébrique, ce qui a stimulé la recherche en analyse diophantienne. À son tour cette recherche a provoqué un progrès considérable de la géométrie algébrique (cf. W. Scharlau & H. Opolka, 1980).

► BACHMAKOVA I.G., *Diophant und diophantische Gleichungen*, Boston/Bâle/Stuttgart, Birkhäuser, 1974. – ITARD J., *Essais d'histoire des mathématiques*, réunis et introd. R. Rashed, Paris, Blanchard, 1984. – SHARLAU W. & OPOLKA H., *Von Fermat bis Minkowski*, Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1980. – WEIL A., *Number Theory. an Approach through History from Hammurapi to Legendre*, Boston/Bâle/Stuttgart, Birkhäuser, 1984. – Coll. : *Diophante, Les Arithmétiques, Livre IV*, vol. 3, Paris, Les Belles Lettres « Collection des Universités de France », 1984. – *Diophante, les Arithmétiques, Livres V, VI, VII*, vol. 4, Paris, Les Belles Lettres « Collection des Universités de France », 1984.

Roshdi RASHED

→ Analyse et synthèse ; Extension ; Géométries ; Khuwarizmi.

ANALYSE ET SYNTHÈSE

MATHÉMATIQUES

À la frontière des mathématiques et de la philosophie, il est des thèmes d'une grande complexité et de grande fécondité aussi, puisqu'ils sont ressourcés aux deux disciplines à la fois. Parmi ces thèmes, celui de l'analyse et de la synthèse a occupé durant deux millénaires une place centrale. Rares, il est vrai, sont les problèmes de philosophie des mathématiques qui ont connu une si longue vie, et qui ont suscité autant d'écrits. Présent en filigrane dans les écrits d'Aristote (*Éthique à Nicomaque*, 1112 b ; *Premiers Analytiques*, 46 b et 51 b ; *Physique* II, 9, 200 a, ...), le problème de l'analyse et de la synthèse est là en personne dans les travaux des commentateurs, des philosophes et des logiciens, jusqu'au début du siècle dernier. On imagine sans peine la diversité des sens et la multiplicité des formulations de cette question, qui a fini par désigner un domaine assez vaste pour comprendre à la fois un *ars demonstrandi* et un *ars inveniendi*.

Dans l'histoire des mathématiques, la situation n'est pas tout à fait la même : analyse et synthèse se présentent davantage par les applications qu'en faisaient les mathématiciens que par les formulations théoriques qu'ils en donnaient. Ainsi le couple « analyse-synthèse » marque, à première vue, chez Archimède (*La Sphère et le Cylindre* II, propositions 4, 5, 6, par exemple), deux étapes ordonnées de la démonstration géométrique. Il est de fait que cet usage devint alors systématique, tout au moins dans les écrits des successeurs d'Archimède, comme certains livres d'Apollonius (*Sur la Section des droites selon des rapports*, notamment), pour ensuite ne plus jamais faire défaut chez les géomètres jusqu'à la fin du XVIII^e s. et au début du siècle suivant. Mais rares sont, en revanche, les textes théoriques consacrés à ce problème par les mathématiciens – deux courts textes, d'importance inégale, d'ailleurs : une page de Pappus, et quelques lignes d'un Pseudo-Euclide, qui tous deux suscitent un certain nombre de problèmes historiques et philologiques. Voici le texte fondamental de l'Antiquité tardive, donné par Pappus : « Le champ de

l'analyse [...] est la matière particulière dont disposent ceux qui, après avoir acquis les éléments vulgaires, veulent puiser dans les lignes la puissance de trouver les problèmes qui leur sont proposés. C'est en suivant la voie de l'analyse et de la synthèse que cette matière a été traitée par trois hommes : Euclide, auteur des *Éléments*, Apollonius de Perga et Aristée l'Ancien. L'analyse est donc la voie qui part de la chose cherchée, considérée comme étant concédée, pour aboutir, au moyen des conséquences qui en découlent, à la synthèse de ce qui a été concédé. En effet, supposant, dans l'analyse, que la chose cherchée est obtenue, on considère ce qui dérive de cette chose et ce dont elle est précédée, jusqu'à ce que, revenant sur ses pas, on aboutisse à une chose déjà connue ou qui rentre dans l'ordre des principes ; et l'on nomme cette voie l'analyse en tant qu'elle constitue un renversement de la solution. Dans la synthèse, au contraire, supposant la chose finalement perçue par l'analyse comme étant déjà obtenue, et disposant dès lors ses conséquences et ses causes dans leur ordre naturel, puis, les rattachant les unes aux autres, on aboutit en dernier ressort à construire la chose cherchée ; et c'est ce que nous appelons la synthèse » (Pappus, *La Collection mathématique*, livre VII, trad. P. Ver Eecke, Paris, Desclée de Brouwer, 1933, vol. II, p. 477). Cet important passage, ainsi que sa traduction, n'ont cessé de soulever de sérieux problèmes (cf. récemment J. Hintikka & U. Remes, *The Method of Analysis*, Dordrecht, D. Reidel « Boston Studies in the Philosophy of Science », 1974, vol. XXV, p. 8-10). Plusieurs lectures contradictoires en ont été faites : l'analyse et la synthèse désignent-elles, chez les anciens géomètres, une méthode de démonstration des propositions et de résolution des problèmes géométriques posés ? Selon certains commentateurs, c'est bien de cela, et uniquement de cela, qu'il s'agit, et le problème sous-jacent à l'analyse et la synthèse serait purement logique : les conditions de la réversibilité de l'analyse pour parvenir à la synthèse, et ainsi à la démonstration. Or les règles de cette méthode ne se trouvent pas dans le texte de Pappus, ni du reste dans aucun texte connu d'un mathématicien de l'Antiquité. À cette difficulté s'en ajoute une autre : nul ne donnait, à l'époque, aucune valeur prescriptive à l'analyse et à la synthèse. Si donc ces termes désignent une méthode, il nous faut commencer par chercher le sens que recouvre ce mot, et la fonction qu'il assure en ce nouveau sens. On a également pu se demander si l'analyse et la synthèse ne pourraient faire référence à une discipline. Mais quelle serait alors cette discipline ? Serait-ce une discipline mathématique autre que la géométrie, supérieure à celle-ci ? Et, enfin, quels seraient ses rapports avec la géométrie, mais aussi avec l'arithmétique, qui use bien, elle aussi, de la terminologie de l'analyse et de la synthèse, ainsi qu'en témoignent les *Arithmétiques* de Diophante ?

Tel qu'il se présente, le texte de Pappus n'est d'aucun secours pour éclairer ces questions, non plus d'ailleurs qu'aucun texte de l'Antiquité. Il nous faut

done revenir aux écrits que les mathématiciens postérieurs à Pappus ont consacrés à ce thème, au lieu de continuer, une fois n'est pas coutume, à torturer la fameuse page de celui-ci.

Au cours de l'histoire des mathématiques classiques, deux moments furent essentiels à la recherche sur le thème de l'analyse et de la synthèse. Le premier n'est guère connu : au X^e et au XI^e s., les plus éminents géomètres ont abordé cette question, lui consacrant même, pour certains, de volumineux traités. Le second se situe six siècles plus tard, au $XVII^e$ s. Arrêtons-nous quelque peu à ces deux moments.

Commençons par rappeler qu'au X^e s. des recherches mathématiques portant sur une vaste classe de problèmes, et notamment les problèmes inconstruisibles, ont conduit les mathématiciens à dégager ce qui ne faisait qu'affleurer dans les mathématiques hellénistiques tardives, et à poser la question de l'existence d'une manière abstraite, indépendamment donc de la construction. Tout au long du siècle, cette nouvelle exigence s'est renforcée, pour finir par jouer le rôle d'une norme. C'est là, semble-t-il, la principale raison de cet intérêt sans précédent pour le problème de l'analyse et de la synthèse.

Mais, pour se conformer autant que faire se peut à cette norme, il a paru nécessaire de faire progresser la connaissance des propriétés générales des figures, c'est-à-dire de ces propriétés qui subsistent alors même que la figure se transforme, et qui demeurent même si on l'exprime d'une autre manière, comme à la suite du changement d'un système de coordonnées : ce sont là des situations qui se présentent de plus en plus fréquemment dans la pratique mathématique. Il était par exemple courant, dans l'étude des problèmes inconstruisibles à la règle et au compas, de ramener à un même système de coordonnées les différentes parties d'une figure décrites dans des systèmes de coordonnées différents ; ou encore, dans l'étude des surfaces et des volumes courbes, de procéder par transformations affines ; ou enfin, dans l'étude de la représentation exacte de la sphère sur un plan, de définir et d'examiner les projections cylindriques et coniques. Toutefois, ces propriétés générales sont d'origines diverses : elles peuvent résulter de la position des éléments de la figure, comme elles peuvent provenir de sa forme. Or c'est précisément à l'étude de ces propriétés que le mathématicien et physicien de la fin du X^e s. Ibn al-Haytham (Alhazen latin) consacre un volumineux traité, intitulé *Les Connus* (établi et traduit par R. Rashid, dans *Mélanges de l'Institut Dominicain d'Études Orientales du Caire [MIDEO]*, 1993, n° 21, p. 87-275). Ce livre fournit les fondements théoriques d'un autre ouvrage sur *L'Analyse et la Synthèse* (établi et traduit par R. Rashid dans *MIDEO*, 1991, n° 20, p. 31-231). Selon Ibn al-Haytham, les « connus » désignent des propriétés invariables, indépendamment de la connaissance que nous en avons. Or, nous pouvons lire dans son traité sur *L'Analyse et la Synthèse* que le but de l'analyste est précisément d'aboutir à ces notions connues, et que c'est seulement lorsqu'il atteint ces

notions que sa tâche s'achève et que la synthèse peut être engagée. Le but d'Ibn al-Haytham dans ce livre est d'obtenir des résultats géométriques qui peuvent effectivement abrégé l'analyse, et, bien plus, contribuer à l'élaboration d'une discipline géométrique qui traite des propriétés invariables des figures obtenues par mouvement et par sections planes. On ne s'intéresse pas seulement aux propriétés métriques, mais surtout aux propriétés de position et de forme, qui demeurent inaltérables après les transformations des figures. De l'aveu même d'Ibn al-Haytham, l'art de l'analyse et de la synthèse trouve ses lois et ses principes dans cette discipline géométrique.

À la fin du X^e s., analyse et synthèse ne sont donc pour Ibn al-Haytham ni les deux étapes d'une méthode universelle, ni même une méthode commune à l'ensemble des mathématiques. Analyse et synthèse sont déterminées par cette discipline géométrique conçue par Ibn al-Haytham afin de répondre aux nouvelles exigences de la pratique mathématique. Si ces conceptions décrivent un procédé de découverte et de démonstration, c'est dans la mesure où on les applique à un problème de cette discipline, ou qui comprend une des notions de celle-ci.

À cette première détermination de l'analyse et de la synthèse comme une « topologie » avant la lettre s'en superpose une autre, d'origine différente : ce second est plus traditionnel, et provient de l'interrogation sur la démarche à suivre pour trouver les concepts géométriques. Plusieurs mathématiciens ont consacré des ouvrages à ce problème, dont le plus important est dû au mathématicien du milieu du X^e s. : Ibn Sinān. Alors se posent pour ces mathématiciens les problèmes toujours mis en avant lorsque l'on traite de l'analyse et de la synthèse, les problèmes que celles-ci peuvent soulever comme art de la découverte et art de la démonstration : les différents types de démonstration, le rôle de l'intuition comme intuition formée, la réversibilité de l'analyse, le rôle des propriétés supplémentaires nécessaires pour rendre l'analyse réversible, la distinction entre propositions et problèmes, etc. (H. Bellosta, « On Analysis and Synthesis », *Arabic Sciences and Philosophy*, 1991, n° 1.2, p. 211-232).

Au $XVII^e$ s., toutes les dimensions de cette question vont se déployer avec plus d'éclat encore. Au premier sens, tout comme auparavant les algébristes (al-Samaw'al par exemple), F. Viète identifie l'analyse à l'algèbre. Wallis écrit dans son *Algèbre* : « Ce que nous appelons communément "algèbre" est appelé en grec "analyse" » (*A Treatise of algebra*, Londres, 1685, p. 1). C'est Descartes qui retrouve l'essentiel du problème dans les *Secondes Réponses aux objections*. Dans ce texte, Descartes souligne la dimension théorique de la démonstration ; comme il l'écrit, « la manière de démontrer est double : l'une se fait par l'analyse ou résolution, et l'autre par la synthèse ou composition. L'analyse montre la vraie voie par laquelle une chose a été méthodiquement inventée, et fait voir comment les effets dépendent des causes... La synthèse, au contraire, par une voie tout autre, et

comme en examinant les causes par leurs effets (bien que la preuve qu'elle contient soit souvent aussi des effets par les causes), démontre à la vérité clairement ce qui est contenu en ses conclusions, et se sert d'une longue suite de définitions, de demandes, d'axiomes, de théorèmes et de problèmes, afin que, si on lui nie quelques conséquences, elle fasse voir comment elles sont contenues dans les antécédents, et qu'elles arrachent le consentement du lecteur, tant obstiné et opiniâtre qu'il puisse être... » (*Œuvres de Descartes*, publ. Ch. Adam & P. Tannery, Paris, Vrin, 1964, vol. IX-1, p. 121-122). Il reste que, pour Descartes, la synthèse est insuffisante pour celui qui veut apprendre l'art de la découverte. Dans l'*Entretien avec Burman*, Descartes souligne lui-même les vertus didactiques de l'analyse. Les *Méditations métaphysiques* aussi bien que la quatrième partie du *Discours de la méthode* illustrent l'ordre analytique.

Avec Leibniz, l'analyse et la synthèse interviennent dans plusieurs domaines pour retrouver à un tout autre niveau certaines significations anciennes. L'analyse s'identifie en quelque sorte à l'*analysis situs*, qui s'applique directement aux rapports des situations. D'autre part, l'analyse et la synthèse constituent le moyen de parvenir au cœur même de la philosophie de Leibniz, c'est-à-dire à la caractéristique, où l'on peut établir une correspondance biunivoque entre les signes et les choses significées : la composition des signes reflète exactement les rapports entre les choses. La synthèse est, selon Leibniz, une espèce de la Combinatoire. Il reste que cette combinatoire ne réussit pas toujours lorsque nous ne pouvons pas nous débarrasser des combinaisons inutiles ; dans ce dernier cas, seule reste l'analyse. C'est cette dernière qui demeure notre principal moyen, sur le terrain de la théorie de la démonstration, dans la mesure où, comme l'explique longuement Leibniz dans sa lettre à Conring (19 mars 1678), une démonstration « n'est pas autre chose que la résolution d'une vérité en d'autres vérités déjà connues. Et la résolution d'un problème qui est à effectuer est la résolution de ce problème en d'autres problèmes plus faciles, à savoir : ceux que déjà il renferme manifestement en lui ».

Le couple analyse et synthèse prend de l'extension après Leibniz. Au $XVIII^e$ s. les termes revêtent des sens variés sous l'effet du développement de l'analyse infinitésimale, de l'algèbre d'une part et de la philosophie de Locke, comme dans l'illustré article « analyse » de l'*Encyclopédie méthodique*, d'autre part. Cette multiplicité de sens et cette omniprésence des termes, où l'analyse l'emporte sur la synthèse, expriment d'une manière un peu paradoxale l'épuisement des problèmes mathématiques et logiques désignés par ce couple, qui ne laisse subsister que l'intérêt historique.

► BELLOSTA H., « On Analysis and Synthesis », *Arabic Sciences and Philosophy*, 1991, n° 1.2, p. 211-232. — CHERNISS H., « Plato as mathematician », *Revue of Metaphysics*, 4, 1951, p. 395-425. — DESCARTES, *Œuvres de Descartes*, publ. Ch. Adam & P. Tannery, Paris, Vrin, 1964, vol. IX-1. — GULLEY N., « Greek Geometrical Analysis »,

Phronesis, 3.1, 1958, p. 1-14. — HINTIKKA J. & REMES U., *The Method of Analysis*, Dordrecht, Reidel, 1974. — PAPIUS D'ALEXANDRIE, *La Collection mathématique*, trad. P. Ver Eecke, Paris/Bruges, 1933. — RASHID R., « Ibn al-Haytham : L'Analyse et la Synthèse », *Mélanges de l'Institut Dominicain d'Études Orientales du Caire [MIDEO]*, 1991, n° 20, p. 31-231 ; « Ibn al-Haytham : Les Connus », *Mélanges de l'Institut Dominicain d'Études Orientales du Caire [MIDEO]*, 1993, n° 21, p. 87-275. — WALLIS, *A Treatise of Algebra*, Londres, 1685.

Roshdi RASHID

→ Isopérimètre ; Topologie.

ANALYSE FONCTIONNELLE MATHÉMATIQUES

L'analyse fonctionnelle est une des branches de la mathématique qui peut caractériser le XX^e s., dans la mesure où il la vit naître, se développer, et sur la fin se transformer au point de perdre sa spécificité. Sous la forme du traité tellement prisée des mathématiciens qui maintiennent à leur science son sens premier d'apprentissage « élémentaire », un livre en français des Hongrois Frigyes Riesz et Bela Sz. Nagy dressait au milieu du siècle le bilan de tout un effort intellectuel. Paul Lévy avait lancé en 1922 avec bonheur l'expression : *Leçons d'Analyse fonctionnelle*. Le traité est devenu manuel, genre dont *Functional Analysis* de Walter Rudin signale en 1973 la prolifération. Collectionnant régulièrement les articles mathématiques parus dans le monde, les *Mathematical Reviews* comportent depuis leur création en 1940 une rubrique d'analyse fonctionnelle toujours généreusement pourvue ; elle a dû être démultipliée au cours des années, autant de branches se détachant d'un tronc commun pour avoir conquis de fait leur autonomie. Comment cependant ne pas mentionner le genre encyclopédie dont l'analyse fonctionnelle a su donner une illustration assez riche, sans doute avec l'intention de parer de telles tendances d'éclatement. Ainsi les trois gros volumes de *Linear Operators* des Américains Nelson Dunford et Jacob Schwartz dont la première sortie date de 1958, et les non moins gros volumes du Japonais Kato ou ceux de Simons parus en 1990.

Avec l'analyse fonctionnelle se joue une relation étroite de la pratique mathématique avec la physique. Ne serait-ce pas même la forme actuelle prise par la « physique mathématique », cette discipline née avec d'Alembert, Laplace et Fourier à la fin du $XVIII^e$ s. et au début du XIX^e s. ? Le titre d'un ouvrage récent de Alain Connes ne trouve-t-il pas le sens d'une des dernières interrogations de Henri Poincaré lorsqu'en 1912 il demandait : pourquoi l'espace a-t-il trois dimensions ?

Si l'analyse fonctionnelle n'a jusqu'ici guère attiré l'attention des historiens ou des épistémologues, c'est que peut-être l'on n'y a pas reconnu ces états de crise qui sont une manne pour ceux qui évoquent la physique quantique — et l'on a délibérément ignoré le fait qu'en 1932 l'ouvrage de John von Neumann, *Die*

mathematische Grundlagen der Quantummechanik, était sans équivoque aucune un texte d'analyse fonctionnelle.

La floraison de 1907 : une compréhension géométrique

La naissance fut sans forceps, rendue un peu fébrile par la compétition entre Paris et Göttingen au printemps 1907 : quelques notes se répondent ou plutôt s'enchevêtrent aux *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* et aux *Göttingen Nachrichten* avec d'une part les écrits du jeune Maurice Fréchet, un proche d'un professeur déjà renommé, Jacques Hadamard ; d'autre part ceux des « élèves » non moins jeunes de David Hilbert, un véritable patron, Emil Fischer, Edward Schmidt, et surtout un Hongrois Frédéric Riesz. Fin juin, le 24 juin 1907, le tour est joué.

Si le mathématicien hongrois n'a plus besoin de démontrer, c'est qu'il a posé avec précaution un sujet neuf. Ses recherches ont pour objet d'« approfondir la méthode des coordonnées appliquées à l'étude des systèmes de fonctions sommables ». Méthode des coordonnées. L'allusion serait-elle à Descartes, avec la représentation que celui-ci a donnée d'un point de l'espace géométrique à trois dimensions par précisément trois variables ? Oui et non : si de coordonnées il s'agit, il doit y en avoir en l'occurrence une infinité pour les espaces en jeu ; l'allusion de Riesz est plus immédiate et vise la construction par Fréchet d'un espace concret. Espace désormais connu sous le nom d'espace L^2 , et l'on peut effectivement y « voir » des coordonnées.

Mais pour les y voir, il faut avec Riesz penser une « géométrie synthétique » ; c'est, dit-il, que « toute la géométrie de notre sous-ensemble de points, géométrie qui peut être développée sans difficultés, se laisse traduire dans une théorie des systèmes de fonctions sommables, de carré sommable ». Ainsi Riesz ne travaille pas à ce moment-là sur l'espace L^2 : il utilise un système de fonctions, désormais appelé L^2 et il joue de l'équivalence démontrée de ce système à l'espace L^2 ; Riesz « voit » – sans difficulté précise-t-il – l'apparition de notions géométriques dans ce système L^2 de fonctions, notamment la notion d'orthogonalité, celle qui en géométrie ordinaire signale la présence d'un angle droit. Cette orthogonalité fait donc sens sur L^2 aussi bien (jeu de l'équivalence). Ce dernier espace paraît enfin comme étant la généralisation, en dimension infinie, de l'espace euclidien.

Ainsi donc, c'est une histoire pour enfants sages, ou pour inductivistes endurcis, que celle d'une découverte « fonctionnelle » par généralisation de l'espace euclidien. La démarche fut en réalité tout autre : la géométrisation qu'a été l'analyse fonctionnelle provint d'une démonstration d'équivalence entre un espace où peuvent se voir des coordonnées – von Neumann dira habilement un espace discret – et un autre espace où se voient des propriétés géométriques d'angles droits – von Neumann dira un espace continu. Le théorème crucial est l'équivalence entre L^2 et L^2 ; tout le jeu

consistant à lire des propriétés structurelles dans l'un des deux cas pour les interpréter dans l'autre.

L'historien des mentalités serait certainement tenté de parler de représentation, et ainsi de se débarrasser de la question de l'existence même de l'objet mathématique que suggère toute équivalence comme l'avait éprouvé Cantor. Mais l'expression de représentation est d'autant plus maladroite qu'aucun des deux espaces n'était au départ jugé plus intéressant que l'autre. C'est l'équivalence des deux espaces qui a fondé le discours d'analyse fonctionnelle. Voilà une origine qui déplaît aux tenants de l'analytique (déroulement linéaire des calculs), sans pour autant satisfaire ceux qui recherchent les constructions synthétiques *a priori* ni ceux qui adoptent la position du « réalisme ». Quant à trouver dans la dimension infinie un « obstacle épistémologique » enfin vaincu par la « pensée » mathématique, encore faudrait-il que ce ne soit pas précisément la dimension infinie qui ait fait comprendre la dimension finie !

Il est historiquement indéniable que la « géométrisation » fixée par l'analyse fonctionnelle fut un tournant dans le mouvement d'arithmétisation des mathématiques de l'avant 1900, dans ce mouvement de logique qui infirmait la description kantienne du déroulement de la mathématique. Ce mouvement était dominant depuis Cantor – à vrai dire depuis à peine un tiers de siècle. Un tournant n'a toutefois de sens – celui d'une révolution peut-être – que si la voie se continue une fois le rectiligne abandonné : nous ne parviendrons à qualifier épistémologiquement la naissance de l'analyse fonctionnelle que dans la mesure où nous aurons dit de l'avant ce qu'il portait sur les fonctions (ou plus précisément sur l'analyse des fonctions et leur mise en mathématique dans un cadre analytique), et de l'après ce qu'il signifiait quant à la géométrie des fonctions.

Une dynamique de l'analyse : les trois temps du concept de fonction

En expliquant avec une belle vigueur dans son *Introductio in Analysis Infinitorum* qu'il assignait les « fonctions de variables » comme « objet de l'Analyse », jusqu'alors qualifiée d'infinitésimale, Euler concentrait en 1748 l'attention des mathématiciens sur les différentes « espèces » de fonctions : fonctions rationnelles, fonctions algébriques et fonctions transcendentes. Distinctions dont il diminuait aussitôt la force en indiquant un moyen uniforme « de les décomposer et de les réduire en séries infinies ». Bref, par cette décomposition intervenait l'unité d'une Analyse des fonctions.

S'ensuivit une longue controverse sur le concept même, notamment pour son emploi en vue des solutions des équations aux dérivées partielles (problème des cordes vibrantes par exemple). En effet, entraient en conflit l'idée calculatoire, la fonction désignant un ensemble d'opérations déterminées à effectuer pour passer d'une variable à une autre, et l'idée causale, le simple lien d'une variable à une autre, ce que nous

appelons aujourd'hui une correspondance et que nous conceptualisons grâce au langage de la théorie des ensembles. Causalité et calcul : il y avait conflit reconnu dans l'ordre logique, mais trancher ne pouvait servir à rien tant que l'on n'aurait pas reconnu un ordre parmi les différentes propriétés de calcul.

L'Analyse des fonctions trouva cet ordre, et par conséquent son architecture, grâce à Cauchy qui, déjà, n'éprouvait plus le besoin de qualifier l'analyse. Son *Cours d'Analyse* sortait en 1821 pour les besoins pédagogiques de l'École polytechnique et il fut très vite diffusé. Était distinguée une « espèce » particulière de fonctions, les fonctions continues que réglait le concept d'algèbre de limite. Tel devenait l'objet privilégié de l'analyste : les fonctions auparavant dites « analytiques » ou calculables, étant de fait continues, et la continuité étant devenue une hypothèse à satisfaire par les fonctions « causales » fournies par la physique. En outre, on se débarrassait d'avoir à dire une « nature » métaphysique de la limite, puisque celle-ci apparaissait à qui savait bien lire comme une propriété particulière de fonctions, les suites qui convergent vers 0.

Limites et continuité permettaient en tout cas de définir indépendamment l'opération de dérivation et celle d'intégration, qui étaient les deux opérations privilégiées portant sur les fonctions : un théorème synthétique manifestait la solidité du monument conçu par Cauchy : pour une fonction continue numérique (notée $f(x)$) la dérivée de son intégrale prise par rapport à une borne supérieure (ce que le mathématicien note $\int_a^b f(t)dt$) est égale précisément à $f(x)$.

Théorème majeur, et surtout théorème rétablissant de droit toutes les manipulations analytiques du XVIII^e s., dont la représentation générale d'une fonction (ce qu'on appelle la série de Taylor et que nous donnons pour la sécurité du lecteur mathématicien

$$F(x) = F(x_0) + \frac{x - x_0}{1} F'(x_0) + \frac{(x - x_0)^2}{1 \cdot 2} F''(x_0) + \dots + \frac{(x - x_0)^{n-1}}{1 \cdot 2 \dots (n-1)} F^{(n-1)}(x_0) + \int_{x_0}^x \frac{(x-z)^{n-1}}{1 \cdot 2 \dots n} F^{(n)}(z) dz.$$

Ce résultat pouvait être donné jusque et y compris sous la forme d'un reste intégral. Celle-ci avait été obtenue par Lagrange dans sa *Théorie analytique des fonctions* de 1797, une tentative infructueuse de fondation purement algébrique de l'Analyse dont Cauchy récupérait tout ce qu'elle présentait d'analyse réelle.

Cette analyse des fonctions se développa avec une belle vaillance, annexant le champ complexe et dès lors retrouvant les belles questions de classification manifestées par les fonctions elliptiques ou les intégrales abéliennes. Karl Weierstrass et Bernhard Riemann en furent les grands maîtres et ils travaillèrent entre autres deux moyens de représentation des fonctions, servant aussi bien pour la théorie que pour les calculs, les séries et intégrales de Fourier d'une part (exposée dès 1822 dans la *Théorie analytique de la chaleur* de Joseph

Fourier) et les produits infinis (dont Weierstrass rendit publique la théorie à Berlin en 1876).

Dans ce mouvement même, l'attention pouvait et devait se déplacer des fonctions aux variables, c'est-à-dire au domaine sur lequel agit une fonction. Fourier était le premier à signaler qu'une fonction est d'abord l'indication d'un domaine de définition. « Le point essentiel est de distinguer les limites entre lesquelles on doit prendre la valeur de la variable » répète-t-il, confronté il est vrai à des développements en séries trigonométriques distinctes qui n'en coïncident pas moins, par leur somme, sur tout un intervalle. Et c'est avec cette préoccupation même qu'il inaugure la notation explicite des bornes d'une intégrale définie ($\int_a^b f(x)dx$) aussitôt adoptée par la communauté mathématique.

À la superbe indifférence d'un Cauchy pour la variable, dont témoigne son acceptation sans sourcilier de la réciproque du critère de convergence d'une suite réelle « de Cauchy » et sans doute ses « erreurs » sur l'uniformité, succède une pratique nettement plus attentive – convergence uniforme des séries de fonctions continues, continuité uniforme d'une fonction numérique continue sur un segment de l'axe réel – et elle parvient à constituer un nouveau domaine. Rêlève-t-il encore de l'analyse ? Le nom en tout cas est autre, c'est la topologie ; elle trouve ses concepts autant que ses méthodes avec les premiers travaux de Georg Cantor, et est aussi vite reconnue que Cauchy avait été adopté. Il n'y a pas de bijection entre un segment de l'axe réel et l'ensemble des entiers naturels (Cantor, 1874) ; deux sphères dans des espaces euclidiens dont les dimensions sont respectivement m et n sont homéomorphes si et seulement si m est précisément égal à n (Brouwer, 1911) ; un sous-espace compact d'un espace euclidien est l'image continue de l'espace triadique de Cantor, espace qui pourtant est le paradigme du discontinu (Alexandroff et Urysohn, 1929). Pris parmi d'autres et sur une longue période de temps, ces trois remarquables résultats d'arithmétisation du continu disent assez bien que la fonction fut considérée comme un moyen – injection, surjection, bijection – éventuellement caractéristique (homéomorphie), efficace, mais avant tout utilisé pour dire les propriétés du substrat (espaces topologiques) et non pour lui-même.

Analyse des fonctions, analyse des variables devenue topologie, la troisième phase est l'analyse fonctionnelle dont nous avons assigné la naissance à l'année 1907. La nouvelle phase fonctionnelle pourrait apparaître comme un dénouement dialectique des deux précédentes, puisqu'elle consiste à traiter la fonction comme une variable, c'est-à-dire comme un élément d'un ensemble. Cependant la synthèse n'a d'abord pas été ressentie comme telle, et elle ne sera comprise que par le fait de la théorie des distributions, à partir des années 1938 seulement. En 1907, il y avait à prendre en compte un autre changement, celui de la notion même d'intégrale. Lebesgue en 1901 montrait que le problème de la liaison entre dérivation et intégration (ce qu'il appelle le problème des fonctions primitives)

peuvent être résolu à condition d'abandonner la notion d'égalité simple entre deux fonctions numériques (égalité des valeurs pour toutes les valeurs de la variable sur un même ensemble de définition), au profit d'une égalité presque partout (égalité pour toutes les valeurs sauf au plus sur un ensemble de mesure nulle). En donnant au géomètre un outil lui permettant d'éliminer des exceptions (les ensembles de mesure nulle), Lebesgue faisait autant que ce qu'avaient fait Leibniz et Newton en permettant de négliger les infiniment petits d'ordre supérieur.

La force du presque partout : être complet

Dans un article publié aux *Comptes Rendus* de mars 1907, Fréchet donne à voir les conditions de la mise en place du nouveau secteur des mathématiques. Et d'abord, avant toute autre chose, figure l'intégrale : « J'adopte la définition de l'intégrale de M. Lebesgue » explique-t-il péremptoirement. Seront inexorablement exclus de l'analyse fonctionnelle ceux de l'ancienne génération n'ayant pas fait l'effort d'assimiler la nouvelle intégrale. Grâce à elle, Fréchet peut préciser l'espace de fonctions qu'il considère, ce qu'il appelle le champ (R).

L'intégrale de Lebesgue a en effet l'aptitude à montrer que le champ (R) est complet, c'est-à-dire qu'il obéit au critère que Cauchy avait énoncé pour l'ensemble des réels, et par lequel Cantor avait effectivement construit ce dernier ensemble, inaugurant donc l'arithmétisation du continu. Le critère de Cauchy dit ce qu'il faut pour qu'une suite de fonctions converge sans qu'on ait besoin de savoir *a priori* vers quelle limite elle converge. Encore faut-il disposer d'une notion de convergence. C'est le deuxième ingrédient que Fréchet exhibe, celui d'une « topologie » sur les fonctions : en cela, il modifie « la notion des fonctions limites » : il sort de la notion de convergence ponctuelle ou de convergence uniforme qu'avait dégagées la phase précédente de l'analyse des variables, qui privilégiait les fonctions continues. Fréchet se réfère directement à un papier de Riesz publié aux *Comptes Rendus* du 12 novembre 1906 (« Sur les ensembles de fonctions ») et il explique que la notion de limite en jeu peut s'écrire sous la forme :

$$f_n \text{ converge vers } f \text{ si } \lim \int_0^{2\pi} |f(x) - f_n(x)|^2 dx = 0 \text{ lorsque } \lim n = \infty.$$

Je ne donne ces formules que pour satisfaire l'œil du mathématicien, à la façon dont un helléniste cite en grec mais n'en procure pas moins une traduction.

Naturellement, Fréchet fait mention de sa thèse toute récente publiée aux *Rendiconti del Circolo di Matematica di Palermo* : Sur quelques points du Calcul fonctionnel, il y définissait abstraitement un écart, noté d , entre deux éléments f et g de son espace « abstrait » à partir duquel il disposait à chaque fois d'une notion de limite ; il avait en outre souligné l'intérêt du critère abstrait de Cauchy. Ainsi, l'expres-

sion $d(f, g) = \sqrt{\int_0^{2\pi} |f(x) - g(x)|^2 dx}$ satisfait : $d(f, g) = d(g, f)$; $d(f, f) = 0$ mais $d(f, g) = 0$ n'entraîne pas nécessairement $f = g$. Les fonctions f et g peuvent différer sur un ensemble de mesure nulle : c'est ce qu'avait montré Lebesgue et c'était là où jouait la souplesse de l'intégrale nouvelle, captant les singularités dans des ensembles de mesure nulle. Enfin $d(f, g) + d(g, h) \leq d(f, h)$. Ce sont les trois conditions posées pour définir un « écart ». Comme E. Fischer venait encore de l'établir aux *Comptes Rendus* du 13 mai, si $\lim d(f_n, f_{n+k}) = 0$ uniformément en k lorsque n tend vers l'infini (tel est exprimé le critère de Cauchy appliqué à la situation décrite), il existe alors une fonction f , sommable et de carré sommable, donc dans (R), telle que la limite de $d(f, f_n) = 0$. Ainsi s'énonce la propriété pour (R) d'être complet. La fonction f n'est certes définie que presque partout comme limite de la suite de fonctions f_n , mais précisément on a « encadré » les éventuelles singularités du passage à la limite.

Troisième ingrédient, celui-là même qui permet de traiter la fonction comme une variable, vient le concept d'opération linéaire dont Fréchet n'oublie pas de faire remonter la définition à Jacques Hadamard. Il la définit précisément dans le cas du champ (R) comme une opération U , définie sur (R) et à valeurs numériques, et telle que

$$U(f_1 + f_2) = U(f_1) + U(f_2) \\ U(f) = \lim U f_n \text{ lorsque } f_n \rightarrow f, \text{ c'est-à-dire au sens de l'écart.}$$

L'hypothèse $U(\lambda f) = \lambda U(f)$ pour tout λ réel n'est pas imposée *a priori*, mais elle se déduit évidemment de l'additivité et de la continuité supposée de l'opération U . À ce détail, on constate que l'aspect vectoriel du champ (R) n'est pas encore souligné.

À ces trois ingrédients s'ajoute un moyen : c'est l'outil essentiel. Il s'agit du théorème d'équivalence que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de théorème de Riesz-Fischer, et dont nous avons déjà annoncé la présence comme fondamentale. Dans la terminologie moderne, ce théorème établit un isomorphisme entre deux espaces, l'espace L^2 qui vient d'être examiné (c'est le champ (R) de Fréchet) et l'espace des suites l^2 . Ce dernier est facile à décrire comme l'espace de toutes les suites $x = (x_n)_{n \geq 1}$, où pour tout $n \geq 1$, x_n est un nombre réel, de sorte que $\sum_{n=1}^{\infty} x_n^2$ converge. En fait cet espace est lui aussi muni d'un écart,

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (x_n - y_n)^2}.$$

Écart qui se trouve être sur l^2 une « distance », en ce sens qu'en plus des propriétés requises, $d(x, y) = 0$ implique effectivement l'égalité des deux suites, $x = y$ (soit $x_n = y_n$ pour tout $n \geq 1$). Il n'y a pas de presque partout qui joue dans le cas de l'espace l^2 , c'est un espace métrique.

On peut travailler sur L^2 aussi bien que sur l^2 . Ce théorème d'équivalence était tout neuf. Il venait d'être annoncé aux *Comptes Rendus* quelques semaines plus

tôt (11 mars 1907, et suivi d'un second le 2 avril). C'est évidemment la disponibilité de ce théorème qui a déclenché le travail de Fréchet ; il n'avait d'ailleurs pas encore connaissance de l'autre démonstration de la même représentation de L^2 par l^2 , donnée par Emil Fischer en Allemagne, mais également parvenue à Paris (*Comptes rendus* du 13 mai 1907 suivi d'un autre texte le 27 mai). Par une coïncidence prouvant combien les choses étaient mûres, l'ordre de présentation orale avait été inversé : Riesz exposa son résultat au séminaire de Göttingen le 9 mars, quatre jours après que Fischer l'eut fait à Brunn.

Nous n'avons pas encore dit le résultat auquel Fréchet parvenait. Or c'est pourtant par là que nous pouvons le mieux mesurer la motivation d'analyse qui poussait Fréchet. En effet, si d'espaces de fonctions il avait été déjà question, régnait en quelque sorte l'idée que seuls étaient intéressants, pour le mathématicien praticien s'entend, ceux de ces espaces ressemblant aux espaces de fonctions continues. Mais en mathématiques, les généralisations sont, du moins à court terme, les meilleures façons de s'éloigner d'un objet afin de mieux l'analyser. En l'occurrence, en généralisant, il s'agissait pour Fréchet de quitter le monde des fonctions continues, pour mieux envisager un objet que l'on désespérait de pouvoir traiter sur les fonctions continues elles-mêmes, à savoir les « opérations linéaires » (nous disons aujourd'hui les formes linéaires continues). Cette rupture fut fondatrice. Dans le champ (R), Fréchet peut indiquer : « À toute opération linéaire U , définie dans le champ (R), on peut faire correspondre une fonction $u(x)$ sommable et de carré sommable telle que l'on ait

$$U_f = \int_0^{2\pi} f(x)u(x)dx. »$$

S'il est donc de circonstance, le travail de Fréchet, non content de fournir une représentation d'une opération linéaire continue sur L^2 , caractérisait aussi ce que nous appelons aujourd'hui un sous-espace E relativement séquentiellement compact. C'est-à-dire qu'il donnait une condition nécessaire et suffisante pour que d'une suite d'éléments de E on puisse extraire une sous-suite convergente vers une fonction de L^2 et, bien sûr, au sens de l'écart sur L^2 . C'était son deuxième théorème, et il nous fournit ainsi une très bonne image du fonctionnement de cette analyse à ses débuts.

Le réalisme des séries de Fourier

Le rôle des séries de Fourier restera majeur tant à la naissance que pour tout le développement de l'analyse fonctionnelle. Ceci est d'autant plus intéressant que ces séries allaient elles-mêmes entrer dans les années 1930 dans un jeu d'algèbre structurale d'où sortira l'analyse harmonique abstraite. Et le rôle de ces séries n'est pas fortuit, car elles portent l'obligation concrète dont les a chargées le fondateur et qui a pscé sur l'analyse fonctionnelle. L'isomorphisme que F. Riesz exhibe entre $L^2([0, 2\pi], dx)$ et l^2 s'exprime très simplement en associant à une fonction périodique $f : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}$ sa série de Fourier

$$(1) \quad f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx),$$

les coefficients a_0 , a_n et b_n se calculant pour tous les entiers $n \geq 0$ par les formules de Fourier :

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx dx \text{ et } \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx dx.$$

Dès lors, si à f on fait correspondre la suite $(a_0, a_1, b_1, \dots, a_n, b_n, \dots)$, il est vérifié, selon l'inégalité de Bessel (1824) issue aussi bien d'un calcul plus ancien de M.A. Parseval (1806) que :

$$\sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) < \infty.$$

De L^2 on va bien par les coefficients de Fourier sur l^2 : l'écart sur L^2 correspond alors à celui sur l^2 . Ce que Riesz a obtenu de plus, c'est que la correspondance injective du fait de l'inégalité de Bessel, est surjective. Tout élément de l^2 provient de la façon dite d'un élément de L^2 . Tel est l'isomorphisme, l'équivalence dont nous parlions.

Le deuxième théorème de Fréchet s'exprime très bien à partir de cet isomorphisme. « Soit E un ensemble de fonctions sommables et de carrés sommables dans l'intervalle $(0, 2\pi)$. Pour que de toute infinité de fonctions de E on puisse extraire une suite infinie ayant une fonction limite, il faut et il suffit

— qu'il existe un nombre positif M tel que l'on ait, pour toute fonction de l'ensemble E

$$\frac{a_0^2}{2} + a_1^2 + b_1^2 + \dots + a_n^2 + b_n^2 + \dots < M ;$$

— qu'à tout nombre positif ε on puisse faire correspondre un entier n tel que l'on ait, pour toute fonction de l'ensemble E (n restant fixe),

$$a_n^2 + b_n^2 + a_{n+1}^2 + b_{n+1}^2 + \dots < \varepsilon. »$$

On conçoit aisément pourquoi le mot utilisé pour décrire la première condition a été tiré de la pratique géométrique euclidienne : E est un sous-ensemble « borné ». Quant à la deuxième condition, son appellation tient bien sûr au vocabulaire de l'intégrale : l'ensemble E est uniformément intégrable, ce qui sur l^2 se lit simplement par l'inégalité d'uniforme sommabilité, $\sum_{k \geq n} (a_k^2 + b_k^2) < \varepsilon$. Géométrie euclidienne et

théorie de l'intégrale, voilà la réunion constitutive de l'analyse fonctionnelle, qui s'est faite grâce au biais « réaliste » des séries de Fourier.

Alors même que le résultat a une implication géométrique, la démonstration de Fréchet est toute analytique au sens où les idées géométriques ne jouent apparemment aucun rôle : Fréchet travaille seulement sur une représentation de f en série. On peut s'étonner que, pour la preuve, il ne commence pas par déterminer les formes linéaires continues sur l^2 ; il obtiendrait qu'une telle forme est fournie par un élément de l^2 . Le passage à L^2 ne serait alors que lecture de l'isomorphisme. Fréchet a l'œil rivé sur l'espace fonctionnel et c'est en témoin des fonctions qu'il s'exprime.

Si, entre autres, l'écart avait été introduit à partir de la géométrie euclidienne, on en paraissait bien loin.

En effet, ce qui est utilisé pour le théorème d'isomorphisme entre L^2 et l^2 tient à deux propriétés du système trigonométrique $(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\cos x}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin x}{\sqrt{\pi}}, \dots, \frac{\cos nx}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin nx}{\sqrt{\pi}}, \dots)$,

système qu'il est possible d'écrire, d'une façon plus générale – voilà le mouvement d'abstraction – comme une suite $(\varphi_n(x))_{n \geq 1}$ de fonctions de L^2 telles que

$$(A) \int_0^{2\pi} \varphi_n(x) \varphi_m(x) dx = 0 \text{ pour } n \neq m,$$

$$\int_0^{2\pi} (\varphi_n(x))^2 dx = 1.$$

(B) Il n'y a parmi les fonctions φ de L^2 que la fonction nulle qui soit telle que $\int_0^{2\pi} \varphi(x) \varphi_n(x) dx = 0$ pour tout $n \geq 1$.

La propriété (A) est l'orthonormalité du système $(\varphi_n)_{n \geq 1}$ et la propriété (B) son caractère « complet », c'est-à-dire celle qui tient compte de l'infini pour en dire l'exhaustion alors qu'en dimension finie il suffisait de numéroter : on dira bientôt « total » pour éviter la collision avec l'acception topologique de l'adjectif « complet » déjà utilisé pour fixer dans un espace le critère de Cauchy.

Dès lors, avec $\alpha_n = \int_0^{2\pi} f(x) \varphi_n(x) dx$ les coefficients de Fourier généralisés des fonctions f et g de L^2 , on dispose de la relation :

$$(9) \int_0^{2\pi} f(x) g(x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \beta_n.$$

Deux fonctions f et g sont dites orthogonales lorsque (9) est nul. Riesz a très bien perçu que l'heureuse occasion de cette géométrie n'était pas générale : pour l'écriture analogue de l'espace $L^1([0, 2\pi], dx)$ par ses coefficients de Fourier, « jusqu'à aujourd'hui on ne sait pas le dire » exprime-t-il. C'est sur ces considérations que Riesz rejoint précisément le travail exactement contemporain de Hilbert sur les équations intégrales, auquel une forme géométrique était déjà donnée.

Pourtant, la question était d'une nature toute différente. Il s'agissait, une fonction $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ étant donnée, de trouver une fonction $\varphi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ telle que

$$(10) f(x) = \varphi(x) - \lambda \int_a^b K(x, y) \varphi(y) dy,$$

la fonction K – le noyau – étant également donnée, et λ figurant un paramètre dont la présence devait se révéler essentielle pour la classification des solutions. Cette rencontre s'avéra particulièrement riche : elle insérait l'analyse fonctionnelle dans un champ déjà élaboré.

Orthogonalisation de l'analyse

De fait, les équations intégrales faisaient depuis longtemps partie de l'analyse que l'on pourrait appeler concrète. Abel au début du XIX^e s., Sturm et Liouville vers 1840 à partir des équations différentielles linéaires du second ordre avec conditions aux limites qui portent leur nom où ils introduisent la fonction de Green les intégrant, Carl Neumann vers 1870 à propos du

problème de Dirichlet – trouver une fonction dont le laplacien soit nul à l'intérieur d'un domaine et prenant des valeurs fixées à son bord –, Helmholtz à la même date avec son équation d'un problème aux valeurs propres du laplacien, Poincaré vers 1890 avec sa méthode du balayage pour le même problème, avaient tous montré la pertinence des équations intégrales. Tant pour la résolution des problèmes que pour la suggestion de méthodes et d'idées générales. Finalement, Vito Volterra en 1896, par plusieurs articles aux *Atti de Torino* et aux *Rendiconti della Accademia dei Lincei*, fixait une théorie pour l'équation (10) dans laquelle il supposait le noyau K « triangulaire », c'est-à-dire nul dès que y dépasse x . Autrement dit, il posait l'équation

$$(11) f(x) = \varphi(x) - \int_a^x K(x, y) \varphi(y) dy.$$

Dont il obtenait l'existence et l'unicité de la solution, par itération et donc de façon constructive jusque et y compris pour les besoins numériques ; la convergence s'avérait uniforme ; le paramètre λ n'apparaissait pas utile ; Volterra liait la résolution à l'algorithme d'un système d'équations linéaires. Cette piste algébrique, avec ce qu'il faut de convergence, aboutissait splendidement chez le Suédois Ivar Fredholm qui pouvait attacher (10) en toute généralité.

Jouant du paramètre λ , introduisant un déterminant fonctionnel $D(\lambda)$ exprimé sous forme de fonction analytique ce qui plaçait de plein droit la variable complexe, il établissait sous l'hypothèse de continuité du noyau K un résultat d'énoncé très simple, connu sous le nom d'alternative de Fredholm. Ou bien λ n'est pas un zéro de $D(\lambda)$, auquel cas la solution de (10) est unique, exprimable par une intégrale faisant jouer le résolvant, fonction analytique de λ et de plus l'équation homogène associée à (10) (c'est (10) en faisant $f = 0$) n'a que $\varphi = 0$ pour solution. Ou bien λ est un zéro de $D(\lambda)$, et l'équation (10) n'a de solution que si la fonction f satisfait certaines conditions intégrales, la solution faisant intervenir une combinaison linéaire quelconque de certaines fonctions, les solutions de base de l'équation homogène correspondante à ce λ . La publication définitive sortait en 1903 aux *Acta Mathematica*.

L'annonce des résultats déclencha une forte réflexion chez le mathématicien régnant à Göttingen : sa première publication sur les équations intégrales sort en 1904 aux *Göttingen Nachrichten*. David Hilbert utilisa un moyen relativement nouveau dans la pratique mathématique. Celui de mettre directement sur le sujet plusieurs de ses étudiants en thèse : O.D. Kellogg, E. Schmidt, H. Weyl, A. Speiser, etc., de sorte que l'École de Göttingen s'imposa par la cohésion de ses résultats. Ni Hadamard ni Volterra n'eurent le même réflexe, ni peut-être le même nombre d'étudiants compétents. La concurrence évoquée n'est donc guère nationale, en dépit de ce que la tension d'avant-guerre pourrait suggérer ; elle se déroule entre deux pratiques universitaires, l'école encadrée et la liberté de l'individualisme du chercheur.

Elle est résolument algébrique (par discrétisation), et

porte sur un noyau K symétrique ($K(x, y) = K(y, x)$). Hilbert introduit une forme quadratique dont la réduction suivant les axes principaux l'orienta derechef vers une interprétation variationnelle d'extrêmes où jouent essentiellement les formes linéaires : il fait donc intervenir la dualité géométrique, c'est-à-dire la possible lecture d'un vecteur de \mathbb{R}^n comme forme linéaire sur \mathbb{R}^n grâce au produit scalaire dont Hamilton et Maxwell avaient formalisé l'intervention :

$$\langle x, y \rangle = \sum_{n=1}^{\infty} x_n y_n.$$

La formule « fondamentale » à laquelle il aboutit témoigne de cette mise en place des formes bilinéaires. Elles portent sur des variables qui sont désormais des fonctions ; et ce nouveau statut est judicieusement réduit à l'algébrique des équations linéaires par la notation même des fonctions en x et y , ce sont en fait $x(s), y(s)$.

$$I(x, y) = \int_a^b \int_a^b K(s, t) x(s) y(t) ds dt = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n} (\int_a^b x(s) \varphi_n(s) ds) (\int_a^b y(t) \varphi_n(t) dt).$$

$J(x) = I(x, x)$ est une « fonction quadratique de fonction », et $I(x, y)$ en est la « forme polaire » ; les fonctions φ_n sont les fonctions propres normées (« normierte Eigenfunktionen »). Elles satisfont à la fois

$$\varphi_n(s) = \lambda_n \int_a^b K(s, t) \varphi_n(t) dt,$$

et

$$\int_a^b (\varphi_n(t))^2 dt = 1.$$

En outre, elles vérifient les relations d'orthogonalité

$$\int_a^b \varphi_n(t) \varphi_m(t) dt = 0.$$

Hilbert a supposé que les valeurs propres λ_n , qui constituent le « spectre », sont des racines simples de « l'équation caractéristique » qui est exactement le déterminant fonctionnel de Fredholm. En plus, une gradation variationnelle classe les fonctions propres, en ce sens que

$$\text{Sup } J(x) = \frac{1}{\lambda_n},$$

lorsque la borne supérieure est prise sur toutes les fonctions continues x , dont l'intégrale du carré est l'unité, et qui sont orthogonales à toutes les fonctions propres antérieures

$$\int_a^b \varphi_k(t) x(t) dt = 0 \text{ pour } k = 1, \dots, (n-1).$$

À son tour, Hilbert faisait intervenir un extrême sur un ensemble de fonctions. Il avait naturellement la valeur de la n -ième valeur propre selon $\frac{1}{\lambda_n} =$

$$\int_a^b (\varphi_n(t))^2 dt.$$

Ce qui frappe le plus dans cette première « théorie spectrale » de Hilbert, c'est qu'elle donne son caractère intrinsèque – sa validité – aux séries de Fourier dont on avait pu penser qu'elles ne constituaient qu'un outil performant. Elles sont bien un modèle de ce qui ne

peut manquer de survenir dès que l'on aborde les équations différentielles en faisant jouer l'intégrale (10) qui tient compte de conditions aux limites. On assiste donc au triomphe de l'analyse par le développement d'une fonction selon des fonctions « propres » formant un système total.

Sur ces mêmes développements, un point de vue voisin, mais différent, est présenté par Erhard Schmidt dans sa thèse soutenue en 1905 à Göttingen. C'est que d'emblée l'orthogonalité y est centrale, avec pour effet voulu de créer une géométrie, certes à une infinité de dimensions, pour laquelle prédomine le produit scalaire

$$(12) \langle f, g \rangle = \int_a^b f(x) g(x) dx.$$

Et par conséquent jouent les fonctions de carré intégrable, quand bien même Schmidt se limite comme Hilbert aux fonctions continues. Avec les moindres carrés, est donc perceptible l'influence d'un mémoire du Danois Jorgen Gram (1881). Schmidt n'éprouve donc nullement le besoin de passer comme Hilbert par le modèle algébrique discret ; il présente directement la géométrie ainsi créée (« Geometrie in einem Funktionenraum »).

Tout devient alors lumineux. Ainsi, si les fonctions propres de l'équation forment un système total (c'est la même notion que celle de Riesz), c'est bien coordonnée à coordonnée que se lit au final l'équation (10). Voilà effective la « méthode des coordonnées » dont parlait Riesz. La fonction inconnue $\varphi(t)$ est déterminée par les β_n dans l'écriture $\sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \varphi_n(t)$, le noyau $K(s, t) =$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\varphi_n(s) \varphi_n(t))}{\lambda_n}, \text{ et la fonction donnée s'écrivant elle}$$

$$f(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \varphi_n(s). \text{ D'où la traduction de (10) sous la}$$

$$\text{forme} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \varphi_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \varphi_n(t) - \lambda \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n(s)}{\lambda_n} \beta_n,$$

qui se réduit bien à

$$\alpha_n = \beta_n (1 - \frac{\lambda}{\lambda_n}) \text{ pour tout } n \geq 1.$$

Hilbert reprend alors l'année suivante toutes ces idées de Schmidt et adopte *ipso facto* la géométrie de l'orthonormalisation à partir d'un « orthogonales vollständiges Funktionensystem », et il adapte même sa théorie des formes quadratiques en dimension finie pour le cas fonctionnel. Il retrouve l'espace l^2 dont il a déjà été question, note $\langle x, y \rangle$ le produit scalaire dans cet espace de suites et y envisage les formes bilinéaires symétriques continues. Il les caractérise par une hypothèse de borne

$$|K(x, y)| \leq M,$$

pour toutes les suites $x = (x_n)_{n \geq 1}$ et $y = (y_n)_{n \geq 1}$ seulement assujetties à $\langle x, x \rangle \leq 1$ et $\langle y, y \rangle \leq 1$.

En cette année 1907, grâce à Fréchet, Riesz, Schmidt et Hilbert, les constituants de l'analyse fonctionnelle

sont tous, non seulement en place, mais reliés. C'est à la fois une méthodologie traitant de façon unifiée l'analyse (développements en séries) et l'algèbre (équations linéaires), et une géométrie de l'orthogonalité comme le constate Hilbert dans un discours pour le Congrès international des mathématiciens de Rome de 1908. Le domaine est capable d'assurer un va-et-vient entre des problèmes aussi concrets que les équations intégrales (et l'expression convergente de leurs solutions en série) et les espaces abstraits à la Fréchet dont le développement propre paraît inéluctable.

C'est sur cette base très originale de 1907, où l'on a vu la réunion de mathématiciens italiens, allemands, hongrois ou français, que l'analyse fonctionnelle se développe : tel ou tel facteur, topologie, algèbre, calcul par approximation, ou formalisation abstraite, pourra être particulièrement façonné par un auteur ou par une école et faire un style, l'analyse fonctionnelle persévérera tant que la liaison sera maintenue par la communauté mathématique. Et comme il s'agit d'un enjeu, pour ce faire paraissent périodiquement des articles ou des livres rassembleurs, des « surveys » venant ponctuer les étapes mais surtout, en rappelant les différents fronts dont celui des calculs numériques, manifester l'unité, et plus encore exhorter à ne pas la perdre.

En 1913, par exemple, le livre de Riesz sur les systèmes d'équations linéaires à une infinité d'inconnues, et la même année celui de Volterra jouent ce rôle qu'il faut bien qualifier de normatif. Hadamard, l'année précédente, avait rattaché l'analyse fonctionnelle au déroulement de l'histoire des mathématiques depuis l'analyse infinitésimale de Newton, de Leibniz et des Bernoulli. En 1916, Griffith-Conrad Evans donnait au colloque de Cambridge de l'American Mathematical Society une conférence dont l'intitulé hésite entre la formulation d'une discipline et la restriction à une technique particulière : *Functionals and their applications. Selected topics, including integral equations*. Est notable la liaison avec d'autres façons mathématiques : l'analyse fonctionnelle non encore nommée n'a aucune prétention à la solitude impériale.

La filière de la linéarité :
l'universalité des espaces de Banach

En 1916, Riesz réalise aussi bien la linéarité pour l'espace des fonctions (« Funktional Raum ») – structure d'espace vectoriel réel ou complexe – que pour les opérateurs sur ces espaces. Il la cadre dans cet espace B par une norme notée comme aujourd'hui $\|f\|$, et si le modèle de B est celui des fonctions continues définies sur un segment, fonctions numériques ou prenant aussi bien des valeurs complexes, avec $\|f\| = \text{Sup } |f(x)|$, l'expression des propriétés de la norme est volontairement générale

- (α) $\|f\| = 0$ si et seulement si f est la fonction nulle (élément 0 de l'espace fonctionnel)
(β) $\|\lambda f\| = |\lambda| \|f\|$ pour tout λ complexe
(γ) $\|f + g\| \leq \|f\| + \|g\|$ pour tous f, g de B

Pour un opérateur linéaire U de B dans B, c'est-à-dire satisfaisant pour tout λ complexe, et tout couple de fonctions f et g , les deux relations

$$(\delta) U(\lambda f) = \lambda U(f)$$

et

$$(\epsilon) U(f + g) = U(f) + U(g),$$

la continuité est définie par l'existence d'une constante M (13) $\|U(f)\| \leq M \|f\|$ pour toute f de B.

La meilleure constante M possible est notée $\|U\|$: c'est la norme de l'opérateur U car ses propriétés sont précisément celles d'une norme.

L'analyse fonctionnelle a enfin son objet principal, d'autant que Riesz attache le critère de Cauchy à l'espace vectoriel normé B, exigeant que si $\lim \|f_n - f_{n+k}\| = 0$ uniformément en k (≥ 1) lorsque n tend vers l'infini, il existe f dans B telle que $f = \lim f_n$. Il ne fixe pourtant pas un vocabulaire – espace vectoriel normé, espace complet – que donnera Stefan Banach seize années plus tard. L'espace de Banach intervient donc dans la pratique des analystes bien avant son baptême. Ce mouvement de retard, si l'on peut dire, est caractéristique : l'abstrait doit avoir donné ses preuves au préalable.

Dans ce cadre, est réinterprétée par Riesz la notion topologique de « complète continuité » que Hilbert avait heureusement introduite.

Ce faisant, Riesz retrouvait la lignée « abstraite » de Fréchet. L'analyse fonctionnelle changeait ses marques. La théorie des équations intégrales, transcrite dans le langage des espaces de Banach, se lit désormais d'une façon purement algébrique, avec un déploiement de calculs concernant les noyaux et les images dans $B = C[a, b]$ de l'opérateur $U - \lambda I$, où I désigne l'identité. En 1916, cette théorie est fixée sous la forme que nous lui connaissons aujourd'hui dans tous les manuels, à quelques perfectionnements près apportés par Schauder en 1930.

Mais ce que Riesz effectue n'est pas un refus de l'interprétation géométrique ; elle est seulement délestée de son trop euclidien. Il vaudrait mieux dire que Riesz, grâce à la dimension infinie imposée par les espaces fonctionnels, contraint à discerner, en dimension finie, une géométrie qui ne repose pas sur l'orthogonalité. Tout à fait typique de cette pensée est son théorème assurant que l'opérateur identité n'est compact, dans un espace de Banach, que si ce dernier est de dimension finie. Le théorème est structurel, mais il est tout à la fois pratique, puisqu'il intervient pour reconstruire la théorie des équations intégrales dans les espaces de Banach, et qu'il s'adapte même au cadre particulier privilégié par Hilbert. Pour une dizaine d'années, la géométrie orthogonale est éclipsée.

L'action de l'école polonaise de mathématique intervient dans ce contexte, juste après la Première Guerre mondiale : c'est une décision quasi nationale. Quelques jeunes choisissent l'analyse fonctionnelle comme champ – il faut reconstruire –, car ils ont conscience tout à la fois de son intérêt pour réorganiser une large

partie du fonds mathématique mais aussi du petit nombre d'experts – donc de rivaux – sur le domaine et tout autant de la relative facilité à le pénétrer. La nouvelle revue *Fundamenta Mathematica* de 1920, puis à partir de 1929 la revue *Studia Mathematica* leur serviront de lieu d'expression et elles deviendront les organes majeurs de l'analyse fonctionnelle qui trouve enfin son nom ; il faut ajouter que ces savants agissent de même avec la logique mathématique et la topologie de sorte que l'association est extrêmement fructueuse. De façon tout à fait caractéristique, les Banach, Sierpinski, Mazur, Orlicz ou Mazurkiewicz, etc., balayent dans le savoir mathématique toute une série de notions interprétables dans le cadre abstrait des espaces de Banach comme il apparaît dans le livre de Banach paru en 1932, *Théorie des opérations linéaires*.

Tel est inconsciemment le sort de l'approximation numérique des fonctions qui devient, sous cet effet de relecture, une théorie. Il ne faut pas s'étonner de l'intervention de l'approximation. Outre que l'analyse fonctionnelle joue toujours du rappel « réaliste » aux problèmes de calcul, le concept d'espace de Banach constitue en lui-même une théorisation de l'approximation. En effet, imposer à un espace fonctionnel d'être complet, c'est permettre de travailler sur des sous-ensembles réguliers, par exemple celui des fonctions continues, ou celui des fonctions étagées, puis de passer à la limite selon une suite de Cauchy pour atteindre le cas d'un élément générique de l'espace en jeu. Ainsi, $C[a, b]$ muni de la norme quadratique n'est pas complet, mais son complété est précisément l'espace $L^2[a, b]$. De telle sorte que, tout naturellement, se « banachisent » des théorèmes classiques d'approximation. Par exemple le résultat de Weierstrass (1885) établissant que toute fonction numérique continue sur $[a, b]$ est une limite uniforme de polynômes.

L'assimilation à l'analyse fonctionnelle n'est pourtant pas d'abord conçue dans le but d'améliorer les convergences de procédés de calculs, mais dans celui de comprendre les raisons de leur divergence éventuelle. Ce sont les « pathologies » qui focalisent l'attention et ce transfert de la régularité à l'irrégularité contribue à façonner un nouveau style de l'analyse fonctionnelle, en tout cas l'éloigne encore plus de la géométrie euclidienne supposée porteuse de toutes les régularités.

Issus d'une recherche dans laquelle s'illustrent H. Steinhaus, S. Saks, O. Tøplitz et E. Hellinger, les théorèmes généraux qu'énonce Banach constituent aujourd'hui encore le socle théorique de l'Analyse fonctionnelle et même leur démonstration reste celle forgée par Banach. Trois théorèmes sont prédominants. Le théorème de la borne uniforme, dit aussi de Banach-Steinhaus, énonce : soient B et B' deux espaces de Banach et U_n des opérateurs linéaires continus de B dans B'. Si pour tout x de B, U_n converge dans B', il existe un opérateur linéaire continu U de B dans B' tel que

$$\lim \|U_n(x) - U(x)\| = 0,$$

et en particulier $\text{Sup } \|U_n\| < \infty$. La lecture « négative » de ce théorème est qu'il y a divergence si cette borne supérieure des normes de U_n est infinie.

Le théorème de l'application ouverte montre une régularité : un opérateur linéaire et continu U d'un espace de Banach B sur un autre B' transforme tout ouvert en un ouvert. En particulier, si U est bijectif, son inverse est aussi linéaire et continu. La continuité est donc dans certains cas une plus-value automatique. Enfin, il y a le théorème du graphe fermé pour lequel nous adoptons la formulation même de Banach, qui se place automatiquement sur les espaces éponymes, et pour qui l'adjectif linéaire implique *de facto* la continuité. « Toute opération additive $y = U(x)$ qui remplit la condition,

$$\lim x_n = x_0 \text{ et } \lim U(x_n) = y_n \text{ entraînent } y_0 = U(x_0).$$

est une opération linéaire. »

En fournissant une architecture particulièrement efficace, au point de rendre quasiment inutiles de grands pans de la littérature antérieure, l'ouvrage de Banach n'en débouche pas moins sur des problèmes. Un peu comme le célèbre tableau de la classification périodique des éléments chimiques de Mendéléïev, le tableau des propriétés d'isomorphismes ou d'isométries dans les différents espaces connus s'avère particulièrement efficace par ses trous, « problèmes ouverts, d'ailleurs pas faciles » commente laconiquement Banach. Son ouvrage a de ce fait été la matrice de recherche jusqu'au moins vers les années 1970. Comme il était accompagné de nombreuses remarques qui induisent d'autres conceptions, c'est en fait tout un monde mathématique auquel Banach a su donner une forme.

L'utilisation intensive des espaces de Banach ne saurait pourtant cacher l'intervention d'une inspiration que l'on peut qualifier de rivale. C'est celle des espaces dits de Hilbert ; et si ces derniers ne sont qu'un cas particulier d'espaces de Banach, le concept d'orthogonalité qui les anime les place dans un cadre mental bien différent.

La géométrie bien réglée des « hilbertiens »

Un retour à l'inspiration géométrique de E. Schmidt et de F. Riesz se produisit l'année même de la publication du livre de Banach. Ce retour est l'œuvre d'un Hongrois, John von Neumann dans ses *Fondements mathématiques de la mécanique quantique* dont l'impact fut considérable. C'est que, d'emblée, l'assistant de Hilbert à Göttingen montrait l'équivalence des deux théories de la mécanique quantique, celle matricielle et discontinuiste de Heisenberg et celle, continuiste, de Schrödinger. À nouveau, le théorème d'isomorphisme de Riesz-Fischer était interprété : il faisait comprendre le lien mathématique entre le « discret » (l^2) et le « continu » L^2 . Von Neumann peut alors définir « l'espace abstrait » de Hilbert : c'est ce qu'il y a de commun entre l^2 et L^2 .

Les théorèmes de liaison qui s'ensuivent ne doivent

pas cacher une forte opposition conceptuelle entre le côté « banachique » et le côté « hilbertien » de l'Analyse fonctionnelle. Il fut ainsi considéré comme une victoire que le banachique théorème de point fixe de Schauder puisse se démontrer en fait par réduction au cas hilbertien le plus simple, celui de l'espace l^2 et sur le seul « cube de Hilbert », à savoir le sous-ensemble

des suites $x = (x_n)_{n \geq 1}$ de l^2 telles que $|x_n| \leq \frac{1}{n}$ qui est

convexe et compact (Dunford-Schwartz, 1958). Les espaces de Sobolev constituent la version la plus proche possible du point de vue hilbertien pour les espaces fonctionnels.

Cette rivalité et cette concurrence sont bien naturelles pour des théories efficaces. Mais l'opposition concerne des styles de pensée. À la manière même dont Cantor manifestait la puissance de sa théorie de la cardinalité en exhibant la nécessaire existence d'un nombre transcendant, Banach enchaînait aussitôt ses théorèmes de convergence par la preuve de l'imparable existence d'une fonction numérique continue dérivable nulle part. Et même si ses théorèmes peuvent se lire aussi bien positivement que négativement, il privilégiait ostensiblement le côté négatif, c'est-à-dire l'irrégularité. Même dans l'exhibition de propriétés géométriques en dimension finie. La tendance que nous qualifions d'hilbertienne, par son aspect euclidien, s'adapte par contraste bien mieux à prouver des régularités.

Première régularité évidente, dans un espace de Hilbert le produit scalaire est le seul état possible d'une forme linéaire continue. Tel était précisément le résultat de la lecture du premier théorème de Fréchet de 1907, même s'il ne concernait qu'un espace de Hilbert particulier, l'espace L^2 . En 1935, le cas était réglé pour tous.

On ne manquera pas de copier la démonstration pour les espaces de Banach, ce qui contraignit à définir des espaces particuliers, ceux pour lesquels pour tout hyperplan fermé et pour tout élément de l'espace de Banach, il existe une meilleure approximation. En 1964, R.C. James établissait qu'un tel espace était nécessairement réflexif, dont il suffit ici de savoir que c'est, pour un Banach, une des façons d'être proche d'un Hilbert.

La propriété de représentation par un produit scalaire a des répercussions considérables sur la résolution des équations aux dérivées partielles : la méthode en question, dite de Galerkin, a été généralisée de multiples façons et est à l'origine des méthodes variationnelles et des éléments finis. Un théorème la dirige, dit de Lax-Milgram : si un opérateur linéaire continu A d'un Hilbert dans lui-même est coercitif (il existe a et pour tout x de H , $\langle Ax, x \rangle \geq a \langle x, x \rangle$), il est inversible et l'opérateur inverse est continu, de norme inférieure à $\frac{1}{a}$. La représentation sert aussi en théorie des jeux de

von Neumann et en probabilité, du moins après l'axiomatisation de ce champ réalisé par Kolmogorov dans les années 1930.

Autre direction, les opérateurs linéaires continus

dans un espace de Hilbert ont fait l'objet d'une classification systématique. On souhaitait récupérer les propriétés des opérateurs linéaires de la géométrie ordinaire, les similitudes, les rotations, les homothéties. Naturellement, il fallait sortir de la théorie spectrale de Hilbert, pour ne pas se limiter aux seuls opérateurs compacts. Le théorème de Stone est certainement le résultat le plus achevé et celui sur lequel le plus de résultats ont pu être construits : il donne la structure des opérateurs normaux, c'est-à-dire ceux qui commutent avec leur adjoint.

Pour les besoins de la mécanique quantique, von Neumann avait aussi introduit en 1932 des opérateurs auxquels on peut donner une propriété hermitienne mais qui ne sont pas définis partout sur l'espace de Hilbert. Telle se présente la question des opérateurs non bornés. Stone et von Neumann l'abordent en faisant jouer un rôle au théorème du graphe fermé, et ils créent un chapitre entièrement nouveau, dont les liens sont très forts avec la physique, et qui est toujours actif aujourd'hui. Mais il est beaucoup trop indépendant pour qu'on puisse le ranger sous la bannière de l'analyse fonctionnelle.

La dualité

Pour comprendre le développement de l'intégration, de l'analyse fonctionnelle, et de la topologie, un programme théorique d'envergure fut lancé par le groupe Bourbaki, réunion à partir de 1936 de quelques normaux, Jean Dieudonné, Henri Cartan, Claude Chevalley, Charles Ehresmann, etc., décidés sous la houlette de André Weil à présenter une construction économique, déductive et aussi générale que possible de toutes les mathématiques. Il s'agissait, en l'occurrence de la dualité, d'adopter une base minimale : les deux notions de linéarité et de continuité devaient suffire, réunies par la structure d'espace vectoriel topologique ; celle-ci servait tout à la fois de référence et de crible pour jauger la pertinence des méthodes déployées. Il y a une hypothèse de base : le général fait comprendre le simple. La théorie est terminée en 1953 : un livre entier des *Éléments de mathématique* de Bourbaki traite de la dualité, et est ainsi engagée toute l'analyse fonctionnelle précédente, du moins celle située en dehors de la filiation des espaces hilbertiens, avec la contribution de G. Mackey sur les topologies du dual.

Construction splendide, elle est néanmoins insuffisante. En théorisant la dualité, Bourbaki devait rendre compte de tout ce qui était nécessaire aux distributions. D'autant qu'un théorème de Schwartz (théorème des noyaux) réduisait la linéarité à une représentation par les distributions. Cela introduisait pourtant les distributions à valeurs vectorielles, et les produits tensoriels de distributions. Il fallait donc encore construire. Alexander Grothendieck, en 1953, effarait le monde mathématique en proposant, avec des démonstrations subtiles, des collections de topologies

et d'espaces enchevêtrés. À en perdre tout fil directeur, et en particulier le but de la résolution des équations de type linéaire.

De tout ce mouvement, il reste certainement la mise en évidence, parmi les espaces vectoriels topologiques, des espaces localement convexes : ceux-ci permettent l'existence de suffisamment de formes linéaires continues pour parvenir à déterminer à partir d'elles la norme d'un élément de l'espace de départ. Les résultats qui apparaissent comme les plus intéressants sont ceux mis sous leur forme relative à des espaces de Banach.

D'abord la boule unité du dual topologique d'un espace de Banach est compacte pour la topologie vague, c'est-à-dire celle dont cet espace dispose en rendant continues les seules formes linéaires issues de l'espace de départ (Alaoglu & Bourbaki, 1940). En particulier, la réflexivité d'un Banach dépend seulement de la compacité faible de sa boule unité. Pour la topologie faible d'un Banach — celle qui rend continues les seules formes linéaires continues sur cet espace — la compacité équivaut à la compacité séquentielle (Eberlein-Smulian). Ce résultat peut être considéré comme le point d'achèvement d'une quête débutée dans les années 1920 avec la formalisation de la topologie : traquer partout le dénombrable, soit pour le faire disparaître (dépassement de toutes les hypothèses de séparabilité des espaces, et en particulier pour les espaces de Banach ou pour les groupes localement compacts), soit pour en manifester la nécessité (par exemple avec le théorème de Banach-Steinhaus, ou plus généralement avec la topologie « polonaise »).

La dualité incontestablement a suscité sa propre géométrie, en parallèle de celle des espaces de Hilbert. Cette géométrie fait jouer un rôle majeur aux espaces convexes. Un résultat de Krein-Smulian est particulièrement notable : dans un Banach séparable, un convexe du dual est vaguement fermé si et seulement s'il est séquentiellement fermé. Des mêmes auteurs est le résultat selon lequel l'enveloppe convexe fermée d'un compact d'un Banach pour la topologie faible est encore compacte. Pour les convexes compacts, un résultat « géométrique » est dû à Krein et Milman (1940), à partir de la notion de point extrémal, c'est-à-dire de point qui ne peut pas être réalisé comme milieu de deux points distincts du convexe. Recouvre tout le convexe l'enveloppe convexe fermée des points extrémaux d'un convexe compact dans un espace de Banach, ou tout simplement dans un espace localement convexe comme est le dual d'un Banach pour la topologie vague. En 1959, de Branges en déduisait une preuve du théorème d'approximation de Stone-Weierstrass, celui qui assure qu'une sous-algèbre \mathcal{A} de l'algèbre des fonctions continues et à valeurs complexes sur un compact Y est dense pour la norme uniforme, dès lors que l'algèbre contient la fonction uniforme, et dès lors que l'algèbre contient la fonction égale à l'unité, avec une fonction f contenant aussi celle f prenant des valeurs conjuguées et sépare les points du compact (distinguant x de y dans le compact par une fonction de \mathcal{A} telle que $f(x) \neq f(y)$). Constituent une telle algèbre les polynômes à coefficients complexes sur un

segment de l'axe réel, ce qui redonne le classique théorème d'approximation de Weierstrass de 1885 qui peut être placé comme l'une des origines de l'Analyse fonctionnelle. Cette géométrie convexe, d'abord peu utilisée, reçut une forte impulsion dans les années 1960 de la part de Gustave Choquet qui, par des théorèmes de représentation un peu analogues au théorème spectral, en fit un élément majeur, et particulièrement élégant, de l'analyse.

Avec les produits tensoriels topologiques, la dualité avait pourtant pris un tour fortement algébrique. Et cette tendance était vérifiée dans d'autres parties de l'analyse fonctionnelle.

L'algébrisation des deux voies

Ainsi la tendance algébrique qu'avait pu représenter la première théorie spectrale de Hilbert avec le jeu sur les formes quadratiques finies, avait reçu une surprenante et nouvelle impulsion dans les années 1930. Norbert Wiener réussissait à donner une preuve structurale à des théorèmes d'analyse de séries, par exemple le fait que toute fonction f de $C^{\infty}[0, 2\pi]$ qui ne s'annule pas et dont la somme des valeurs absolues des coefficients de Fourier converge a un inverse $\frac{1}{f}$ ayant la même pro-

priété. De fait, il instituait une multiplication régulière sur un espace fonctionnel de Banach pour créer des algèbres commutatives de Banach, l'algèbre $C(a, b)$ pour la norme uniforme et la multiplication ordinaire des fonctions étant un bon exemple. Toutefois, des concrétisations bien différentes existent, comme l'espace $L^1[0, 2\pi]$, complété de $C^{\infty}[0, 2\pi]$ pour la norme de Lebesgue $\int_0^{2\pi} |f(x)| dx$, et muni de la convolution $(f * g)(x) = \int_0^{2\pi} f(x-y)g(y)dy$. Il est alors utile de voir que la mesure de Dirac δ_0 , quoique n'appartenant pas à l'algèbre, joue le rôle d'un élément unité : elle s'incorpore facilement comme distribution. Les noyaux de Fejér en constituent une approximation, d'où le nom moderne d'approximation de l'unité pour ceux-ci.

Cette algèbre est effectivement l'exemple type que la théorie des groupes topologiques, avec la mesure de Haar, généralisait à tous les groupes localement compacts G (*Théorie de l'intégration dans les groupes topologiques* de André Weil de 1940) : c'est l'algèbre de groupe $L^1(G)$, et le cas concret précédent correspond au groupe quotient $G = \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}$. Ce sont des formes linéaires continues χ bien particulières sur une telle algèbre A qui retiennent l'attention en place du dual topologique, celles qui conservent la structure multiplicative, c'est-à-dire vérifient en plus $\chi(f) \chi(g) = \chi(f * g)$. Leur ensemble est le spectre de l'algèbre A , un espace localement compact dans la topologie normée du dual.

Mais la véritable intervention de l'algèbre structurale vient de ce que l'ensemble des éléments de l'algèbre annihilant une forme spectrale est un idéal (sous-espace vectoriel de A tel que la multiplication

par un élément quelconque de l'algèbre reste dans le sous-espace), fermé, et maximal. Et réciproquement. Dès lors, l'algèbre A peut se représenter à partir du spectre, ce qui copie la représentation d'une algèbre commutative à partir de ses idéaux. C'est la théorie profonde que développe juste avant la guerre et pendant celle-ci l'école russe avec Gelfand, Raikov, Chilov, Naimark. Un théorème de structure est essentiel dans cette théorie : il n'y a que trois cas d'algèbre de Banach qui soient aussi bien des corps, le corps des réels, le corps des complexes et le corps des quaternions. Des conditions sur la norme d'une telle algèbre, et l'existence d'une involution créent les C^* -algèbres ($\|x\| = \|x^*\| = \sqrt{\|x^*x\|}$). La commutativité permet alors de caractériser les algèbres de Banach (avec élément unité) isométriquement isomorphes à l'espace des fonctions continues sur leur spectre : c'est une réalisation très commode de l'espace particulièrement favorisé de Banach en 1932, signal indéniable de l'algébrisation de l'analyse fonctionnelle « banachique » que l'on peut constater dans le livre de Z. Semadeni de 1971.

Aussi bien, pour une algèbre de groupe commutatif, le spectre est également un groupe localement compact G^\wedge dont la caractérisation est simple : c'est l'ensemble des caractères, homomorphismes continus de G dans le groupe topologique des nombres complexes de module 1 pour la multiplication. Pour $G = \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}$, $G^\wedge = \mathbb{Z}$ car tous les caractères sont donnés par les fonctions e^{inx} , n parcourant les entiers relatifs. Ainsi, un idéal maximal fermé de $L^1(\mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z})$ est l'ensemble des fonctions dont la série de Fourier a un de ses coefficients de Fourier mis sous la forme $\int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx = 0$. L'involution, dont on a déjà remarqué l'intervention magistrale en dualité, retrouvait en l'occurrence de ces algèbres de Banach tous ses droits puisque Pontrjagin montrait en 1934 que $G^{\wedge\wedge} = G$. L'analyse fonctionnelle s'unissait alors à la théorie de la représentation des groupes pour constituer l'Analyse harmonique, commutative telle que nous venons de succintement l'esquisser, mais aussi bien non commutative.

En effet, la théorie des algèbres de Banach, et notamment celle des C^* -algèbres, rencontrait l'analyse fonctionnelle « hilbertienne ». En ce sens qu'il était établi qu'une C^* -algèbre est toujours représentable comme sous-algèbre de l'algèbre des opérateurs linéaires continus d'un espace de Hilbert (Gelfand & Naimark, 1943). Et les techniques algébriques prédominaient tout autant dans la mesure où il avait été prouvé dès 1929 par J. von Neumann que le bicommutant d'une sous-algèbre involutive et unitaire de $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ en est la fermeture faible. Le commutant d'un sous-ensemble M de $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ est la famille des opérateurs qui commutent avec tous les opérateurs de M , et le bicommutant, le commutant du commutant. L'égalité au bicommutant définit les algèbres de von Neumann, liées aux C^* -algèbres. Les classer, en exhiber les particularités caractéristiques, a constitué une entreprise de plusieurs décennies, ponctuée par des livres faisant le point, dont

ceux particulièrement efficaces de Jacques Dixmier. Alain Connes parvenait en 1978 à la solution complète de ce problème.

Algébrisation encore et cette fois vers l'homologie, puisque Sakaï montrait que toute dérivation sur une C^* -algèbre est nécessairement continue, lançant ainsi une lignée de chercheurs comme Kadison, Ringrose, etc., à la trace de ces dérivations. Cette algébrisation a atteint des formes très évoluées avec l'intervention de Connes qui fait la cohomologie des algèbres de Banach. S'il en était besoin, le vocabulaire dans ces théories des opérateurs dans l'espace de Hilbert, avec la notion d'état et de formes par exemple, suffirait à en rappeler la signification physique.

L'éclatement

L'apparition en 1973 du contre-exemple d'Enflo marque indéniablement une rupture dans l'analyse fonctionnelle. D'abord parce qu'il prouvait que les espaces de Banach étaient mal adaptés à leur prétention initiale de résoudre les problèmes d'approximation. Banach, en effet, à la suite de Riesz et Hilbert, avait privilégié les opérateurs compacts dont la théorie spectrale était réglée. Et comme sur les Hilbert où ceci était acquis, il avait prévu que tout opérateur compact fût limite d'opérateurs de rang fini. Enflo montrait qu'il n'en était rien et que des espaces de Banach réflexifs et séparables ne vérifient pas cette conjecture. En revanche, l'espace type des fonctions continues sur un compact la vérifie. La démonstration de l'approximation dans le cas d'un Hilbert tient à l'existence d'une base topologique. Aussitôt revenaient sur le front des intérêts les Banach munis d'une base (théorie de Schauder, base de Haar comme base inconditionnelle, base de Markushevich). La rupture produite par le contre-exemple est toutefois plus de méthode, en ce sens que les démonstrations, bientôt simplifiées par Davis (1973/1975), n'utilisent pas le fond de la théorie des espaces localement convexes topologiques, ni les produits tensoriels topologiques. C'est tout un pan — particulièrement abstrait — de la dualité qui donnait l'impression d'être inutile.

Certes, par ses constructions mêmes, Enflo renforçait une voie banachique à proprement parler, et même une géométrie. En ce sens que c'était la façon dont s'empilaient les espaces de dimension finie dans les Banach, et la géométrie même induite par le Banach en dimension finie qui intervenait. Au fond, le cas de dimension finie avait été quelque peu négligé. Il est d'ailleurs symptomatique de constater que le théorème, connu sans aucun doute bien avant, et indiquant que dans un espace de dimension finie il n'y a qu'une seule topologie issue de n'importe quelle structure de Banach, n'ait été énoncé qu'en 1935 par Tychonoff. Par contre, la structure métrique peut différer considérablement. Plus généralement, retour a été fait aux espaces de Banach les plus simples, les espaces l^p , notamment l^1 et c_0 . Et à la façon dont ils peuvent apparaître dans un Banach. On peut alors dire que cette

Analyse, qui prend volontiers le nom de géométrie des espaces de Banach, renoue avec l'initiative de l'analyse fonctionnelle quant à l'approximation. Ce ne sont plus des fonctions toutefois qu'on approxime, mais des espaces, et on le fait par ceux de dimension finie : une théorie qualifiée alors de locale. Typique de cette nouvelle approche est le résultat de Rosenthal de 1974, prouvant qu'un espace de Banach B ne contient aucune copie d'un espace l^1 si et seulement si toute suite bornée à valeurs dans B possède une sous-suite de Cauchy pour la topologie faible. Symptomatiquement, une interprétation d'analyse classique, sous forme de dichotomie, peut être donnée de ce théorème, manifestant le comportement général d'une famille bornée en norme uniforme de fonctions numériques définies sur un compact. Et d'ailleurs, comme cela avait été le cas au début de l'analyse fonctionnelle, des théorèmes plus anciens trouvent leur bonne place dans les nouvelles théories. Ainsi le théorème de Dvoretzky-Rogers de 1950 qui assure que l'équivalence entre la convergence inconditionnelle d'une série dont les termes sont à valeurs dans un espace de Banach B et la convergence en norme caractérise les espaces B de dimension finie. On lui associe, à partir d'idées « métriques » de Grothendieck d'abord passées inaperçues dans sa théorie des produits tensoriels mais soulignées par Pelczynski et Lindenstrauss, et de travaux de Schwartz et Pietsch, les opérateurs p -sommants pour lesquels des théorèmes de représentation sont disponibles (un opérateur linéaire continu d'un Banach X dans un autre Y est p -sommant si pour toute suite $(x_n)_{n \geq 1}$ de X telle que $\sum_{n=1}^{\infty} \|x_n\|^p$ converge pour tout élément f du dual topologique de X on ait aussi bien $\sum_{n=1}^{\infty} \|T(x_n)\|^p$ convergent).

De fait, il s'agit aussi bien d'un pont entre la voie banachique et la voie hilbertienne puisque la motivation est de trouver les opérateurs d'un Banach dans un autre qui se factorisent par un Hilbert (Maurey, 1974 ; Pisier, 1987) ; l'introduction de la notion de type et de cotype est posée pour mesurer l'écart entre un Banach et un Hilbert.

La considération des opérateurs linéaires, même dans un Banach, a fait naître un domaine bien particulier, celui de la théorie des espaces invariants. Là aussi, ce sont des techniques *ad hoc* qui se sont révélées les plus efficaces, effaçant bien des travaux précédents. Un sous-espace fermé propre (ni 0, ni l'espace entier) M d'un Banach B est dit invariant pour un opérateur A , linéaire et continu de A dans A , si $A(M)$ est dans M pour tout m de M . La question de l'existence de tels sous-espaces reste ouverte pour un opérateur quelconque dans un espace de Hilbert. Dans le seul l^1 , existent des opérateurs n'ayant pas de sous-espace invariant (C.J. Read, 1984). Ce résultat négatif, et surprenant, ne clôt nullement la question. Onze années plus tôt, Lomonosov avait obtenu à partir d'un lemme technique devenu célèbre l'existence d'un sous-espace hyperinvariant (c'est-à-dire invariant pour tout

opérateur linéaire et continu commutant avec l'opérateur donné) pour un opérateur de $\mathcal{B}(\mathcal{H})$, non réduit à une homothétie et commutant avec au moins un opérateur compact non nul. En particulier il retrouvait un résultat de Aronszajn-Smith de 1954 assurant l'existence d'un sous-espace invariant pour tout opérateur compact.

En 1980, dans les *Mathematical Reviews*, la rubrique Analyse fonctionnelle était distingué de celle de la Théorie des Opérateurs, du Calcul des Variations, aussi bien que de l'Analyse harmonique abstraite. Elle avait donc éclaté, divisée en outre en des sous-rubriques dont nous avons vu successivement l'émergence : espaces vectoriels topologiques, espaces de Banach, dualité, distributions, algèbres de Banach (mais l'essentiel de l'affaire est rangé en analyse harmonique), C^* -algèbres et algèbres de von Neumann (qui enregistrent aujourd'hui le plus gros des contributions), méthodes catégorielles enfin (produits tensoriels par exemple). Naturellement, ne sont pas comptabilisées les applications directes (probabilités, éléments finis, analyse convexe, théorie de l'approximation), ou tout simplement l'utilisation du vocabulaire et des concepts de l'analyse fonctionnelle dans d'autres domaines. Si donc des secteurs paraissent très actifs — algèbres d'opérateurs et géométries des espaces de Banach — peut-on encore parler aujourd'hui de l'analyse fonctionnelle en tant que discipline mathématique autonome ? La réponse n'est plus aussi évidente qu'il y a vingt années. Il faut certes remarquer la tendance, très forte depuis les années 1970, au mélange des disciplines pour produire des théories efficaces : empruntant à beaucoup, la théorie de l'indice d'Atiyah-Singer en est l'exemple le plus marquant, et il faudra sans doute ajouter la démonstration de la conjecture de Fermat, où l'on voit de l'algèbre, la théorie des courbes elliptiques, et les représentations de groupes se conjuguer. Est-il possible alors de parler au moins d'un objectif commun aux différentes branches de l'analyse fonctionnelle ? Que reste-t-il des voies banachique et hilbertienne ? Il est au moins clair que les hilbertiens ont un modèle universel : tout Hilbert est de la forme l^2 , quitte à prendre un ensemble d'indices quelconque et non nécessairement dénombrable. Il n'existe pas de modèle pour un Banach, au sens où les fonctions continues sur un compact peuvent présenter trop d'irrégularités. C'est peut-être dans l'élaboration d'un bon succédané des espaces de Banach que réside un futur commun. Mais, même s'il n'y en a pas, l'Analyse fonctionnelle, conceptualisée avec le siècle, aura été pendant tout le siècle l'un des domaines les plus inventifs des mathématiques et les plus directement tenus à l'intervention dans les autres sciences.

▷ ACZEL J. & DHOMBRES J., *Functional Equations in Several Variables*, Cambridge Univ. Press, 1989.
— BERNKOFF M., « The development of function spaces with particular reference to their origins in integral equations theory », *Arch. Hist. Ex. Sc.*, 4, 1966-1967, p. 1-96. — BOURBAKI N., *Éléments d'Histoire des Mathématiques*, Paris, Hermann, 1974.
— BRELOT M., « Les étapes et les aspects multiples de la théorie

du potentiel». *L'Enseignement mathématique*, 2^e série, t. 1, 1972, p. 1-36. — BROWDER F.E., « The relation of functional analysis to concrete analysis in 20th century mathematics », *Hist. Math.*, 2, 1965, p. 577-590. — DIEUDONNÉ J., *Panorama des mathématiques pures : le choix bourbachique*, Paris, Gauthier-Villars, 1978. — DUGAC P., « Histoire des espaces complets », *Revue d'Histoire des Sciences*, 37, 1984, p. 3-29. — FRÉCHET M., *Les mathématiques et le concret*, Paris, PUF, 1955. — HAWKINS T., *Lebesgue's Theory of Integration. Its origin and development*, New York, Chelsea Publ. Comp., 1975. — JAMMER M., *The conceptual development of quantum mechanics*, New York, Mc Graw Hill, 1966. — KREYSZIG E., « The Establishment of Functional Analysis », *Hist. Math.*, 11, 1984, p. 258-321. — MICHEL A., *Constitution de la théorie moderne de l'intégration*, Paris, Vrin, 1992. — MONNA A.F., *Functional Analysis in Historical Perspective*, Utrecht, Oosthoek, 1973. — PIER J.P., *L'Analyse harmonique. Son développement historique*, Paris, Masson, 1990. — REID C., *Hilbert*, Heidelberg, Springer-Verlag, 1970. — ROWE D.E., « Klein, Hilbert, and the Göttingen Mathematical Tradition », *Osiris*, 5, 1989, p. 186-213. — SIEGMUND-SCHULTZE R., « Der Beweis des Hilbert-Schmidt Theorem », *Arch. Hist. Ex. Sc.*, 36, 1986, p. 251-270. — STEEN L.A., « Highlights in the history of spectral theory », *Amer. Math. Monthly*, 80, 1973, p. 359-381. — TAYLOR A.E., « A study of Maurice Fréchet », *Archive for History of Exact Sc.*, Part I, t. 27, 1982, p. 233-295 ; Part II, t. 34, n° 4, 1985, p. 279-380 ; Part III, t. 37, n° 1, 1987, p. 25-76.

Jean DHOMBRES

→ Bourbaki ; Catégories et foncteurs ; Fourier ; Topologie.

ANALYSE HARMONIQUE

MATHÉMATIQUES

Issue de la physique mathématique, qui reste un de ses champs privilégiés d'application, la théorie appelée « analyse harmonique » appartient maintenant aux mathématiques pures. Depuis ses débuts, c'est-à-dire les travaux de Fourier (1807), elle a constitué, pour la quasi-totalité des branches des mathématiques, une discipline-carrefour en même temps qu'un ferment de développement extraordinairement actifs.

Premiers développements. Séries de Fourier

La théorie prend naissance au XVIII^e s., à l'occasion de problèmes relatifs aux séries trigonométriques, eux-mêmes à l'origine du mouvement qui a porté vers le concept de fonction et la théorie des ensembles. La notion de développement en série trigonométrique d'une fonction donnée apparaît à peu près simultanément dans le domaine réel, pour résoudre le problème dit « des cordes vibrantes » (Daniel Bernoulli, 1753) et dans le domaine complexe, avec les séries entières. Pour une fonction f , le développement prend la forme : $f(x) \approx \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cos nx - b_n \sin nx)$ (en termes exponentiels $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{inx}$, l'usage du signe \approx renvoyant à la possibilité de non-convergence). Si f

désigne la fonction intervenant dans la solution de l'équation aux dérivées partielles dite « de la corde vibrante », le terme du développement qui correspond à $n = 1$ donne la vibration fondamentale de la corde, les termes suivants correspondant aux harmoniques de l'expérience acoustique courante : d'où le nom, utilisé d'abord, d'après N. Wiener (1930), pour la recherche physique des périodicités cachées (Schuster, ~ 1900). Les coefficients a_n et b_n s'expriment par les formules :

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx \, dx, \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx \, dx \text{ (resp.}$$

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) e^{-inx} \, dx), \text{ qu'on trouve déjà chez Clairaut}$$

et Euler, mais auxquelles on a donné à juste titre le nom de Fourier, car c'est ce dernier qui, dans son grand travail sur la diffusion de la chaleur, a le premier explicitement soulevé le problème de la représentation d'une fonction en général par une série de ce type. Or ce problème se réduit à celui de la convergence de sa série de Fourier, et ce dernier, posé pour des fonctions plus générales que les fonctions continues, c'est-à-dire pour des fonctions quelconques, va constituer le thème principal des recherches qui vont suivre. Fourier lui-même ne se préoccupe guère plus que ses prédécesseurs du XVIII^e s. de ces questions de convergence de série ou de définition d'intégrale. Le premier travail établissant rigoureusement la convergence d'une série de Fourier, pour une fonction continue et monotone par morceaux, est un grand mémoire de 1829 de Lejeune-Dirichlet, qui marque la naissance de l'analyse harmonique au sens moderne. Dirichlet y donne une définition tout à fait générale de la fonction comme pure correspondance, et démontre, par une analyse originale inspiratrice de l'usage ultérieur des convolutions, que, si une fonction f vérifie les deux conditions évoquées entre 0

et h , l'intégrale $\int_0^h f(x) \frac{\sin nx}{\sin x} \, dx$ tend vers $\frac{\pi}{2} f(0)$ lorsque

n tend vers l'infini — évoquant, à la fin de son mémoire, le cas où la fonction aurait un nombre infini de points de discontinuité. La préoccupation de la généralité est d'autant plus forte qu'en 1872 Weierstrass donne l'exemple de la fonction d'expression $\sum_{n=1}^{\infty} a^n \cos b^n x$, qui, pour un choix convenable de a

et b , n'est dérivable en aucun point, et est néanmoins représentable par une série de Fourier : d'où il résulte que le champ de ce dernier type de fonctions est beaucoup plus étendu que celui d'abord considéré par Dirichlet. P. du Bois-Reymond clôt cependant la question par la négative en 1873, en donnant le contre-exemple d'une fonction très « oscillante » au voisinage de 0, et dont la série de Fourier diverge en 0 ce point. À partir de cet exemple, on construit assez facilement une fonction continue dont la série de Fourier diverge en tous les points d'un ensemble dénombrable dense. Une autre question se pose alors : en quel sens peut-on dire que la série de Fourier d'une fonction continue converge en général ? Si elle n'est pas partout divergente, quelle est la mesure de l'ensemble des points où

elle ne l'est pas ? Ce dernier type de problèmes montre clairement les liens entre l'analyse harmonique et la théorie de la mesure et de l'intégration, au sens que lui avait donné, au début de ce siècle, H. Lebesgue. C'était aux yeux de ce dernier une application importante de la théorie que de fournir le moyen de montrer qu'indépendamment de toute notion de convergence la série de Fourier d'une fonction caractérise celle-ci, du moins en tant que fonction mesurable au sens de Lebesgue, ou L-mesurable (1905) : deux fonctions sont considérées comme équivalentes si l'ensemble des points où elles diffèrent est de mesure nulle (négligeable), c'est-à-dire, comme on accoutumera de le dire avec et après lui, si elles sont égales presque partout. Il a fallu attendre 1966 pour que le mathématicien suédois L. Carleson résolve la question posée plus haut en montrant que la série de Fourier d'une fonction continue (en fait toute fonction de carré, et même de puissance p -ème L-intégrable) converge presque partout vers cette fonction ; on établit à la même date que, inversement, pour tout ensemble de mesure nulle, il existe une fonction continue dont la série de Fourier diverge dans cet ensemble, d'où l'impossibilité d'améliorer le résultat précédent.

Cette relation de l'analyse harmonique avec la théorie de l'intégration est un trait d'essence qui marque tout son développement. Déjà Dirichlet note que la définition des coefficients de Fourier d'une fonction par les formules revient à savoir définir l'intégrale de cette même fonction. En fait, comme l'a fait remarquer Jean Dieudonné, la plupart des extensions successives du concept d'intégrale intervenues depuis le milieu du XIX^e s. ont eu comme pierre de touche leur application au problème de la représentation de Fourier. C'est déjà le cas, avant Lebesgue, de la première de ces extensions, par Riemann, qui la présente comme un simple préliminaire technique, en introduction à son mémoire sur la représentation d'une fonction par une série trigonométrique (1853). Après Lebesgue, ce sera encore le cas de l'intégrale de Denjoy, comme des distributions de Laurent Schwartz. Quant à l'intégrale de Stieltjes, elle est à l'origine de la définition par Lusin, en 1915, des coefficients de Fourier-Stieltjes d'une fonction F , supposée « à variation bornée » dans l'intervalle $[0, 2\pi]$, par l'expression $\int_0^{2\pi} e^{-inx} dF(x)$, et la transformation du même nom devient, entre les mains de Paul Lévy, un des outils fondamentaux du calcul des probabilités.

Maturité de la théorie. Transformation de Fourier

Ce concept de transformation déjà implicite dans l'usage de l'intégrale de Fourier est maintenant au centre de la théorie. Il est assez naturel de comprendre la relation entre une fonction réelle f et l'expression dite intégrale de Fourier $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-ixy} \, dx$ comme une transformation de nature fonctionnelle. et c'est bien en ce sens que Fourier l'utilise pour intégrer des équations aux dérivées partielles. Aussi parle-t-on de transformation de Fourier, et plus généralement de

Fourier-Laplace, ce dernier utilisant dans le même sens, à la même époque, la transformation de la fonction f d'une variable complexe s en l'intégrale $\int_0^{+\infty} f(x) e^{-sx} \, dx$. Mais, comme il est courant en histoire des sciences, particulièrement mathématiques, la conscience explicite du fait que les formules de Fourier définissent une telle transformation est beaucoup plus tardive, exigeant la maturité de conceptions fonctionnelles abstraites qui ne pouvaient se faire jour avant les années 1900.

Si l'on suppose seulement la fonction f continue, on ne peut plus affirmer que sa série de Fourier converge vers f , mais Fejer montre (1900) qu'on peut substituer alors aux sommes partielles classiques de la série de f les moyennes dites de Césaro, $\sigma_n(x) = \frac{S_1(x) + S_2(x) + \dots + S_n(x)}{n}$ qui tendent uniformément

vers f . C'était là seulement le premier pas d'une suite de recherches sur les procédés de sommation, cas particuliers de ces méthodes d'approximation dont la mise au point a joué un rôle considérable dans le développement de l'analyse au XX^e s. Celui de l'analyse fonctionnelle, notamment, montrait qu'on ne pouvait plus se restreindre pour les fonctions à des méthodes d'approximation ponctuelles. Le seul usage des ensembles de mesure nulle conduisait en effet à un élargissement du concept classique. Il n'était plus question de définir la fonction par ses valeurs en chaque point, puisque, dès lors que l'on sort du champ strict des fonctions continues, la même suite de coefficients de Fourier correspond à la classe de toutes les fonctions égales presque partout à f , sans qu'il y ait de raison de choisir entre elles une fonction privilégiée. Le premier de ces nouveaux théorèmes d'approximation est, en 1907, celui dit de Fisher-Riesz, qui aboutit à mettre en correspondance bijective canonique les espaces fonctionnels hilbertiens (ou normés complets) l^2 (espace des suites de réels (x_n) convergentes au carré, $\sum_{n=1}^{\infty} x_n^2 < \infty$) et $L^2(0, 2\pi)$ (espace des fonctions de carré L-intégrable sur l'intervalle $(0, 2\pi)$) par un concept généralisé de série de Fourier. La relation établie en 1799 par Parseval : $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |c_n|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |f(x)|^2 \, dx$, a lieu pour toute fonction f de $L^2(0, 2\pi)$, donc de $L^1(0, 2\pi)$, et, inversement, pour toute suite (c_n) telle que $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |c_n|^2 < +\infty$, la série $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{inx}$ est convergente,

mais seulement au sens de L^2 , vers une fonction qui a les c_n pour coefficients de Fourier. En 1910, Plancherel obtient l'analogue du théorème pour l'intégrale de Fourier. On s'aperçoit bientôt qu'on peut avantageusement appliquer la transformation de Fourier à une fonctionnelle (forme) aussi bien qu'à une fonction. En 1940, A. Weil introduit l'idée de considérer la transformée de Fourier d'une mesure réelle bornée μ comme la mesure $\tilde{F}\mu$, ayant pour « densité », par rapport à la mesure de Lebesgue, la fonction $F, F(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iyx} d\mu(x)$. Dès lors, on a $\langle \tilde{F}\mu, \varphi \rangle =$

$\int \varphi(x) e^{-ix} d\mu(x) = \langle \mu, \tilde{F}\varphi \rangle$, et $\tilde{F}\mu$ apparaît comme la transposée de la transformation de Fourier de φ à $\tilde{F}\varphi$, restreinte à l'espace $K(\mathbb{R})$ des fonctions continues « à support compact ». Ce point de vue est au fondement de la définition de la transformation de Fourier des distributions par L. Schwartz. En fait, dès qu'on connaît suffisamment l'image par \tilde{F} d'un espace F de fonctions, on peut définir la transformée de Fourier d'une forme linéaire continue T sur $\tilde{F}F$ par la relation de transposition : $\langle \tilde{F}T, \varphi \rangle = \langle T, \tilde{F}\varphi \rangle$ pour toute fonction φ (avec les topologies qui s'imposent sur les espaces F et $\tilde{F}F$). Dans les situations les plus favorables, on dispose de théorèmes décrivant explicitement l'espace des transformées de Fourier des fonctions, mesures, ou distributions, d'un espace donné, et on peut obtenir des formules d'inversion décrivant la bijection réciproque de \tilde{F} sur F (théorèmes de Paley-Wiener, 1939 ; de Herglotz-Bochner, 1911-1932). Ici, comme dans le vaste champ des applications, notamment à l'étude des équations fonctionnelles linéaires, l'introduction des distributions permet de conférer au traitement des transformations de Fourier et de Laplace la puissance de l'algèbre, tout en légitimant l'efficacité quelque peu mystérieuse qu'y avaient déployée, en leur temps, les méthodes du « calcul opérationnel » de Heaviside.

D'autre part, une des propriétés de base des formules de Fourier est l'orthogonalité : $\int_0^{2\pi} f_m(x) \overline{f_n(x)} dx = 0$ pour $m - n \neq 0$ vérifiée pour les fonctions $f_m, f_n(x) = e^{inx}$ dans $[0, 2\pi]$, et déjà rencontrée auparavant à propos de problèmes de physique. Le XIX^e s. poursuit l'étude des développements en série de fonctions orthogonales pour certaines fonctions-poids w , c'est-à-dire telles que, si $m - n \neq 0$: $\int_0^{2\pi} f_m(x) \overline{f_n(x)} w(x) dx = 0$. Menées d'abord en relation avec les équations différentielles linéaires du second ordre, ou pour des systèmes particuliers de polynômes (de Legendre, Jacobi, Laguerre, Hermite, etc.), enfin généralisées aux fonctions de plusieurs variables, ces recherches conduisent à la « théorie spectrale des opérateurs » de Hilbert et von Neumann.

Derniers développements. Algèbre topologique

À partir de 1925, la théorie tend à s'algébriser, autour de concepts comme ceux de convolution (de deux fonctions ou distributions) et de caractère (d'un groupe). L'analogie avec la théorie des groupes finis joue ici un grand rôle, et l'événement décisif doit être situé dans les travaux de I. Schur et H. Weyl sur la théorie algébrique des représentations linéaires des groupes finis, dont les fondements avaient été posés par Frobenius à partir de 1896. Sans doute les deux notions avaient-elles déjà été utilisées : la première, par exemple par Poisson, par Dirichlet dans le mémoire cité au début, par Weierstrass pour son théorème d'approximation, ou dans la mise au point des procédés de sommation des séries divergentes ; la seconde dans la théorie des groupes commutatifs. Mais l'idée fondamentale de Schur (1924), reprise par Weyl dans

son étude « globale » des groupes de Lie compacts (semi-simples, 1925-1926), est plus profonde : elle consiste à introduire une méthode de l'analyse, l'intégration par rapport à une mesure invariante (cette dernière déjà chez Hurwitz, 1897, explicitée par Haar en 1933), avec la topologie qui lui est liée, dans la structure algébrique de groupe. C'est dans un tel cadre que Weyl détermine les caractères de ses groupes, et un peu plus tard, introduit systématiquement la convolution de deux fonctions continues, généralisation directe de la multiplication dans l'algèbre d'un groupe fini. Un de ses outils est d'ailleurs la théorie des opérateurs « compacts » de Fredholm-Riesz, qui elle-même relie l'analyse harmonique à la théorie spectrale. L'importance de la mesure invariante apparaît en pleine lumière lorsque Pontrjagin réalise qu'elle lui permet d'étendre ses résultats de dualité (d'un groupe à celui de ses caractères, 1931) à tous les groupes abéliens (commutatifs) localement compacts (soit LCA, chez lui, métrisables, connexes). Les travaux qui suivent sur la structure de ces groupes (notamment A. Weil, 1940) y rendent possible le transfert complet de la théorie de Fourier, unifiant les théories classiques de la série et de l'intégrale de Fourier, et de leurs généralisations à plusieurs dimensions. La même théorie fournit le cadre le plus adéquat à l'étude des fonctions presque périodiques qu'avait étudiées Harald Bohr à partir de 1923. Ce type de généralisation unificatrice, si caractéristique du style de la mathématique contemporaine, ne procure pas seulement les moyens d'un traitement formel. Les applications suivent, parfois inattendues, comme en théorie algébrique des nombres (où adèles et idéles forment des groupes LCA), et dans la grande théorie « du corps de classes », aux résultats de laquelle la théorie ainsi transférée semble constituer la voie d'accès la plus directe. Exemple du même ordre, la théorie des algèbres normées d'I. Gelfand englobe l'analyse harmonique sur les groupes LCA et la théorie spectrale, et n'est pas seulement le lieu le plus efficace du traitement des problèmes relevant de la « synthèse harmonique », mais donne naissance à une discipline à l'heure actuelle en plein développement : l'analyse harmonique non-commutative, étude des représentations linéaires des groupes localement compacts non abéliens, notamment des groupes de Lie, dans des espaces de Banach de dimension infinie. Autant d'exemples qui font de l'analyse harmonique une figure exemplaire du travail mathématique contemporain.

► BURKHARDT H.L. « Trigonometrische Reihen und Integrale », *Enzykl. der Math. Wiss.*, II A 12, Leipzig, Teubner, 1904-1916. — DIEUDONNÉ J., *Histoire de l'analyse harmonique*, Moscou, Nauka, 1971. — FOURIER J., « Mémoire sur la théorie de la chaleur », *Bull. des Sc. pour la Sté Philomath.*, 1, 1807 ; *Théorie analytique de la chaleur*, Paris, Firmin-Didot, 1822 (rééd., Paris, J. Gabay, 1988). — LEBESGUE H., « Sur les séries trigonométriques », *Ann. Ec. Norm. Sup.* (3) 20, 1963. — LEJEUNE-DIRICHLET P.-G., « Sur la convergence des séries trigonométriques qui servent à représenter une fonction arbitraire entre des limites données », *Journ. für die reine und angew.*

Math., 4, 1829. — SCHWARTZ L., *Théorie des distributions*, Paris, Hermann, 1978. — WEIL A., *L'intégration dans les groupes topologiques et ses applications*, Paris, Hermann, 1940.

Alain MICHEL

→ Fourier ; Topologie.

ANALYSE NON STANDARD

Présentation de la mathématique non standard

Pour parler de l'analyse non standard, il convient d'abord de la situer dans l'histoire du calcul infinitésimal. Les premiers auteurs et ceux du XVIII^e s., sans se préoccuper outre mesure de rigueur, l'ont fondé tour à tour sur trois notions : les infiniment petits, les limites, les développements en série entière (sans vérification de convergence). À partir de Cauchy, le point de vue des limites l'emporte, ayant permis les premières démonstrations rigoureuses. Les infiniment petits restent très présents, et même plus qu'avant lui, définis désormais comme « quantités variables ayant zéro pour limite ». Les exposés de Cauchy étaient loin d'une parfaite rigueur, surtout dans les questions où entre en jeu un problème d'uniformité. Weierstrass, ses élèves et quelques autres parachèvent l'édifice dans le cadre du programme d'arithmétisation de l'analyse : celle-ci devient une construction logique à partir des entiers naturels. Le statut des infinitésimaux est très peu changé par ce développement ; on considère leur emploi comme justifié par les fondements qui ont été solidement établis et on ne s'en prive pas, particulièrement en géométrie différentielle. Landau proposera pour cet emploi un formalisme qui sera très vite adopté. Telle était la situation, en particulier dans l'enseignement, quand parurent les premiers articles d'Abraham Robinson sur l'analyse non standard (1961), puis son livre *Non-standard Analysis* en 1966.

Le formalisme de Landau, malgré les services qu'il continue à rendre, souffre de défauts. Considérons la relation $y(x) = o(x)$. Elle exprime que le rapport y/x tend vers zéro quand x (supposé ne pas s'annuler) tend vers sa limite. Le formalisme ne précise pas cette limite, c'est le contexte qui s'en charge pour qui possède un minimum de compétence mathématique. La situation devient plus grave si y dépend, en plus de x , d'un paramètre. Rien ne marque alors si la convergence est uniforme ou pas. Mais surtout, dans ce système, avec ou sans formalisme de Landau, les infinitésimaux ne sont pas des objets à part entière des mathématiques, plutôt des propriétés des fonctions, d'ailleurs curieusement exprimées. C'est à cela que l'analyse non standard porte remède. Ce remède est pour Robinson l'extension des ensembles par la technique des ultra-produits.

Essayons de voir, au moins vaguement, de quoi il s'agit sur un exemple simple. Cherchons à introduire des infinitésimaux dans l'ensemble \mathbb{R} des nombres

réels. Pour les infiniment petits par exemple, il nous faut des « quantités variables » qui tendent vers zéro. Il n'est pas dit en fonction de quoi elles doivent varier, prenons ce que nous avons de plus simple : les nombres naturels. En d'autres termes, considérons l'ensemble, noté $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$, des suites de nombres réels. Seul leur comportement à la limite nous intéresse, nous considérerons donc comme équivalentes deux suites qui ne diffèrent que sur un ensemble fini. Ou, pour le redire en termes plus techniques, nous passons au quotient par cette relation d'équivalence, obtenant un nouvel ensemble ${}^*\mathbb{R}$. Les nombres réels en sont naturellement les éléments correspondant aux suites constantes. Beaucoup de propriétés de \mathbb{R} se transmettent à ${}^*\mathbb{R}$, mais deux manquent à l'appel : les éléments non nuls n'ont pas tous un inverse et l'ordre n'est plus total. Tenant à ces propriétés, nous allons les conserver en faisant appel à une relation d'équivalence beaucoup plus sophistiquée. L'ensemble des complémentaires de sous-ensembles finis de l'ensemble \mathbb{N} des nombres naturels s'appelle le filtre de Fréchet. Un filtre sur un ensemble est en effet un ensemble de sous-ensembles qui possède trois propriétés : premièrement, l'ensemble vide n'en fait pas partie ; deuxièmement, tout ensemble qui contient un ensemble du filtre est lui aussi dans le filtre ; troisièmement, toute intersection finie d'ensembles du filtre est dans le filtre. Parmi ces filtres, il faut distinguer les ultrafiltres qu'on peut caractériser de la façon suivante : si un ensemble n'appartient pas au filtre, son complémentaire lui appartient. On démontre que tout filtre, en particulier donc le filtre de Fréchet, est contenu dans un ultrafiltre. Il est important de noter que cette démonstration utilise l'axiome du choix. On suppose alors donné un ultrafiltre F contenant le filtre de Fréchet, et la relation cherchée est que deux suites sont équivalentes si elles coïncident sur un ensemble d'entiers appartenant à F . L'ensemble ${}^*\mathbb{R}$ obtenu par passage au quotient est une extension de \mathbb{R} par ultra-produit. Il possède toutes les propriétés de \mathbb{R} , c'est un cas particulier du principe de transfert. Les infiniment petits et les infiniment grands sont les images dans ${}^*\mathbb{R}$ des suites tendant vers zéro et l'infini respectivement. Les seconds sont aussi ceux qui majorent tous les éléments de \mathbb{R} .

Robinson généralise cette construction à tout ensemble si complexe soit-il. Comme dans toute question de mathématique qu'on traite effectivement, sauf en logique, on peut toujours construire un ensemble où tout se passe, les méthodes de l'analyse non standard peuvent s'employer dans toutes les mathématiques. Il est donc plus exact de parler de mathématique non standard ; c'est ce que nous ferons désormais et nous appellerons conventionnelle la mathématique qui se passe de ces méthodes.

Dans un article de 1977, Nelson a proposé une nouvelle approche de la mathématique non standard, la théorie interne des ensembles ou en abrégé IST (*Internal Set Theory*), qui est vite devenue la plus usuelle. Elle consiste à enrichir l'axiomatique

habituelle. Là où Robinson agrandissait l'ensemble \mathbb{R} par exemple pour y ajouter les infinitésimaux, Nelson pose en axiome qu'ils s'y trouvaient déjà. Il conserve les axiomes de Zermelo-Fraenkel et l'axiome du choix. Il y ajoute le prédicat « standard » qui s'applique à un ensemble (il faut rappeler ici que dans la théorie de Zermelo-Fraenkel tous les objets mathématiques sont des ensembles). Une formule est appelée « externe » si elle contient ce prédicat, « interne » sinon. Trois schémas d'axiomes sont posés : l'idéalisation, la standardisation et le transfert (par une heureuse coïncidence, on retrouve les initiales IST).

Idéalisation : si $A(x,y)$ est une formule interne ne contenant pas d'autre variable libre, les deux affirmations suivantes sont équivalentes :

(a) pour tout ensemble fini standard F , il existe x tel que $A(x,y)$ est vérifiée pour tout y de F ;

(b) il existe x tel que $A(x,y)$ est vérifiée pour tout y standard.

Conséquence immédiate : il existe un entier qui majore tous les entiers standard.)

Standardisation : si $B(x)$ est une formule quelconque et E un ensemble standard, il existe un sous-ensemble standard de E dont les éléments standard sont ceux qui vérifient B .

Transfert : si $C(x)$ est une formule interne sans autre variable libre que x et où toutes les constantes sont standard, vérifiée pour tout x standard, alors elle est vérifiée pour tout x .

En stricte logique, ces axiomes devraient naturellement être formulés dans le symbolisme adéquat. La mathématique qu'on peut déduire de ces axiomes est à très peu de chose près la mathématique non standard de Robinson. Tous les théorèmes de la mathématique conventionnelle se retrouvent sous deux formes : la forme habituelle plus une autre où toutes les variables et les constantes sont standard. De nouveaux théorèmes apparaissent, correspondant à des formules externes. Un énoncé particulièrement frappant se déduit simplement des axiomes : il existe un ensemble fini auquel appartiennent tous les objets standard. D'un autre côté, tous les théorèmes internes de IST sont aussi des théorèmes de la théorie de Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix. La démonstration repose essentiellement sur un perfectionnement de la méthode des ultra-produits. De plus, un algorithme permet de faire correspondre à chaque formule externe une formule interne vérifiée par les mêmes objets standard. La principale difficulté dans l'usage d'IST vient, en plus du fait que la plupart des mathématiciens ne s'y trouvent pas en terrain familier, de l'usage des formules externes. Il y a à ce sujet une divergence de langage parmi les adeptes de la mathématique non standard. On peut adopter la position prudente de Nelson en disant qu'elles ne permettent pas de définir des ensembles (sous peine de tomber dans des paradoxes). Beaucoup préfèrent parler d'ensembles externes pour éviter de lourdes périphrases, mais cela oblige à une vigilance gênante.

La réception de la mathématique non standard : une controverse fantôme

Les travaux de Robinson furent accueillis avec enthousiasme par un petit groupe de mathématiciens et une indifférence souvent hautaine par la majorité de la profession, particulièrement ses chefs de file, sans doute parce qu'on ne voyait pas quel problème la mathématique non standard pouvait aider à résoudre. De plus, le livre de Robinson commence par quarante pages de logique, domaine que les mathématiciens trouvent en général rébarbatif : la conviction, d'ailleurs justifiée, que leurs raisonnements sont en accord avec ses règles leur suffit. En revanche, les années qui ont suivi la parution de l'article de Nelson ont connu à la fois une petite mode de l'analyse non standard et une polémique à son sujet. Cet épisode ne peut se comprendre qu'à la lumière des profonds changements qu'a connus la situation des mathématiques dans les années 1970. Après le perfectionnement d'outils très généraux, l'attention se tournait vers des problèmes plus particuliers. Le prestige passait des mathématiques pures aux mathématiques appliquées. Alors qu'en 1960 les institutions s'arrachaient les mathématiciens disponibles, vers 1980 la compétition pour les emplois devenait acharnée. Le volume des publications et la spécialisation avaient fait des progrès foudroyants. Des jeunes chercheurs passés par un enseignement mathématique formalisé à outrance où les infinitésimaux n'étaient plus présents travaillaient maintenant en mathématique non standard. Ceci explique le succès de l'argument selon lequel l'analyse non standard serait beaucoup plus intuitive que l'analyse conventionnelle : ces jeunes mathématiciens ont découvert inséparablement IST et une conception plus intuitive des mathématiques.

La polémique autour du non-standard a pris d'ailleurs une forme assez particulière : si les publications consacrées à sa défense et illustration sont assez nombreuses, on cherche en vain les écrits de ses détracteurs. Dans un premier temps, c'était naturel. Nul ne mettait en doute la validité des raisonnements de Robinson (et plus tard ceux de Nelson). C'était leur intérêt qu'il s'agissait de prouver et pour cela le plus urgent était de démontrer des théorèmes significatifs pour des mathématiciens conventionnels. Des résultats dans ce sens sont venus progressivement, en particulier avec le développement en France d'une école spécialisée dans l'étude des systèmes différentiels dépendant de paramètres infiniment petits. La question reste entière et indécidable de savoir si avec des efforts comparables ils auraient été obtenus par des méthodes conventionnelles. Ils montrent au moins que les méthodes non standard permettent de faire des mathématiques aussi intéressantes que les autres. Cependant, dans un deuxième temps il fallait bien que des mathématiciens conventionnels émettent une appréciation sinon sur la mathématique non standard, du moins sur ses adeptes, quand, dans l'ambiance qui a

été rappelée plus haut, il a fallu décider de thèses et de recrutements. Il existe probablement des rapports confidentiels où on trouve des prises de position contre la mathématique non standard. La question de la validité des démonstrations n'est plus très claire dans ce contexte. On sait bien que tout texte mathématique effectivement rédigé comporte des raccourcis que l'homme de l'art est capable de compléter rapidement s'il en éprouve le besoin. Mais si cet homme de l'art est un mathématicien conventionnel qui connaît les éléments de la mathématique non standard sans être familiarisé avec eux, il pourra considérer comme des erreurs sérieuses ce qui, *mutatis mutandis*, lui paraîtrait correct dans un texte standard. Il le fera d'autant plus qu'une bonne partie des résultats est exprimée sous forme externe et qu'aux concepts de base de la mathématique non standard se sont ajoutées de nombreuses définitions nouvelles (il existe au moins deux théories non standard de l'intégration).

L'argument du caractère plus intuitif de l'analyse non standard est présenté comme si être intuitive était un caractère objectif d'une théorie. Il n'en est rien, certains trouvent intuitif ce que d'autres ne considèrent nullement comme tel. Prenons comme exemple la section de l'article de Nelson sur l'analyse élémentaire et son enseignement. Il y affirme que sa méthode permet de réconcilier complètement rigueur et intuition, et il a sans nul doute raison s'il s'agit de son intuition. Mais quand il utilise un théorème mentionné dans la première partie du présent article pour disposer d'un ensemble fini qui contient tous les nombres réels standard d'un intervalle, on peut penser que ce n'est pas intuitif pour tout le monde.

L'espoir, exprimé par Robinson, que « certaines branches de la physique théorique, en particulier celles qui sont affligées de divergences, pourraient être traitées avec profit par l'analyse non standard » n'a guère été rempli jusqu'ici et l'affirmation postérieure que l'analyse non standard est le langage adéquat pour la physique reste une pétition de principe. Les questions où elle paraît le plus apte à fournir la possibilité de progrès substantiels sont celles où, typiquement, on aurait envie de disposer d'une loi de probabilité équirépartie sur les réels. C'est impossible, mais on peut considérer une probabilité équirépartie sur l'intervalle $[-A, A]$ où A est infiniment grand, ou sur l'ensemble des points kh où h est infiniment petit et k prend les valeurs entières de $-N$ à N où hN est infiniment grand.

À la fin de son livre Robinson remarque que l'historiographie des mathématiques s'est surtout attachée à l'étude de l'apparition des idées qui se sont pleinement développées dans la conception dominante des mathématiques (on peut supposer qu'il visait les notices historiques de Bourbaki). Il invite à relire l'histoire des mathématiques dans l'optique du non-standard, conseil qui a été suivi. Constatons que si le point de vue est différent, la philosophie sous-jacente de l'histoire reste tout aussi finaliste.

► NELSON E., « Internal set theory », *Bull. Amer. Math. Soc.* 83, 1977. — ROBINSON A., *Non Standard Analysis*, Amsterdam, North Holland, 1966.

Martin ZERNER

→ Ensemble ; Formalisme ; Langages formels.

ANATOMIE COMPARÉE

Dissection, description, analyse et interprétation de la structure intérieure du corps animal et/ou de ses parties, considérées en raison des degrés de similitude qu'elles offrent dans leurs variations à travers l'ensemble des groupes zoologiques connus ou de l'une de leurs subdivisions. (N.B. : il existe une anatomie comparée des végétaux, mais elle n'a pas tenu en botanique une place équivalente à celle que l'anatomie comparée des animaux a occupée en zoologie.)

Si on admet que l'existence d'une science dépend de la formulation claire de ses principes directeurs, force est de reconnaître que, pour l'anatomie comparée, le premier d'entre eux à avoir été énoncé est celui de la corrélation fonctionnelle des organes, défini par Cuvier en 1800 de la manière suivante : « C'est dans cette dépendance mutuelle des fonctions, et ce secours qu'elles se prêtent réciproquement, que sont fondées les lois qui déterminent les rapports de leurs organes, et qui sont d'une nécessité égale à celle des lois métaphysiques ou mathématiques : car il est évident que l'harmonie convenable entre les organes qui agissent les uns sur les autres, est une condition nécessaire de l'existence de l'être auquel ils appartiennent, et que, si une de ses fonctions était modifiée d'une manière incompatible avec les modifications des autres, cet être ne pourrait pas exister » (*Leçons d'Anatomie comparée*, t. 1, an VIII, p. 47). Il semble que le jeune Cuvier ait pris conscience de ce principe beaucoup plus tôt, à l'occasion de la dissection d'un grimpeur qu'il raconte à son ami Pfaff (lettre du 17 novembre 1788), en reconnaissant que les pattes, la queue, le bec, la langue, l'estomac de cet oiseau se répondaient et dépendaient de son mode de nourriture. Sans doute, on a souvent considéré le traité aristotélicien *Les parties des animaux* comme le premier ouvrage d'anatomie comparée (Cole, *A history of comparative anatomy*, 1949, p. 24-42), mais un traité ne suffit peut-être pas à constituer une science. D'Aristote à Vicq d'Azyr, il existe une littérature consacrée à la comparaison anatomique, mais l'absence d'une anatomie comparée est regrettée tant par Réaumur, qui voulait déterminer la nature de l'animal dont les dents étaient devenues des turquoises (*Hist. Ac. Sc.*, 1715, p. 181-184), que par Sloane, à propos de dents et d'ossements d'éléphants fossiles (*Mém.*, Ac. Sc., 1727, p. 305-344), ou Guettard, pour la même raison (*Mémoires sur les différentes parties des sciences et des arts*, 1768, p. 15). Dans ces trois cas, il aurait fallu pouvoir identifier des ossements fossiles, besoin auquel répond ce même principe, sous le nom de « corrélation des formes », grâce

auquel « chaque sorte d'être pourrait à la rigueur être reconnue par chaque fragment de chacune de ses parties » (Cuvier, *Recherches sur les ossements fossiles de quadrupèdes*, discours préliminaire [1812], 1992, p. 97).

Dans la première leçon d'anatomie comparée de 1800, Cuvier introduit un second principe sous la forme de cette observation, que « sans sortir jamais du petit nombre des combinaisons possibles entre les modifications essentielles des organes importants, [la nature] semble s'être jouée à l'infini dans toutes les parties accessoires » (*Leçons*, o.c., t. 1, p. 58). Les organes apparaissent ici comme les supports de l'équivalence entre constance et importance dans les « rapports naturels » qu'il a placés à la base de la « méthode naturelle » de classification, tels que « les rapports les plus constants sont... en même temps les rapports les plus importants, les rapports supérieurs ; et ceux qui sont les plus variables sont les rapports subordonnés » (*Tableau élémentaire de l'histoire naturelle des animaux*, an VI, p. 17). Il est vrai pourtant que « la formation des méthodes est l'objet de l'histoire naturelle proprement dite ; l'anatomie les reçoit, pour ainsi dire, toutes faites » (*Leçons*, o.c., t. 1, p. 64), mais ce lien entre les rapports et les organes montre une articulation intime entre l'histoire naturelle et cette anatomie comparée qu'il n'est plus possible d'ignorer. Ce principe est celui de la « subordination des caractères » (*Règne animal*, 1817, t. 1, p. 10). Au même titre que celui de la corrélation des formes, il se rattache au principe des conditions d'existence « vulgairement nommé des causes finales », lequel est considéré comme le principe rationnel particulier à l'histoire naturelle : « [...] rien ne peut exister s'il ne réunit les conditions qui rendent son existence possible » (*ibid.*, p. 6). Cette notion de cause finale se rattache ici à la perspective fonctionnelle dans laquelle l'analyse anatomique était comprise depuis Aristote et Galien, beaucoup plus qu'à une théologie naturelle.

En 1841, Duvernoy, élève, parent et ami de Cuvier (*Leçons*, o.c., t. 3, 1805, lettre à Lacépède, p. X), voit dans le principe des conditions d'existence le point culminant d'une anatomie qui devient « philosophique ou transcendante et spéculative » (art. « Anatomie », in Ch. d'Orbigny, *Dictionnaire universel d'histoire naturelle*, t. 1, 1841, p. 445). Mais il y ajoute une loi du balancement des organes, c'est-à-dire « de l'accroissement, du développement inverse de certaines parties corrélatives dans un seul et même organisme », qui permet de s'affranchir du point de vue fonctionnel en s'appuyant sur un autre principe, celui des connexions, et sa condition spéculative, à savoir « une unité idéale de formation ou même de composition » vis-à-vis de laquelle, comme Cuvier auparavant, il émet les plus pressées réserves (*ibid.*, p. 446-447). Il s'agit du principe central de la « théorie des analogues » (É. Geoffroy Saint-Hilaire, *Philosophie anatomique*, t. 1, 1817, discours préliminaire, p. XXXII), qui veut que tous les animaux vertébrés répondent à un même modèle ou type, généralisable à tout le règne animal, compris

comme l'ensemble des variations d'un seul et même animal fondamental.

L'idée d'un modèle originaire pour tout le règne animal, sinon pour toutes les créatures, s'enracine dans les très vieux mythes que sont l'échelle des êtres et l'analogie du microcosme et du macrocosme dont l'expression a été renouvelée en fin du XVIII^e s. dans la littérature philosophique : Hauptform (Herder, 1784), Urbild (Kant, 1790), et en histoire naturelle où l'existence d'un « fond commun de structure et de composition » dont procéderaient toutes les formes d'organisation vivante est envisagée par Vicq d'Azyr (*Discours sur l'anatomie comparée*, 1786, p. 29-36). Dans ce climat porteur, un rôle capital a été dévolu à Goethe, rendu perplexé en 1780 par l'absence apparente chez l'homme adulte d'un os intermaxillaire commun à tous les vertébrés, y compris les primates, et qu'il découvre en 1784 sur l'embryon humain (voir H. Braüning-Oktavio, *Vom Zwischenkieferknochen zur Idee des Typus*, 1956). Cette découverte prendra tout son sens deux ans plus tard avec la rencontre de l'idée d'un modèle primitif et général de tous les animaux, formulée par Vicq d'Azyr, ce qu'il traduit au moyen de l'expression « allgemein Typus » (1790, *Versuch über die Gestalt der Thiere*, manuscrit). Grâce à cette expression, la comparaison de l'organisme avec lui-même, avec les divers stades de son développement, et celle des organismes entre eux peut être prise en compte dans le cadre d'une morphologie généralisée qui se confond largement avec la partie transcendante, abstraite ou générale de l'anatomie comparée, dans laquelle, à l'ombre de Kiemeyer d'abord (*Ueber die Verhältnisse der organischen Kräfte unter einander in der Reihe der verschiedenen Organisationen, die Gesetze und Folgen dieser Verhältnisse*, Rede II, fév. 1783), puis de Cuvier dont ils ont été les élèves, Tiedemann et Meckel réaliseront la jonction de l'embryologie et de l'anatomie comparée dans une loi de formation des organismes qui s'exprime dans le parallélisme de la série animale et des stades du développement embryonnaire en un même ordre ascendant (textes majeurs : Tiedemann, *Anatomie und Bildungsgeschichte des Gehirns im Foetus des Menschen nebst einer vergleichende Darstellung des Hirnbaues in den Thieren*, 1816 ; J.F. Meckel, *System der vergleichende Anatomie*, 1^{er} vol., 1816). Il restera à E.R.A. Serres de placer les monstruosité, déjà comprises par son maître Geoffroy Saint-Hilaire comme des « retardements de développement » (*Philosophie anatomique*, t. 2, 1822, p. 508), dans cette même perspective, pour en faire de la tératologie le pendant, pour ainsi dire, expérimental.

C'est ainsi que, dès son accès au statut de science à part entière, l'anatomie comparée s'est située en position centrale dans l'ensemble des recherches qui portaient sur le vivant au niveau macroscopique (N.B. : c'est vers la fin de la quatrième semaine, lorsqu'il est visible à l'œil nu, que Tiedemann aborde l'analyse de l'embryon humain, o.c., trad., 1823, p. II). Elle garde cette place tout le long du XIX^e s., au carrefour de la systématique, de l'embryologie et de la paléontologie,

malgré les crises et les transformations de la biologie, née avec elle au cours de cette période.

Lorsque Geoffroy Saint-Hilaire a présenté en 1830 devant l'Académie des sciences le mémoire de Launrencet et Meyranx intitulé *De l'organisation extérieure des Céphalopodes comparée avec celle de divers poissons*, malgré quelques réserves, il approuvait implicitement mais clairement l'image qui en résumait l'essentiel : « Figurons-nous un animal vertébré, marchant sur la tête ; ce serait absolument la position d'un de ces bateleurs qui, renversant leurs épaules et leur tête en arrière pour marcher sur leurs mains et leurs pieds » (Rapport du 15 fév. 1830), ce qui faisait de la seiche un poisson replié. Une absurdité aussi insolente a fait sortir Cuvier de sa réserve : il en a résulté une confrontation des deux démarches qui se jugeaient réciproquement incompatibles, celle qui s'appuyait sur le principe des conditions d'existence et celle qui supposait une unité de plan et de composition dans l'ensemble du règne animal. En rendant compte de ces débats qu'il avait suivis, Goethe réuse néanmoins cette incompatibilité en rappelant d'une part la corrélation qu'il avait observée entre membres antérieurs et dentition chez les mammifères, mais aussi, d'autre part, les similitudes dont la fonction ne pouvait rendre compte dans l'aile réduite des autruches et casoars (*Principes de Philosophie zoologique*, 1832, 2^e, Abschnitt), ce que Cuvier avait lui-même remarqué en 1800 (*Leçons*, o.c., t. 1, p. 149). Il lui semblait donc que la raison du conflit était dans l'inadéquation des termes de plan, de composition, d'embranchement, etc., tous à connotation technique et relevant d'une tradition mécaniste étrangère à la véritable nature du vivant. Il leur préfère donc les termes de « type » et de « développement », dont la portée esthétique lui paraît plus proche de la vie. Cette inflexion est au départ d'un second moment dans l'élaboration des concepts fondamentaux de l'anatomie comparée.

La notion de développement qui avait au XVIII^e s. servi pour décrire l'accroissement graduel des corps organisés (Ch. Bonnet, *Considérations sur les corps organisés*, 1762, t. 1, § 7), en s'appliquant à toute la série animale comprise comme un ordre de perfectionnement, se réfère à une sorte de lecture inversée de l'échelle des êtres, qui formait auparavant un ordre des dégradations. L'idée d'une réalisation des perfectionnements dans le temps se traduit chez Lamarck par l'expression « développement progressif » qui, depuis, n'a pas cessé d'encombrer la littérature paléontologique. Mais en même temps, le cadre préformationniste dans lequel le terme avait été utilisé pour traduire le latin *evolutio* a été remplacé par une conception épigénétique proposée par Wolff (*Theoria generationis*, 1759), qui permet de concevoir des remaniements et des innovations au cours des genèses individuelles des mammifères et de l'homme, qui peuvent désormais être traitées comme des clefs pour la compréhension de la diversification et de la hiérarchisation des espèces animales. Or, à la même période, et dans la même perspective, on constate la naissance de l'embryologie

descriptive (Pander, 1817 ; von Baer, 1828), qui analyse la formation du poulet dans l'œuf systématiquement à partir du premier jour et découvre la mise en place des feuillets embryonnaires, puis celle de l'embryologie comparée (von Baer, 1828), qui étend les méthodes de l'embryologie descriptive à des échantillons tirés des autres classes du règne animal accessibles à ce genre d'études, compte tenu des techniques disponibles à l'époque.

La description des stades embryonnaires successifs du poulet a mis en évidence l'autonomie croissante de l'embryon à mesure qu'il passait de l'homogène et du généralisé à l'hétérogène et au spécialisé, à travers les différenciations des ébauches primitives disposées dans un ordre spatialement défini : les diversifications, concordantes entre elles, émergent ainsi progressivement à partir d'une forme fondamentale sous la direction de la norme spécifique qui définit la place et les conditions d'existence de l'espèce étudiée dans son milieu. Si l'œuf est général pour tout le règne animal, les ébauches primitives qui en sortent répondent à quatre types qui ne peuvent que se particulariser, ce qui exclut tout passage d'un type dans un autre : l'embryon d'un vertébré est donc vertébré dès l'origine et l'idée d'un parallélisme entre la série animale et la succession des états embryonnaires est inconcevable. Ces quatre types fondamentaux correspondent aux quatre embranchements de Cuvier et se définissent comme périphérique, compact, allongé, vertébré, dont le développement respectif est rayonné, contourné, symétrique et doublement symétrique. Dans la distribution des vertébrés, la seule que von Baer ait poursuivie dans son tableau systématique du règne animal (*Über Entwicklungsgeschichte der Thiere*, 1^{re} partie, 1828, p. 227), les classes et les ordres sont répartis suivant l'ordre d'apparition successive de formations embryonnaires choisies en raison de leur opposition dichotomique : franges branchiales/allantoïde, absence de cordon ombilical/présence d'un cordon ombilical, etc., ce qui amorce des remaniements de la classification admise, comme, par exemple, le regroupement de la classe des reptiles et de celle des oiseaux, dont T.H. Huxley fera plus tard le groupe des sauropsides, comme équivalent à la classe des mammifères. Le critère embryologique s'est donc totalement substitué au principe téléologique de la subordination des caractères. Après 1830, il revenait à l'anatomie comparée de prendre en compte ces acquisitions et ces déplacements.

On appelle « homologues » en géométrie les côtés qui, dans des figures semblables se correspondent et sont opposés à des angles égaux. Ce terme, apparu en 1585 dans l'*Arithmétique* de Stevin, se retrouve en 1822 dans le *Traité des propriétés projectives des figures* de Poncelet. Entre-temps, en Histoire naturelle, il a été utilisé en 1790 par N.J. de Necker, dans une *Phytologie philosophique* où le système naturel en botanique est qualifié de « système orologique » et où l'homologie est considérée comme l'équivalent dérivé du grec des mots latins *congruentia*, *convenientia*.

similitudo « comme on dirait rapports intérieurs, rapports non apparents. Ces termes sont synonymes du mot convenance, mais rapports extérieurs, rapports apparents, sont synonymes du mot ressemblance ». Les philosophes allemands de la Nature (Oken, Huschke, Heusinger, etc.) se servent du même mot d'une manière propre, selon Geoffroy Saint-Hilaire. « à rappeler le caractère nouveau et le but de leurs recherches, appliquées aux identités que présentent certaines parties, considérées dans le même être » (*Composition de la tête osseuse de l'homme et des animaux*, 1824, p. 4) : l'exemple en est la vertèbre, censée être identique à elle-même jusque dans la composition des os crâniens. Mais dans un *Mémoire sur la structure et les usages de l'appareil olfactif chez les poissons*, Geoffroy Saint-Hilaire le place dans la perspective du développement : « Les organes des sens sont homologues, comme s'exprimerait la philosophie allemande, c'est-à-dire qu'ils sont analogues dans leur mode de développement s'il existe véritablement en eux un même principe de formation, une tendance uniforme à se répéter, à se reproduire de la même façon » (o.c., 1825, p. 20-21), citation reprise en 1846 par Richard Owen dans un texte célèbre qui fait de l'homologie le concept clef de l'anatomie comparée : *On the Archaetype and Homologies of the vertebrate skeleton* (rapport à la British Association for the Advancement of Science, publié en 1848, trad. 1855, *Principes d'ostéologie comparée*).

C'est la répétition axiale ou symétrique d'une même structure de base reconnaissable à travers ses modifications qui semble avoir assuré la promotion du terme chez les tenants de la philosophie de la Nature, à savoir l'homologie sériale ou homotypie de Owen, qui en fait remonter le concept (mais non le terme) au mémoire de Vicq d'Azyr sur le *Parallèle des os qui composent les extrémités* (1774). De telles correspondances supposent cependant une « loi plus générale de l'uniformité de type », dont on peut découvrir les effets dans les convenances intérieures et inapparentes entre les espèces (celles sur lesquelles Necker établissait son *Systema omologicum*) : ce sont les homologies spéciales de Owen qui en font la base d'une nomenclature anatomique indépendante de la signification fonctionnelle des organes. L'homologie, qui désigne « le même organe dans différents animaux sous toutes les variétés possibles de formes et de fonctions », doit donc être distinguée strictement de l'analogie qui s'applique à la « partie ou organe qui, dans un animal, possède la même fonction qu'une autre partie ou organe dans un animal différent » (*Principes d'ostéologie comparée*, o.c., p. 27), et cela, même lorsque les deux aspects sont superposés. L'homologie générale, enfin, est censée rendre raison des homologies spéciales en rapportant les animaux qui les présentent à un type fondamental ou archétype dont la construction chez les vertébrés dépend de la répétition de segments identiques, manifestée par l'homotypie des vertèbres, et auquel on pourra rapporter « toutes les modifications variées des classes, des genres ou des espèces » (*ibid.*, p. 369). Ces

modifications résultent de la pénétration du modèle idéal, compris explicitement par Owen en un sens platonicien, par les exigences téléologiques qui relèvent des conditions d'existence imposées aux divers animaux.

À travers toute cette problématique, l'apport de l'embryologie apparaît rarement sans être totalement ignoré. Owen fait état, par exemple, du « progrès histologique » qui joue un rôle dans la détermination de l'homologie des préfrontaux, mais c'est pour ajouter aussitôt : « Quoiqu'on ait fait trop de cas de ces caractères embryonniques et qu'on ait abusé quelquefois de leur application » (*ibid.*, p. 103). Lorsqu'il mentionne von Baer (dans la première version des *Lectures on the comparative Anatomy and Physiology of the invertebrate animals*, en 1843) c'est surtout en vue de récuser une « theory of evolution » qui désigne le parallélisme de la série animale et de la succession des états embryonnaires, que l'ombre du lamarckisme s'y étend ou non. Cependant, c'est au cours de cette même décennie que le type ostéologique idéal commence à être miné par un type embryologique, centré non plus sur la vertèbre mais sur la corde dorsale, ce qui aura pour conséquence de ruiner le plus beau fleuron de la morphologie romantique : la théorie vertébrale du crâne.

En début de siècle, Duméril avait fait du crâne une seule vertèbre « pensante », Oken y en avait vu trois, Goethe et Carus six, Geoffroy Saint-Hilaire sept, etc., et Owen lui-même quatre (*Principes d'ostéologie comparée*, o.c., p. 155-170) ; les apophyses de ces vertèbres fournissaient les os de la face. Cuvier n'avait jamais admis cette théorie, mais Owen connaissait aussi l'objection soulevée par Agassiz : la corde dorsale contribue à la formation des vertèbres, mais elle ne dépasse pas la base du crâne ; seule, la ceinture occipitale peut donc être assimilée à une vertèbre (*ibid.*, p. 328-335) — objection devenue pour Owen une raison supplémentaire de contester la portée de l'embryologie. Néanmoins, c'est le type embryologique qui a déjà permis à Rathke de faire une découverte de premier ordre : l'Amphioxus, qui ne présente ni vertèbres ni crâne, possède une corde dorsale, si bien que l'embranchement des vertébrés est devenu virtuellement un sous-ensemble de celui des cordés (*Bemerkungen über den Bau des Amphioxus lanceolatus, ein Fisches aus der Ordnung der Cyclostomen*, 1841). Remak établira un peu plus tard que la vertèbre ne représente même pas la segmentation primitive du corps, mais seulement une resegmentation secondaire, ce qui avait été anticipé par Duméril (Remak, *Untersuchungen über die Entwicklung der Wirbelthiere*, 1855, p. 66-80 ; Constant-Duméril, *Considérations sur les rapports de structure qu'on peut observer entre les os et les muscles du tronc chez tous les animaux*, 1808). Cette histoire se termine sur l'ultime estocade portée par Huxley en 1858 (« On the theory of the vertebrate skull », *Scientific Memoirs*, vol. I, 1898, p. 538-605). L'embryologie a donc amorcé une nouvelle époque pour la théorie du crâne et même pour l'anatomie

comparée tout entière parce que le développement fournit un critère complémentaire du vrai et du faux dans la détermination des homologies, jusque-là sujettes à des spéculations mal contrôlables que le principe des connexions ne suffisait pas à endiguer ; l'absence de segmentation du crâne en est la preuve.

L'anatomie comparée, on le sait, avait permis à Cuvier d'opérer la résurrection des espèces fossiles : « [...] je n'avais pas à ma disposition la trompette toute puissante ; mais les lois immuables prescrites aux êtres vivants y suppléèrent, et, à la voix de l'anatomie comparée, chaque os, chaque portion d'os reprit sa place » (*Recherches sur les ossements fossiles*, 4^e éd., t. 4, 1836, p. 4). En 1800, les *Leçons* s'étaient réparties en fonction des organes et de leurs parties composantes, étudiés dans l'ordre de leur dégradation à travers les espèces actuelles. Par contre, il faut partir ici des cadres zoologiques disponibles dans lesquels les corrélations ostéologiques analysées sur les spécimens actuels permettront de déterminer la signification anatomique, taxinomique et fonctionnelle des documents paléontologiques à mesure qu'ils sont découverts. C'est ainsi que le mammouth, puis les mastodontes ont enrichi le « genre » des éléphants, avant de donner l'ordre des proboscidiens et que les restes de mammifères ongulés du Bassin parisien (paléothériums, anoplothériums, dichobunes) ont rempli les lacunes observables entre les groupes actuels dans la classification naturelle. Cependant, avec l'ichtyosaure et le plésiosaure, « nous voici arrivés à ceux de tous les reptiles et peut-être de tous les animaux fossiles qui ressemblent le moins à ce que l'on connaît et qui sont le plus faits pour surprendre le naturaliste par des combinaisons de structure qui, sans aucun doute, paraîtraient incroyables à quiconque ne serait pas à portée de les observer par lui-même... » (*ibid.*, t. 10, p. 387). Ces formes incroyables appartiennent à des terrains connus comme plus anciens que ceux où l'on trouve les groupes précédents : on rejoint ainsi la perspective ouverte par Giraud-Soulavie, à savoir la distribution des fossiles par rapport au temps, qui les rend d'autant plus dissemblables qu'on s'éloigne du présent (*Histoire naturelle de la France méridionale*, t. 1, 1780, 2^e partie, p. 100, p. 270). Que peut donc signifier ce rapport au temps des différences zoologiques que la paléontologie anatomique met en évidence ?

La théorie du développement progressif d'origine lamarckienne fournit une première réponse à cette question en associant les notions de simple, de primordial et de primitif pour caractériser la forme vivante originaire placée au départ d'une succession temporelle des degrés d'organisation, rangés par ordre de complexité croissante, qui est elle-même subordonnée à des conditions d'existence qui dépendent d'une diversification supposée progressive de la surface terrestre : selon Pander et d'Alton, le même *Bildungstrieb* (équivalent ici à la « puissance de la nature » de Lamarck) est responsable d'une gradation que l'on observe aussi dans la diversité actuelle des animaux et dans les activités morphogénétiques propres aux états

embryonnaires (« Das Riesen-Faulthier », *Die vergleichende Osteologie*, t. 1, 1821, fasc. 1, 2, 3 et 6). Il sera donc généralement admis au cours des décennies suivantes que « les genres des animaux éteints rappellent d'une manière permanente les formes embryonniques des genres voisins fossiles ou vivants ; tous ces genres doivent donc occuper dans le système une place plus élevée que leurs prédécesseurs dans les périodes géologiques antérieures » (citation d'une lettre d'Agassiz à Milne-Edwards par H.G. Bronn, « Essai d'une réponse... », *Comptes rendus suppl. Ac. d. Sc.*, t. 2, 1861, p. 529). Mais, puisqu'il a fallu renoncer à l'unité de la série, il a fallu aussi réinterpréter les développements à l'intérieur des types définis par von Baer, ce dont Agassiz a déduit les conséquences paléontologiques : les embranchements et les classes sont représentés dès les faunes les plus anciennes, si bien que les développements sont limités aux seuls ordres, également présents depuis l'origine, et dans chaque ordre, le rapport d'une forme passée aux formes ultérieures répond à quatre modalités différentes, désignées à leur tour comme des « types » : 1) le type embryonique, dont la forme ultérieure représente le développement ; 2) le type prophétique, dont la structure annonce l'apparition future d'un groupe distinct du premier (cas des poissons sauroïdes dont la forme préfigure les reptiles) ; 3) le type progressif, représenté par les ammonites, dont le nombre de chambres croît avec le temps ; 4) le type synthétique, dont les groupes suivants paraissent des démembrements (*Essay on classification*, 1859, sect. XXVI). Ces types définissent le cadre dans lequel le paléontologue devra discriminer ce qui relève de l'homologie, c'est-à-dire de la parenté structurale, et de l'analogie, c'est-à-dire de similitudes extérieures, et ceci, à chacun des niveaux de la classification. Mais ces rapports ne peuvent être qu'idéaux, car Agassiz reste convaincu de la fixité des espèces, recrées successivement en des centres géographiquement déterminés à la suite de destructions totales. Le développement est celui d'un plan divin.

Cette conception théologique du monde vivant souligne l'indépendance des espèces à l'égard des milieux physiques. À la même date (1859), la reconnaissance de cette même indépendance permet à Darwin de traiter les affinités entre les espèces éteintes et les espèces actuelles comme les conséquences d'une histoire des vivants, dont les rapports de parenté, réels cette fois, sont commandés par la sélection naturelle due à une concurrence vitale généralisée entre les individus et les populations (*On the origin of species*, 1859, éd. Mayr, 1964, chap. X). Les homologies deviennent le moyen d'accéder à la connaissance de ces parentés réelles, à condition de pouvoir représenter les traces résiduelles des adaptations réussies chez les groupes ancestraux, qu'ils ont transmises dans le potentiel héréditaire de leurs successeurs (*ibid.*, chap. XIII) : l'homologie entre les quatre fentes viscérales observées sur l'embryon de porc de quatre semaines en 1825 par Rathke (« Kiemen bei Saugthieren », *Isis von Oken*, 1825, p. 747-749) et les fentes branchiales des requins

qui ont même situation, même forme et même vascularisation, ne peut plus relever seulement du type de développement doublement symétrique des vertébrés ; elle prouve que tous les vertébrés ont eu des ancêtres adaptés à la respiration aquatique, dont ces formes sont le témoignage conservé au cours de l'embryogénèse. Quelles que soient donc les critiques dont l'idée de récapitulation des formes ancestrales dans l'ontogénèse des formes actuelles jusqu'à nos jours, l'enjeu est simple : Dieu ou les ancêtres, il faut choisir, parce que, sans appel à la prescience divine, on ne voit pas comment le modèle de von Baer pourrait rendre compte d'une ébauche munie de dispositifs respiratoires qui n'ont eu de sens que pour une vie aquatique, avant qu'il y ait eu vie réelle dans l'eau. Mais si l'archétype idéal et abstrait doit céder la place à un être primitif, ce sont toujours les cadres et les concepts de l'anatomie comparée transcendante auxquels Darwin donne une autre signification que celle qui leur avait été assignée par la philosophie de la Nature et par la théologie naturelle.

Ces cadres et concepts, élaborés en un temps où les vertébrés étaient au premier plan de la recherche anatomique, avaient déjà été remaniés dès la fin de la deuxième décennie du siècle en raison des perfectionnements du microscope et des développements de la zoologie marine : ce sont de nouveaux territoires qui se sont alors ouverts à une exploration centrée, cette fois, sur les invertébrés, et principalement sur les radiés, embranchement dans lequel Cuvier avait laissé toutes les formes qu'il n'avait pu loger ailleurs. Il sera démantelé en trois groupes reconnus comme primaires, celui des protozoaires, distingué par Siebold (von Siebold et Stannius, *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie*, 1845, trad., 1850, t. 1, L. I), puis ceux des coelentérés et des échinodermes, séparés par Leuckart (*Ueber die Morphologie und die Verwandtschaftsverhältnisse der wirbellosen Thiere*, 1848). Or, dans cette nouvelle division primaire des échinodermes, la comparaison anatomique des larves et des adultes a montré que les formes larvaires analogues à celles des vers, dont la symétrie est jugée bilatérale, donnent des formes adultes radiaires (« J. Müller Abhandlungen über den Larven und Metamorphosen der Echinodermen ». *Abh. Berl. Acad.*, 1848-1851) : il en résulte que l'œsophage de l'adulte n'est pas homologue à celui de la larve, et qu'il en est de même de l'anneau nerveux œsophagien de l'échinoderme et de celui de l'annélide, du fait que l'adulte s'est produit par gemmation dans la larve (« T.H. Huxley Report upon the researches of Prof. Müller into the Anatomy and development of the Echinoderms, 1851 ». *Scientific Memoirs*, o.c., t. 1, p. 103-119). Un type peut donc se transformer en un autre au cours d'un même parcours individuel. Pourquoi une telle révolution organique ? Tant que l'animal n'avait pas accumulé le calcaire nécessaire pour former l'appui des ambulacres, il lui fallait nager, et la forme bilatérale est favorable à la natation : tout se passe donc comme si le type larvaire était la traduction

morphologique d'un mode primitif d'adaptation commun à la lignée et à l'individu.

Des passages du type bilatéral au type radiaire ont été décrits ailleurs par J. Müller. À l'inverse, on sait que les cténophores vont du type radiaire au type bilatéral, que les échinides et les holothuries reviennent aussi à la symétrie bilatérale. Mais, lorsqu'on aborde le monde des infusoires, on rencontre toutes sortes de dispositions et tout s'y passe comme si le type géométrique perdait toute prééminence par rapport à d'autres caractères, par exemple la présence ou l'absence d'une vésicule pulsatile (E. Haeckel, *Die Radiolarien*, 1862, p. 209-211). Cet affaiblissement de la notion de type affranchit le concept d'homologie des limites qu'il lui imposait : il désigne désormais tout caractère hérité qui se manifeste principalement dans la formation de parties du corps morphologiquement importantes mais physiologiquement secondaires (E. Haeckel, *Generelle Morphologie*, 1866, texte repris in G. Heberer, *Der gerechtfertigte Haeckel*, 1968, p. 209). Ainsi comprises, les homologies peuvent encore indiquer l'appartenance d'un organisme à un type, mais le mot est désormais synonyme de lignée ou de souche (*Stamm*) ou encore de phylum (*Phylon*) et l'ambition de Haeckel est de parvenir, grâce à elles, à reconstituer les lignées évolutives arborescentes depuis les origines du monde vivant, en combiant les lacunes paléontologiques par un recours à « la loi biogénétique fondamentale » d'après laquelle « l'ontogénèse est une courte et rapide récapitulation de la phylogénèse, conformément aux lois de l'hérédité et de l'adaptation » (*Generelle Morphologie*, t. 2, p. 6, p. 300, etc.). Cette loi a pour principe que l'ontogénèse individuelle ne peut avoir pour cause que la série historique des ancêtres dont elle n'est que l'aboutissement provisoire : c'est ainsi que l'homologie générale des deux premiers feuilletts embryonnaires pour la totalité des métazoaires chez lesquels il se forme une gastrula suppose une gastraea primitive qui aurait vécu dans le fond des océans précambriens (*Studien zur Gastraea-Theorie*, 1877). Il y aurait donc monophylétisme du règne animal, une fois dépassé le niveau des protozoaires (Ur-Thiere), dont Haeckel faisait un règne à part (*Generelle Morphologie*, in Heberer, o.c., p. 269).

C'était trop simple. Dans les classifications zoologiques du milieu du siècle, les ascidies étaient placées parmi les mollusques, soit avec le rang de classe, soit comme ordre dans la classe des acéphales. Lorsque Kowalevsky, élève de Rathke, a découvert en 1867 l'homologie de la corde dorsale de l'amphioxus et du ruban axial de la queue des larves d'ascidies, Haeckel y a vu une transition généalogique évidente entre les invertébrés et les vertébrés, sans se rendre compte qu'il s'agissait d'une observation incompatible avec la loi biogénétique fondamentale (« Kowalevsky Entwicklungsgeschichte des Amphioxus lanceolatus 1866 », *Mem. Ac. Sc. de Saint-Petersbourg*, 7^e série, t. XI, n° 4, 1867 ; E. Haeckel, *Anthropogénie*, 1874, trad., 1877, p. 280-297) : il ne pouvait pas y avoir récapitulation de la forme adulte des ascidies au cours de l'ontogénèse

des vertébrés, comme le supposait la loi, puisque cette homologie impliquait la reproduction directe de la forme larvaire avant que l'animal ne parvienne à la forme adulte. L'évolution ne se réalisait donc pas seulement par addition successive de modifications adaptatives réussies par les formes adultes. Ces reproductions larvaires ou néoténies, et le processus correspondant au paedomorphose, se sont ajoutées au modèle de développement par divergence de von Baer dans d'innombrables réfutations de la loi biogénétique, identifiée abusivement au double parallélisme de Meckel-Serres (textes principaux : Gavin de Beer, *Embryology and Evolution*, 1930 ; S.J. Gould, *Ontogeny and Phylogeny*, 1977). Mais c'est encore l'embryologie, confrontée à la paléontologie anatomique, qui est à la base de la théorie jugée la plus vraisemblable de l'origine des vertébrés à partir d'une forme ancestrale dont proviennent aussi les échinodermes (R.P.S. Jefferies, *The ancestry of the vertebrates*, 1986) : la larve d'ascidie serait elle-même une récapitulation d'ancêtres calcichordés (M. Benton, *Vertebrate Palaeontology*, 1990, p. 12).

De fait, Haeckel savait que l'être vivant n'était pas purement récapitulatif de son passé : au cours de l'ontogénèse, l'image de la phylogénèse est non seulement abrégée mais encore déformée par des processus secondaires de contraction propres à la vie embryonnaire et à ses adaptations particulières (*Generelle Morphologie*, in Heberer, o.c., p. 210), processus regroupés sous le terme de *cenogenie* par opposition à l'histoire ancestrale désignée comme *palingenie* (*Gegen die Gegner*, 1875, *ibid.*, p. 346-347). Or, d'un côté comme de l'autre, il s'agit d'adaptations qui diffèrent moins par nature que par leur date. Reconstituer une lignée ou phylum, et, de ce fait, rendre raison des parentés entre les espèces actuelles ou disparues suppose que l'on puisse faire la part entre les inflexions anciennes et les déformations physiologiques plus récentes qui les masquent, mais qui peuvent aussi se confondre avec elles dans la composition d'une organisation biologique foncièrement ambiguë. Le travail anatomique consistera donc à regrouper les multiples faits tirés de l'embryologie, de la paléontologie et de l'anatomie comparée qui, en s'éclairant les uns les autres permettront de discriminer les homologies et les analogies malgré leurs ressemblances, et non plus à construire des lois de développement. Il s'agit, en définitive, de retrouver une histoire à partir de tous les indices disponibles, par exemple l'histoire de la tête des vertébrés. Huxley avait démontré en 1858 que la formation du crâne ne présentait jamais la segmentation caractéristique de celle des vertébrés, mais si la théorie vertébrale n'était plus soutenable, la question d'une métamérie de la tête restait posée en raison de la disposition initiale des arcs branchiaux dans la série entière des vertébrés. Gegenbauer met en évidence cette métamérie en observant dans le groupe primitif des séliaciens l'homologie des nerfs crâniens et des nerfs spinaux, et tout spécialement en découvrant que le nerf vague représentait la condensation d'une pluralité de nerfs spinaux : cette disposition

du nerf vague des séliaciens était ainsi le témoignage anatomique d'une histoire phylogénétique dont ni les autres formes animales inférieures, ni l'ontogénèse ne montrent plus la trace (B. Balan, *L'ordre et le temps*, 1979, p. 472-475).

Le rôle fondamental de l'anatomie comparée reste la reconnaissance des identités à travers les espèces, indépendamment des généalogies et par conséquent, du temps : les concepts majeurs de type et d'homologie renvoient à une perspective platonicienne et géométrique qui a trouvé un regain de faveur au cours de la première partie du XX^e s., où elle a rencontré une dérive idéaliste de la biologie (J. Kälin, *Ganzheitliche Morphologie und Homologie*, 1941). Mais depuis 1859, il est devenu impossible de recuser la dimension temporelle comme caractéristique essentielle du monde vivant. Le repérage des identités devient alors le moyen par excellence de faire ressortir les différences en vue d'en déterminer la signification et les conditions d'émergence dans le temps géologique et l'espace géographique : sans ostéologie comparée, il est évident que la paléontologie des vertébrés n'était pas possible, non seulement pour identifier et reconstituer les espèces disparues, mais aussi pour établir l'ordre des variations dans un phylum déterminé, sans pour autant rattacher cette histoire à un plan divin désormais superflu.

Comme on l'avait reconnu depuis longtemps, il n'existe pas de coupure entre la forme adulte d'un animal et son développement : c'est pourquoi les traités et manuels d'anatomie comparée débute toujours par un chapitre embryologique, ce qui s'accompagne, tacitement ou explicitement, de la question des rapports théoriques de la phylogénèse et de l'ontogénèse. Mais il faut alors faire appel à des sciences et à des méthodes qui lui étaient étrangères à ses origines ou l'analyse de l'organisation ne relevait que de la dissection et de l'observation macroscopique. Au cours du XIX^e s., le microscope et les colorants cellulaires lui ont permis d'élargir et d'approfondir certaines de ses recherches, mais en restant sur le plan du visible. Avec la génétique et la biologie moléculaire, on a vu naître des techniques destinées à pénétrer l'invisible qui n'ont plus grand chose à voir avec la comparaison anatomique proprement dite. Néanmoins, il faut toujours en revenir à un moment où à l'autre à ce que l'on voit : si l'anatomie comparée ne détient plus la fonction rectrice qu'elle a occupée à ses origines, en tant que située au niveau de l'exploration du visible, elle-même encore inachevée en raison de l'énorme richesse des productions vivantes, elle conserve aussi un rôle de correction et de contrôle vis-à-vis de spéculations plus ou moins risquées dont les sciences nouvelles peuvent être l'occasion en raison de leur caractère ésotérique.

► CANGUILHEM G., LAPASSADE G., PIQUEMAL J. & ULMANN J., *Du développement à l'évolution au XIX^e siècle*. Thales, t. XI, 1960, rééd., Paris, PUF, 1985. — DAUDIN H., *Cuvier et Lamarck. Les classes zoologiques et l'idée de série animale (1790-1830)*. Paris, Alcan, 2 vol., 1926. — ROMER A.S., *The vertebrate body*.

2^e éd., Philadelphie/Londres, 1965. — RUDWICK M., *The Meaning of Fossils*, Londres/New York, 1972. — RUSSEL E.S., *Form and Function*, Londres, 1916 (repr., 1972).

Bernard BALAN

→ Développement ; Embryogenèse ; Espèce ; Haeckel ; Loi biogénétique fondamentale ; Monstre.

ANTIMATIÈRE

PHYSIQUE / COSMOLOGIE

Spéculations et anticipations

La matière ordinaire se compose de particules élémentaires à charge positive, négative et neutre (les protons, les électrons et les neutrons) et obéit aux lois de la gravitation, celles de l'attraction que les corps matériels exercent les uns sur les autres. De manière générale, l'idée d'antimatière postule l'existence d'une matière de nature exotique qui serait pour ainsi dire inverse ou symétrique de la matière ordinaire. S'il est d'usage en physique de faire remonter l'hypothèse de l'antimatière au début des années 1930, ce concept relève en fait d'une histoire beaucoup plus ancienne.

Il existait déjà en germe dans la théorie atomique du vortex, qui présentait les atomes comme des tourbillons (vortex) créés dans l'éther. C'est en élaborant cette théorie que le physicien britannique W.M. Hicks avança dans les années 1880 que la matière « positive » ordinaire avait sa contrepartie dans une matière gravitationnellement « négative » composée d'éléments qui s'attiraient mutuellement alors qu'ils repoussent la matière ordinaire. Les physiciens de la fin du siècle s'inspirèrent de ses réflexions pour essayer d'expliquer la gravitation newtonienne à partir de l'hydrodynamique ou de l'électrodynamique. En 1897, l'Allemand August Föppl construisit ainsi une théorie des masses positives et négatives par analogie avec la théorie électromagnétique des charges positives et négatives. À sa suite, Arthur Schuster imagina qu'il devait exister des systèmes stellaires entièrement composés d'antimatière, identiques à priori à notre système solaire mais où les corps se repoussent mutuellement au lieu de s'attirer. En sus d'introduire dès 1898 les termes « antimatière » et « antiatomes », Schuster suggéra par ailleurs que les rencontres entre matière et antimatière provoquent leur anéantissement. D'autres avant lui s'étaient intéressés de manière toute spéculative à la charge des particules électriques censées constituer les atomes et parfois assimilées à des corpuscules d'éther. Pour Robert Grassmann (1862) et Wilhelm Weber (1876), les atomes correspondaient à des assemblages de particules élémentaires ne se différenciant les unes des autres que par leurs charges opposées. Les particules à charge négative de Grassmann et Weber étant des reflets conformes des particules à charge positive, les spéculations de ces deux scientifiques peuvent effectivement apparaître comme une manière d'anticiper sur le concept d'antiparticules.

Bien que la découverte de l'électron (1897) ait permis de vérifier que cette particule n'existait que sous forme négative, pendant toute une période les scientifiques restèrent convaincus qu'elle devait avoir un pendant positif, autrement dit qu'il existait des électrons positifs de même masse que les électrons négatifs. En présentant en 1894 sa théorie électromagnétique, Joseph Larmor avait émis l'hypothèse que les unités constitutives de la matière (les électrons) sont toutes « quantitativement semblables, à ceci près que certaines ont des charges électriques positives et d'autres négatives, les premières n'étant, de par leurs caractéristiques dynamiques, que des perversions ou des images optiques des secondes ». On a bien là une définition rudimentaire des particules et des antiparticules. En 1901, James Jeans franchit un pas supplémentaire en déclarant qu'il arrive que des « électrons de charge inverse se percutent et s'annihilent mutuellement », réaction à l'origine d'une production d'énergie dont on sait qu'elle provient en fait de la désintégration radioactive. Mais le recoupement des données expérimentales alors disponibles confirmant que les électrons ne possédaient qu'une charge négative, force fut donc de trouver une autre explication à la charge positive. Quelques scientifiques continuèrent pourtant à soutenir que leurs résultats attestaient l'existence d'une particule symétriquement inverse de l'électron négatif. Jean Becquerel, sans doute le défenseur le plus acharné de l'électron positif, affirma même l'avoir détectée au cours d'une série d'expériences menées de 1906 à 1910. Il ne fut cependant pas pris au sérieux et quand, en 1913, on découvrit que le noyau d'hydrogène (proton) constituait la charge élémentaire positive du couple de charges hypothétiquement symétriques, il ne fut pratiquement plus question de l'électron positif. Par la suite, le succès des théories atomiques de Bohr et de Rutherford conduisit à penser que la matière se compose exclusivement d'électrons négatifs et de protons pourvus d'une charge positive beaucoup plus importante.

Antiparticules quantiques

Le concept moderne d'antiparticules s'est imposé avec l'équation quantique relativiste énoncée en 1928 par Paul Dirac, qui admet des solutions pour des électrons positivement et négativement chargés. Pour interpréter les solutions d'énergie négative, Dirac postula qu'il existait un monde d'états d'énergie négatifs uniformément occupés par une infinité d'électrons ; ces états échappent à l'observation, mais il suffit que l'un d'eux se vide (forme un « trou ») pour apparaître sous les espèces d'une particule bien réelle, dotée d'une énergie et d'une charge positives. Cette première description qui date de 1930 est à l'origine du concept d'antiparticule quantique. Restait cependant à donner de l'antiparticule une définition plus précise que celle de simple « trou » creusé dans une hypothétique « mer » d'énergie négative. En 1930, l'électron et le proton étaient les seules particules élémentaires

identifiées, ce qui conduisit Dirac à suggérer que l'antiparticule et le proton ne font qu'un. Tentante parce qu'elle réalisait l'unification des électrons et des protons, cette thèse permettait aussi de prédire que des électrons ordinaires sont susceptibles de passer par un état quantique intermédiaire afin de « boucher un trou », ce qui provoque leur anéantissement et celui du proton ($p^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$). Ces processus de destruction avaient déjà été postulés par Sir Arthur Eddington, mais c'était la première fois qu'ils trouvaient une justification en physique.

Dans la première équation de Dirac, l'antiparticule qui a le statut d'un proton ordinaire ne représente donc pas un nouvel élément de matière. Mais très vite obligé de renoncer à son hypothèse, le physicien proposa en mai 1931 de voir dans l'antiparticule une particule d'un type nouveau correspondant en fait à un électron de charge positive. Cette particule nouvelle qui n'avait pas encore été expérimentalement observée devait être détruite en présence des électrons ordinaires (négatifs), conformément à l'équation $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$; inversement, selon le processus de création par paire, un quantum d'énergie d'un gamma devait pouvoir former une paire électron-antiparticule. Dans la logique de cette équation qui tient également compte des protons, Dirac posa de surcroît en principe l'existence des antiprotons, autrement dit des protons à charge négative. Il alla plus loin encore dans son discours de réception au prix Nobel (1933) en envisageant l'hypothèse d'une matière entièrement composée d'antiparticules : « Il est fort probable qu'un certain nombre d'étoiles [...] soient essentiellement constituées de positrons et de protons négatifs », déclara-t-il avant d'ajouter que cette répartition se faisait peut-être à parts égales. Le concept d'antiparticules avancé par Dirac en 1931 devait nourrir bien des spéculations, entre autres l'idée que les antiprotons entrent dans la constitution du noyau atomique et qu'il existe des astres de pure antimatière. L'antineutron, particule symétrique du neutron, fut pour la première fois mis en avant par Gleb Wataghin en 1935. Un an plus tôt, Stjepan Mohorovicic qui travaillait sur un modèle d'atomes exclusivement composés d'électrons négatifs et positifs, imagina qu'ils pouvaient entrer dans la constitution d'une matière étrange aux propriétés particulières. Le plus simple possible de ces systèmes fut effectivement détecté en 1951 ; on le baptisa positronium.

Découvertes

D'abord accueillies avec scepticisme, les brillantes prédictions de Dirac reçurent une confirmation inattendue des études menées sur le rayonnement cosmique par Carl Anderson, qui après avoir découvert en 1932 des traces de particules positives en conclut l'année suivante qu'elles signaient la présence d'électrons à charge positive auxquels il donna le nom de « positrons ». Anderson ne fit pas tout de suite le lien entre ces particules du rayonnement cosmique

et la prédiction de Dirac, et il fallut pour cela attendre les résultats des travaux menés en Angleterre par Patrick Blackett et Giuseppe Occhialini. Si la découverte de la première antiparticule confirma donc dès 1933 la justesse de la théorie de Dirac, le fait que les antiparticules aient désormais droit de cité en physique n'obligeait pas les physiciens à souscrire à son interprétation. Ils s'aperçurent assez vite que sans tenir compte de la « théorie des trous », il était possible d'étudier les antiparticules en s'en tenant à la théorie quantique du champ. Très peu de temps après la découverte d'Anderson, la présence du positron fut détectée dans d'autres expériences portant aussi bien sur le rayonnement cosmique que sur le domaine encore tout nouveau de la radioactivité artificielle (1934). Aujourd'hui, les physiciens maîtrisent parfaitement la production des positrons qui trouvent de nombreuses applications scientifiques et technologiques.

La plupart des spéculations menées au cours des années 1930 sur les protons négatifs ne retenaient pas la définition de l'antiproton donnée par Dirac. En 1937, Robert Millikan crut un temps avoir découvert des protons négatifs dans le rayonnement cosmique. Cette pseudodécouverte ne résista toutefois pas à l'examen, et l'histoire se répéta en 1946 lorsque les physiciens soviétiques affirmèrent avoir détecté une particule insaisissable. Les antiprotons étant des particules à masse élevée, il faut en effet une énergie considérable pour les produire par paires avec des protons ordinaires, un pas qui pour être franchi nécessitait la mise au point d'accélérateurs très puissants. Quand le synchrotron à protons de Berkeley (le Bevatron) entra en service en 1954, l'équipe dirigée par Emilio Segrè l'utilisa pour observer l'éventuelle production d'antiprotons couplés à des protons ordinaires. En octobre 1955, ces chercheurs annoncèrent qu'ils disposaient pour la première fois de données fiables et confirmées attestant l'existence de l'antiproton. Ainsi, fait remarquable, cette antiparticule qu'il était impossible d'observer dans la nature fut découverte à partir du moment où l'on est parvenu à la produire à l'aide d'une machine, et donc en un sens à la fabriquer. Il est aujourd'hui possible de produire dans les accélérateurs des faisceaux d'antiprotons, utilisés dans de nombreuses expériences à haute énergie. Cela étant, les antiprotons existent à l'état naturel, ce qui fut pour la première fois démontré en 1955 lorsque des phénomènes liés au rayonnement cosmique furent présentés comme le résultat de collisions d'antiprotons.

Une fois maîtrisée la production des antiprotons par le Bevatron, il devenait relativement facile de produire des antineutrons, étape qui fut également menée à bien à Berkeley en 1956. Produit par paires avec le neutron ordinaire et doté comme lui d'une charge neutre, l'antineutron s'en distingue par un rapport inversé entre le spin et le moment magnétique. Le neutrino a lui aussi son antiparticule, mais dans un certain nombre d'autres cas (celui du pion neutre, par exemple), l'antiparticule est identique à la particule originale. Selon le principe

de la conjugaison des charges énoncé par Hendrik Kramers en 1937, il existe une symétrie absolue entre les particules et leurs antiparticules. Ce n'est que par convention qu'on accole à ces dernières le suffixe « anti » : parler d'antiproton, par exemple, indique simplement que cette particule est beaucoup plus rarement observée que le proton ordinaire. En 1956, toutes les antiparticules des constituants élémentaires de la matière avaient donc été découvertes, ce qui permit de reprendre les spéculations de Dirac sur l'antimatière. Bien que les antiatomes soient particulièrement instables du fait de la vitesse à laquelle les antiparticules et les particules se désintègrent lorsqu'elles sont en présence, ils peuvent néanmoins se former et survivre assez longtemps pour être détectés. Au début de l'année 1996, un groupe de chercheurs du CERN put observer neuf atomes d'antihydrogène constitués de positrons liés à des antiprotons. Les physiciens espèrent aujourd'hui pouvoir mesurer le spectre de l'antihydrogène afin de vérifier les principes de symétrie défendus en physique.

L'antimatière en cosmologie

Avant même que Dirac prédise l'existence de l'antiparticule, un certain nombre de scientifiques avaient pressenti que les processus de désintégration observés entre les protons et les électrons devaient jouer un rôle important en cosmologie. Dès 1930, Richard Tolman les invoquait pour expliquer l'expansion de l'univers. Un demi-siècle plus tard, en 1955, la détection de l'antiproton alimenta maintes spéculations sur l'antimatière et son éventuelle intervention dans les processus cosmiques. Comment expliquer en effet que la Terre et son environnement soient exclusivement composés de matière s'il y a symétrie entre la matière et l'antimatière ? Faut-il alors voir dans l'asymétrie un phénomène local, et poser qu'à l'échelle du cosmos la matière et l'antimatière sont également réparties ? En 1956, Maurice Goldhaber souligna que le modèle du big bang supposait en fait l'asymétrie de la « création » de l'univers et ne permettait par conséquent pas de comprendre pourquoi notre univers ne se compose que d'une seule catégorie de matière ; poussant jusqu'au bout la logique de la symétrie, il proposa de considérer que l'univers avait peut-être son pendant dans un « anticosmos » entièrement composé d'antimatière, les deux ayant été séparés tout de suite après le big bang. Au cours des années 1960, le problème du déficit d'antimatière ne retint guère les cosmologistes ; lorsqu'ils ne l'écartaient pas purement et simplement, ils se contentaient d'imputer l'absence constatée de symétrie à une asymétrie présumée des conditions initiales du tout jeune univers. Ce qui revenait à repousser le problème, puisqu'on ne savait toujours pas expliquer à quoi tenait cette asymétrie présente dès le départ.

Devant l'impuissance de la théorie du big bang et de sa rivale, celle de l'état d'équilibre, à interpréter le déficit d'antimatière de l'univers, le Suédois Hannes

Alfvén élaborera dans les années 1960 un modèle cosmologique se réclamant explicitement d'une symétrie matière/antimatière. Dans cette hypothèse, l'univers aurait d'abord existé sous la forme d'un mélange très dilué de protons et d'antiprotons ; les processus d'annihilation se seraient intensifiés sous l'effet de la condensation due à la pesanteur, jusqu'à ce que la pression du rayonnement produit en conséquence mette un terme à la désintégration et induise l'expansion que nous observons. Après avoir rebaptisé la matière ordinaire « koinomatière », et forgé le terme « ambiplasma » pour désigner le plasma constitué par la koinomatière et l'antimatière, Alfvén suggéra qu'un mécanisme faisant intervenir les champs magnétiques cosmiques avait pu dissocier l'ambioplasma en séparant la koinomatière de la matière. D'après ce modèle, donc, la koinomatière constitue l'essentiel de l'univers observable qui comprend par ailleurs une partie plus difficile à déceler, correspondant à l'antimatière. La plupart des cosmologistes se refusent néanmoins à envisager l'univers sous les espèces d'un plasma symétrique.

Selon les thèses aujourd'hui défendues en cosmologie, l'asymétrie cosmique serait le résultat d'une brisure de symétrie survenue spontanément aux tout débuts de l'univers. Les théories dites « unifiées » suggèrent que l'excédent observé de matière sur l'antimatière est dû aux lois physiques qui prévalaient au temps 10^{-36} seconde après le big bang. Même si aujourd'hui encore rien n'exclut que des régions de l'univers soient entièrement composées d'antimatière, cette hypothèse est invérifiable empiriquement. Les images d'« antimondes » et à fortiori d'« anticivilisations » appartiennent au domaine de la spéculation ou de la science-fiction. En l'état actuel des connaissances, une seule chose est sûre : le monde est avant tout fait de matière et l'antimatière n'y est présente qu'à l'état de traces ténues.

► ALFVÉN H., *Worlds-Antiworlds : Antimatter in Cosmology*, San Francisco, W.H. Freeman, 1996. — DIRAC P.A.M., « Theory of electrons and positrons » (1933), *Nobel Lectures, Physics 1922-1941*, Amsterdam, Elsevier, 1965, p. 320-325. — FORWARD R.L., « Antimatter science and technology bibliography », in BONNIER B.E. et al. dir., *Antiproton Science and Technology*, Singapour, World Scientific, 1988, p. 686-752. — HANSON N.R., *The Concept of the Positron : A Philosophical Analysis*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1963. — JAMMER M., *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, New York, Harper & Row, 1964. — KRAGH H., « Concept and controversy : Jean Becquerel and the positive electron », *Centaurus*, vol. 32, 1989, p. 203-240 ; « The negative proton : Its earliest history », *American Journal of Physics*, vol. 57, 1989, p. 1034-1039 ; Dirac : *A Scientific Biography*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1990. — NORTH J.D., *The Measure of the Universe : A History of Modern Cosmology*, New York, Dover, 1990.

Helge KRAGH
(trad. O. Bonis)

→ Atome ; Big bang ; Électron ; Expansion de l'univers ; Matière.

A PRIORI

La distinction de l'*a priori* et de l'*a posteriori*, d'héritage scolastique, marque le partage entre deux modes de raisonnement : du principe à la conséquence pour l'*a priori* ; de la conséquence au principe pour l'*a posteriori*. Ainsi parlera-t-on de preuve *a posteriori* de l'existence de Dieu à propos de celle qui remonte de ses effets (les choses créées) à lui comme cause, et de preuve *a priori* à propos de celle qui déduirait cette existence de son essence.

Leibniz réorienté ce couple conceptuel aux fins de la distinction de deux types de connaissance : l'*a posteriori*, qu'il identifie à la connaissance d'expérience, et l'*a priori*, c'est-à-dire la connaissance par la raison. Dieu, à notre différence, connaît toutes choses *a priori*, et n'a pas besoin de l'expérience. C'est que, dans l'essence individuelle de chaque chose est inscrit tout ce qui lui arrivera, et « on y voit les preuves *a priori* de la vérité de chaque événement, ou pourquoi l'un est arrivé plutôt que l'autre » (*Discours de métaphysique*, § 13) — « la connexion du sujet et du prédicat de ces propositions a son fondement dans la nature de l'un et de l'autre ». On relèvera que la sphère de l'*a priori* débordé celle de la seule nécessité, car cette thèse d'apriorité n'empêche pas Leibniz de maintenir la contingence desdites vérités, dont le contraire, au moins en droit, demeure possible. Leur vérité n'est en fait pas nécessairement gagée sur le principe de contradiction, mais sur le principe de raison (« Rien n'est sans raison, ou toute vérité a sa preuve *a priori*, tirée de la notion des termes, quoiqu'il ne soit pas toujours en notre pouvoir de parvenir à cette analyse », lettre à Arnauld n° 11 du 4/14-07-86), et celui-ci semble parfois constituer pour Leibniz le principe par excellence desdites vérités *a priori*. Mais il lui arrive aussi de faire des propositions identiques, dont le prédicat est identique au sujet et qui sont vraies en vertu du seul principe de contradiction, « les premières vérités *a priori* », identifiant celles-ci aux vérités de raison en général (*Nouveaux essais sur l'entendement humain*, IV, ix, § 2).

Si l'apriorité ne se réduit pas à ce qui sera nommé analyticités à partir de Kant, il reste qu'elle a quelque chose à voir avec le type de lien qui peut unir le sujet et le prédicat d'une proposition, en tant que celui-ci est déterminé par leur simple nature, indépendamment de l'expérience. On y trouve un certain sens du possible : l'expérience prouve *a posteriori* la possibilité d'une chose ; mais montrer *a priori* cette possibilité, c'est mettre en évidence « la génération possible de la chose », indépendamment du fait de savoir si elle est réalisée (*Discours de métaphysique*, § 24). De ce point de vue, la connaissance *a priori* finit par s'identifier avec celle de la « cause ou raison », dans une ambiguïté relevée par Leibniz : « La raison est la vérité connue dont la liaison avec une autre moins connue fait donner notre assentiment à la dernière. Mais particulièrement et par excellence on l'appelle raison, si c'est la cause non seulement de notre jugement, mais encore de la

vérité même, ce qu'on appelle aussi *raison a priori*, et la cause dans les choses répond à la raison dans les vérités. C'est pourquoi la cause même est souvent appelée raison, et particulièrement la cause finale » (*Nouveaux essais*, IV, xvii, § 1). C'est précisément contre cette équivoque que s'élèvera Kant, son apport consistant à donner une signification strictement transcendantale à la notion.

Cela passe d'abord par une radicalisation de l'écart entre la connaissance *a priori* et la connaissance d'expérience : là où la première pouvait jusque-là caractériser une connaissance indépendante de telle ou telle expérience particulière, mais qui serait tirée de l'expérience comme règle générale, Kant ne veut plus entendre par elle que celle qui est « absolument indépendante de toute expérience » (*Critique de la raison pure*, B 3). Cela ne veut pas dire que les concepts et les objets de ladite connaissance ne comportent rien d'empirique (ce qui serait la définition de la connaissance pure), mais que sa vérité et le type de savoir auquel elle prétend sont, même à la racine, indépendants de toute expérience. Kant isole deux critères d'une telle connaissance : la nécessité et l'universalité, que l'expérience ne peut procurer ni l'une ni l'autre.

L'aspect le moins remarquable de la construction kantienne n'est pas l'extension de ce domaine de l'*a priori* au champ de la connaissance intuitive, dans lequel une certaine forme d'indépendance par rapport au contenu d'expérience, et donc de nécessité et d'universalité, est également concevable. C'est la doctrine, qui sera fort disputée, des formes *a priori* de l'intuition (l'espace et le temps). Apriorité sensible (celle de l'intuition) et apriorité conceptuelle (celle des catégories, concepts purs de l'entendement) se conjuguent pour rendre possible la connaissance. Ce nouveau sens de la possibilité, comme possibilité d'une connaissance, est proprement transcendantal, et, en rupture avec le sens métaphysique de l'*a priori* (comme condition réelle des choses, qui serait accessible, au moins en droit, à la pure raison), le lie paradoxalement à l'expérience, qui lui donne (*a posteriori*) un sens et dont il est pourtant la condition de possibilité : « Si les éléments de toutes les connaissances *a priori* [...] ne peuvent pas être empruntés à l'expérience [...], ils doivent toujours contenir les conditions pures *a priori* d'une expérience possible et d'un objet de cette expérience, car autrement non seulement rien ne serait pensé par leur moyen, mais ils ne pourraient pas même, sans *data*, naître jamais dans la pensée » (*Critique*, A 96). Désormais Kant soumettra la possibilité de jugements *a priori* — tout au moins synthétiques, c'est-à-dire dont le prédicat ne serait pas immédiatement compris dans le sujet — au principe de la possibilité de l'expérience (ce qui ne veut pas dire à l'expérience réelle), comme à sa garantie.

Ce lien intrinsèque entre *a priori* et expérience est encore ce qui aujourd'hui est au centre de toute discussion sur la possibilité et le sens d'une connaissance *a priori* : l'expérience a-t-elle besoin d'un tel préalable ? Peut-on aussi nettement faire le partage entre ce

qui, dans la constitution de l'expérience, serait *a priori* et ce qui ne le serait pas – ce qui relèverait du simple donné, venu après coup ? D'autre part, faut-il voir dans ce préalable, comme nous y invite Kant, la dépendance de la morphologie de l'expérience par rapport à la structure essentielle d'un sujet connaissant, même et surtout là où celle-ci, soustraite elle-même à toute expérience, ne s'entend plus, comme chez Leibniz, en terme d'innéité ? Au XX^e s., le débat est relancé par la phénoménologie, au prix d'une certaine forme de réontologisation de l'*a priori* (entendu toutefois comme ce qui détermine dans son essence le corrélat d'une conscience), de ce qui est nommé par Husserl *a priori* matériel (*Recherches Logiques*, III, § 11), qui caractérise la constitution *a priori* d'une chose en tant que sa nature comporte, en dehors de toute implication logique, telle ou telle propriété : ainsi appartient-il à toute chose étendue d'avoir une couleur. Ce nouveau sens de l'*a priori* fondera, dans *La crise des sciences européennes* (§ 36), l'idée d'un « *a priori* du monde de la vie ». Schlick et Wittgenstein attribueront à la forme de notre langage un tel *a priori*, auquel la phénoménologie prête une nécessité d'essence.

► DUFRENNE M., *La notion d'a priori*, Paris, PUF « Épiméthée », 1959. – GRONDIN J., *Kant et le problème de la philosophie : l'a priori*, Paris, Vrin, 1989.

Jocelyn BENOIST

→ Cartésianisme ; Criticisme ; Dédution ; Donné ; Evidence ; Husserl ; Induction ; Infini ; Kant ; Méthode ; Phénoménologie ; Statistique ; Transcendental.

ARCHIMÈDE, 287 av. J.-C. – v. 212 av. J.-C.

Sans doute un des rares scientifiques à avoir péri pour avoir mené ses recherches en temps de guerre, il est tué par un soldat romain entrant dans Syracuse après trois ans de siège.

Archimède possède essentiellement une formation d'ingénieur orientée vers une sorte de géométrie de la mesure, son père semble avoir été astronome et il est parent de Hiéron, un soldat qui devint un tyran après son éléction.

Le Syracusain est le fondateur de la statique. *Le Traité des corps flottants* est sans doute marqué par des expériences élémentaires de plongée, lesté d'un moins le plongeur atteint le fond. Il commence par énoncer : « Nous poserons en principe que la nature d'un fluide est telle que, ses parties étant uniformément disposées (de même niveau) et continue celle qui est moins comprimée est déplacée par celle qui l'est davantage, et que chacune est comprimée suivant la verticale par le fluide placée au-dessous. » En extrapolant à une expérience de pensée, il énonce que « le solide de même poids qu'un fluide dans lequel on l'abandonne ne sera pas immergé entièrement mais une partie sera à l'extérieur de la surface. Le volume de fluide égal à celui de la partie immergée aura le même poids que le

solide ». Il établit enfin une des propositions les plus célèbres de l'histoire des sciences : « Les solides moins pesants qu'un fluide qui y sont introduits sont renvoyés vers le haut avec une force égale à celle du poids dont le volume du fluide, égal à celui du solide, excède le poids de ce dernier. » À son objectif de la recherche d'une position d'équilibre stable Archimède ajoute d'autres recherches.

Il s'occupa d'optique géométrique et sa *Catoptrique* dont la description du contenu nous est connue par l'architecte romain Vitruve (I^{er} s. av. J.-C.) est la première grande théorie géométrique des miroirs.

Archimède est à l'origine de toute une pensée mathématique extrêmement féconde qui consiste à conjindre dans une même recherche la mécanique, la statique et la géométrie. D'abord dans l'*Équilibre des figures planes* où il traite des centres de gravité des plans (les barycentres) il peut du fait que tout corps pesant a un centre de gravité bien défini en lequel le poids du corps peut être considéré comme concentré. Il y formule en usant des conditions d'Eudoxe-Euclide la célèbre loi du levier : des grandeurs sont en équilibre si les distances à leur point de support sont inversement proportionnelles à leurs poids. Une grande partie de ses travaux consiste en la détermination du centre de gravité des corps homogènes géométriquement définissables. Mais il se pose du même coup le problème de calculs d'aires en termes de pesées. Considérons une section du cône droit, celle qui donne la parabole. Il considère par exemple que la distance à laquelle se trouve le segment vertical qui donnerait l'ordonné d'un point de la parabole équilibre celle à laquelle se trouve un segment horizontal qui donne l'abscisse de ce point. La recherche de l'aire de la parabole équivaut à la recherche du centre de gravité du triangle : toute section de parabole vaut les quatre tiers du triangle de même base et de même hauteur « et toute sphère est quadruple du cône ayant la base égale au grand cercle de la sphère et la hauteur égale au rayon de la sphère ». Archimède « pèse » de la même façon dans les *Sphéroïdes* les ellipses de révolution, ainsi que leurs secteurs et ceux de la sphère ; dans les *Conoïdes* droits il fait de même avec les paraboloides de révolution, les conoïdes obtus, hyperboloides de révolution à deux nappes. Il détermine tous les centres de gravité de ces figures, parallélogramme, triangle, trapèze, segments de paraboles, cercle cylindre, prisme, cône, secteur de paraboloides, hémisphère, secteur de sphère, de sphéroïde, d'hyperboloïde. « Ayant observé que toute sphère vaut quatre cônes ayant pour base son grand cercle et pour hauteur son rayon, il m'est venu l'idée que la surface de toute sphère vaut quatre grands cercles de la sphère. En effet, j'ai supposé que, de même que toute aire de cercle est égale à celle d'un triangle ayant pour base la circonférence et pour hauteur le rayon, ainsi toute aire de sphère est égale à celle d'un cône ayant pour base la surface de la sphère et pour hauteur le rayon. » L'aire du cercle est calculée par sa fameuse méthode d'exhaustion par encadrement à l'aide de sommes d'aires de polygones.

Dans son *Traité sur la quadrature de la parabole*, il fait le calcul comme une pesée donnant une épaisseur aux filets rectilignes dont il affirme que leur ensemble constitue les secteurs de parabole. Il traite ainsi de trapèzes inscrits dans et circonscrits au secteur à calculer qui est encadré de sommes de trapèzes élémentaires connues dont la différence peut être rendue aussi petite qu'on veut. Il prouve dans ce travail le lemme célèbre qui autorise cette procédure. « De deux grandeurs données inégales droites, surfaces ou volumes l'excès de la plus grande sur la plus petite ajoutée lui-même un nombre suffisant de fois peut surpasser toute grandeur donnée du genre des grandeurs comparées. » Le calcul est fondé sur la progression d'une sommation de raison un quart.

Il calcule l'aire de la première spire de sa spirale dite spirale d'Archimède, de la même façon, par la méthode des sommes supérieures et inférieures il calcule des aires de segment de parabole. De façon générale Archimède résout des problèmes difficiles de détermination de longueur d'arc et d'aires de surfaces courbes. Dans l'ouvrage *Sur la sphère et le cylindre* il pose une série de postulats qui font la base de la théorie des calculs d'aires, en particulier il calcule l'aire de la sphère et d'un morceau de sphère. Il énonce le lemme célèbre ci-dessus. Ce lemme est rappelé et utilisé dans les calculs de plusieurs de ses œuvres. Toujours usant de ses méthodes mécaniques en termes d'équilibre de balance il donne le volume de la sphère : 4 tiers de πR au cube.

Dans la *Lettre à Eratosthène* dont le manuscrit a été retrouvé en 1906 il écrit : « Tout ce que j'ai examiné précédemment à l'aide de la mécanique, se trouve ensuite démontré par la géométrie. » Reste que cette méthode ne s'applique pas à la détermination de demi-surface ou de longueurs d'arc. Il use dans la *Mesure du cercle*, de la méthode dite méthode d'exhaustion : il montre que l'aire du cercle est égale à l'aire d'un triangle rectangle dont un côté de l'angle droit est égal au rayon et l'autre la circonférence. Il propose de plus une détermination du rapport entre la circonférence et le diamètre qui est le fameux nombre π . Il calcule les périmètres des polygones à n côtés, inscrits et exinscrits, pour $n = 3.2^2, 3.2^3, 3.2^6$. Il réussit à trouver grâce à la méthode d'encadrement par des rapports de périmètres de polygones et du diamètre un encadrement de π par les rapports 22 septièmes et 223 soixante et onzièmes. Par ailleurs dans une démonstration où il considère des triangles semblables les uns très petits dont les côtés sont des arcs de courbe, les autres droits il montre que la sous-tangente de la spirale peut servir à rectifier une circonférence. Il montre également que le rapport d'accroissement du rayon du cercle sur celui de la longueur d'arc est égal à la tangente quand l'accroissement d'angle tend vers zéro. À ses méthodes différentielles il convient de joindre sa détermination d'*extrema*. Il détermine de plus les conditions d'existence des racines positives des polynômes du troisième degré qu'il ramène à la détermination des points d'intersection de deux courbes, et montre que la

condition d'*extremum* revient à celle de l'existence de point de tangence de deux courbes. La méthode est extrêmement générale. Elle fut reprise et développée au XVII^e s. par les mathématiciens italiens Toricelli et Ricci. Archimède dans *L'Arénaire* inventa une méthode permettant d'exprimer des nombres arbitrairement grands à l'aide d'un système spécial de notation des rangs de dizaines : les nombres pour les miriades de miriades sont nommés primitifs, $10^4.10^4, 10^8$ est pris comme unité des seconds nombres jusqu'à $10^{8 \times 2 - 1}$, etc. $10^{8 \times 2}$ est l'unité des troisièmes nombres... La construction va jusqu'aux nombres miriade-miriadiques de $10^{8(10^8 - 1)}$ jusqu'à $10^{10(10^9)}$. Tous ces nombres forment le premier domaine. Mais on peut continuer. S'opposant à ceux qui disaient que le nombre de grains de sable sur la Terre est infini ou que l'on ne peut le compter Archimède montre que le nombre de grains de sable avec lesquels on peut remplir la sphère atteignant les étoiles fixes ne dépasse pas mille miriades d'unités des huitièmes nombres du premier domaine. Il admit que le diamètre d'une telle sphère dépasse le diamètre de la terre moins que 10 000 fois. Il établit ainsi que du grain de sable à la totalité de cette sphère, l'ensemble des éléments du monde physique est comme on dit archimédien, il existe un nombre par lequel nous pouvons multiplier la grandeur du grain de sable pour lui faire surpasser celle de la sphère des fixes, si grande fut-elle supposée. Nombre d'œuvres d'Archimède se conservèrent seulement à travers les versions arabes du savant du IX^e s., de Bagdad, Thabit ibn Qurra. L'historien arabe ibn al-Kifti au XII^e s. mentionne une tentative d'Archimède de démonstration du V^e postulat d'Euclide. Les recherches d'Archimède ne trouvèrent pas de continuateurs dans l'Antiquité, mais l'histoire redécouvrit deux fois ses travaux : d'abord l'Orient arabe avec Thabit ibn Qurra et son école et ibn al-Haitham, et le XVII^e s. européen qui approfondit son œuvre dans tous les secteurs qu'il avait initiés. Ajoutons enfin que la théorie de l'intégration qui atteint sa perfection avec le grand mathématicien allemand Bernhard Riemann se situe elle aussi dans cette tradition archimédienne.

● Archimède, *Œuvres complètes*, suivies des *Commentaires d'Eutocius d'Ascalon*, éd. et trad. P. Ver Eecke, 2 vol., Paris, A. Blanchard, 1960 ; Archimède, *Opera omnia*, edited by J. L. Heiberg éd., 3 vol., Leipzig, 1910, 1913, 1915, rééd. Stuttgart, Teubner, 1972.

► BELL E. T., *Men of Mathematics* (1937), rééd. New York, Touchstone Book, 1986. – BERNHARD H., *Archimedes*, in H. Wussing and W. Arnold, *Biographien bedeutender Mathematiker*, Berlin, 1983. – CAJORI F., *A History of Mathematics* (1929), rééd. New York, Chelsea Pub Co, 5^e éd. rev., 1999. – DAUMAS M. et al., *Histoire des Sciences*, Paris, Gallimard, « La Pléiade », 1957. – DEDRON P. & J., *Mathématiques mathématiciens*, Paris, Magnard, 1959. – DIJKSTERHUIS E. J., *Archimedes* (1956), rééd. anglaise, Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, 1987. – *Historia matematyki*, sous la direction de P. J. Juszkiewicz, éd. russe 1970, trad. polonaise de S. Dobrzycki, Varsovie, 1975. – HEATH T. L., *A History of Greek Mathematics, II*, 1931, rééd. New York, Dover

Publications, 1981. — TATON R. (dir.), *Histoire générale des Sciences (1957-1964)*, 4 vol., rééd. Paris, PUF/Quadrige, 1994. — VAN DER WAERDEN B. J., *Science Awakening (1954)*, rééd. Oxford, Oxford Univ. Press, 1985.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Méthodes infinitésimales.

ARISTOTE, 384-322 av. J.-C.

Aristote est né à Stagire qu'il quitte pour Athènes en 367 afin de suivre les enseignements dispensés à l'Académie de Platon dirigée pour un temps par Eudoxe de Cnide. Il resta très proche de celui-ci pour les travaux en astronomie. Élève de Platon qui lui donna comme surnom « le liseur », Aristote fut aussi précepteur d'Alexandre le Grand (343-340). Fondateur du Lycée à Athènes, il y dispensa un enseignement exotérique (rhétorique) et ésotérique (métaphysique, physique, dialectique). Si la rhétorique était développée du temps d'Aristote, ce n'était pas le cas de la science de l'inférence et du raisonnement : la logique. On lui doit la première formalisation du syllogisme et de l'induction. Les distinctions entre forme et matière, acte et puissance, cause finale et cause efficiente, constituent un schéma catégorial à travers lequel s'articulent et se disent toutes les réalités : l'intellect, mais aussi les êtres vivants, les constitutions politiques mais aussi les raisonnements logiques comprennent les catégories de ce schéma et se comprennent à travers elles. Le géocentrisme (astronomie), la reconnaissance d'un cosmos fini, orienté et ordonné par une intelligence suprême (physique-cosmologie), la chaîne hiérarchisée des êtres (biologie) couplée à une théorie fixiste du vivant, l'existence de premiers principes indémontrables, la construction des raisonnements en syllogismes (logique) et la décomposition d'une proposition en nom et verbe, sont les thèses principales avancées par Aristote dans le domaine des sciences.

● *Métaphysique*, trad. fr., Paris, Vrin, 1964. — *Physique*, trad. fr., Paris, Les Belles Lettres, 1926 et 1931. — *Organon (Logique)*, trad. fr., Paris, Vrin, 1969-1974 (*Catégories*, *De l'interprétation*, *Premiers analytiques*, *Seconds analytiques*, *Topiques*, *Réfutations sophistiques*). — *Histoire des animaux*, trad. fr., Paris, Les Belles Lettres, 1965. — *Rhétorique*, trad. fr., Paris, Les Belles Lettres, 1967 et 1973. — *Poétique*, trad. fr., Paris, Les Belles Lettres, 1932.

► BOURGEY L., *Observation et expérience chez Aristote*, Paris, Vrin, 1955. — GRANGER G.-G., *La théorie aristotélicienne de la science*, Paris, Aubier-Montaigne, 1976. — LE BLOND J.-M., *Logique et méthode chez Aristote*, Paris, Vrin, 1939. — LOUIS P., *La découverte de la vie. Aristote*, Paris, Hermann, 1975. — MANSION A., *Introduction à la physique aristotélicienne*, Louvain, Éd. de l'Institut supérieur de philosophie, 2^e éd., 1945. — PELLEGRIN P., *La classification des animaux chez Aristote. Statut de la biologie et unité de l'aristotélisme*, Paris, Les Belles Lettres, 1983 ; (dir.), *Biologie, logique et métaphysique chez Aristote*, Paris, CNRS, 1991.

Ali BENMAKHOULOU

→ Abstraction ; Analogie ; Aristotélisme ; Atome ; Axiomatization et formalisation ; Catégories et foncteurs ; Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Concept ; Déduction ; Démonstration ; Dialectique ; Élément ; Espèce ; Expérience ; Force ; Forme ; Génération spontanée ; Géocentrisme ; Géométrie ; Gravitation ; Hasard ; Héliocentrisme ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Infini ; Infini mathématique ; Loi de la nature ; Méthode ; Mouvement ; Nature (Système de la) ; Nécessité ; Origines de la vie ; Phénomène ; Proposition ; Technique ; Terre ; Vérité ; Vision.

ARISTOTÉLISME → Abstraction ; Causalité (Principe de) ; Mouvement ; Proposition

► DUHEM P., *Le système du monde*, t. 1, Paris, 1913. — JOLIVET J., *Philosophie médiévale arabe et latine*, Paris, Vrin, 1995. — MARENDON J., *Later medieval philosophy*, Routledge, 1987. — MARTIN J.-C., *L'âme du monde. Disponibilité d'Aristote*, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1998. — MUNK S., *Mélanges de philosophie juive et arabe (1857)*, rééd., Paris, Vrin, 1988. — RESCHER N., *Temporal modalities in Arabic Logic*, Dordrecht, 1967. — SCHMITT Ch.B., *Aristote et la Renaissance*, Paris, PUF « Épiméthée », 1992. — SINACEUR M.A. dir., *Aristote aujourd'hui*, Toulouse, Érès, 1988 ; *Penser avec Aristote*, Toulouse, Érès, 1991.

ARRHENIUS Svante, 1859-1927

Svante Arrhenius naît à Vik, près d'Uppsala (Suède) en 1859. Il grandit à Uppsala où son père est administrateur des biens de l'Université. Après avoir été immatriculé à l'université d'Uppsala en 1876, il obtient sa licence des sciences en 1878. Sa thèse de doctorat (1885) porte sur la conductibilité galvanique des électrolytes. Quand le jury refuse de lui accorder le titre de *Privatdozent* à l'Université il part pour l'étranger. De 1886 à 1891 il sillonne les laboratoires de physique et chimie du continent européen, notamment ceux de Wilhelm Ostwald (Leipzig), J. H. van't Hoff (Amsterdam) et Ludwig Boltzmann (Graz). En 1891 il est nommé professeur de physique au Höögskola (Université libre) de Stockholm. En 1905 l'Académie royale des sciences suédoise crée l'Institut Nobel de physico-chimie dont il demeure le directeur jusqu'à sa mort en 1927.

Arrhenius est connu surtout pour sa théorie de la dissociation électrolytique (selon laquelle dans des solutions très diluées les électrolytes sont dissociés en « ions ») qu'il formule en 1887. Cette théorie devient le fondement de la nouvelle physico-chimie de l'école des Ionistes autour de Wilhelm Ostwald et la revue *Zeitschrift für physikalische Chemie*. Plus tard Arrhenius fait une première estimation de l'effet de serre (1895) et lance des théories innovatrices d'immuno-chimie. Lauréat du prix Nobel de chimie (1903) et membre du Comité Nobel de physique (1901-1927), Arrhenius a eu une influence déterminante sur la création de l'Institut Nobel.

● « Les oscillations séculaires de la température », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 10, 1899,

p. 337-342. — « Recherches sur la conductibilité galvanique des électrolytes », *Bihang*, n° 13 et 14, 1884.

► CRAWFORD E., *Arrhenius : From Ionic Theory to the Greenhouse Effect*, Canton (MA), Science History Publ., 1996.

Élisabeth CRAWFORD

→ Acide et base ; Chimie physique ; Electrochimie ; Sel.

ATOME

PHYSIQUE / CHIMIE

Ce concept plus que deux fois millénaire semble défier le temps. Serait-il le signe d'une permanence par-delà les changements dans les sciences de la nature ?

Première évidence : les atomes d'aujourd'hui ne sont plus tels que les avaient imaginés les premiers *phusikoi*. Démocrite d'Abdère au V^e s. av. J.-C. les présentait comme de petites unités de matière insécables (*a-tomos*) éternelles, pleines, solides. Les physiciens d'aujourd'hui décrivent des atomes pleins de vide, divisibles, transmutables, éphémères ; ils fissionnent et fusionnent les noyaux de ces atomes que les Anciens supposaient inaccessibles au changement.

Faut-il pour autant conclure que le concept antique « embrumé dans la métaphysique » a été corrigé, perfectionné, complexifié, au fil des conquêtes de la science expérimentale, positive ? De l'atome, petite boule infiniment dure qui expliquait le monde, à l'atome moderne qui constitue un monde à explorer, on décrit volontiers la marche triomphale de l'esprit humain pénétrant toujours plus avant les secrets de la matière. Cette vision linéaire de l'histoire est à la fois simplifiante et mystifiante.

Elle méconnaît premièrement le statut linguistique d'un concept. Le terme d'atome forgé dans la langue et la culture grecques antiques est-il exactement traduisible dans nos langues modernes ? Un concept qui a pris sens dans un « jeu de langage » bien caractérisé, qui fut pensé, élaboré dans la structure d'un poème a-t-il quelque chose en commun avec l'atome pensé dans le langage spécialisé, abstrait, mathématisé des traités de physique du XX^e s. ? La présence du mot atome dans des textes de genre littéraire aussi profondément différents autorise-t-elle à supposer l'unité ou la continuité d'une pensée ? Elle méconnaît pareillement les fonctions épistémiques du concept. L'atome fut inventé jadis sur les rivages de la Méditerranée en réponse à des questions sur le commencement et la fin du cosmos, sur l'unité et la diversité des êtres matériels, la permanence et le changement. Même s'ils entrent parfois en résonance avec ces grandes questions fondamentales, les problèmes que traitent les atomistes contemporains sont d'une autre nature, d'un autre ordre. Le concept d'atome ne prend sens que dans un contexte théorique, culturel et même instrumental. Étant donné l'hétérogénéité du milieu d'origine et des milieux d'utilisation contemporains, il paraît sinon impossible du moins artificiel de prétendre suivre une

évolution au fil des âges. L'atome apparaît comme une entité conceptuelle sans identité historique ou plutôt aux multiples identités. Enfin l'histoire linéaire neutralise la puissance du concept d'atome en occultant les multiples débats et controverses qu'il a déclenchés à diverses époques. Oser penser, décrire, exploiter un objet qui pendant des siècles est resté au-delà de la portée de nos moyens de connaissances, tel fut le défi des atomistes. Si l'on veut à tout prix définir une nature transhistorique du concept d'atome, c'est la polémique qui constituerait son caractère le plus stable. Sans retracer ici tous les débats auxquels l'atome a donné lieu, on évoquera quelques épisodes propres à faire sentir qu'un tel concept s'inscrit non seulement dans les sciences de la matière mais aussi dans la philosophie et l'ensemble d'une culture.

L'atome sans qualités

« Rien ne naît de rien, rien ne retourne au néant », ce principe de conservation est le postulat fondamental de la physique grecque depuis Parménide. Dans l'atomisme, d'abord développé par Leucippe, contemporain de Zénon d'Élée, puis par Démocrite d'Abdère, contemporain de Socrate, le monde s'explique par recours à des êtres sans qualités sensibles que seul l'intellect peut appréhender (les atomes) et à du vide. Cette doctrine est dans une certaine mesure rivale d'une autre physique — développée à la même époque en Italie par Empédocle d'Agrigente — supposant quatre éléments — la terre, l'air, l'eau et le feu — et deux principes qui les unissent ou les désunissent, l'amour et la haine. Ces deux théories cherchent à expliquer la nature dans son ensemble, c'est-à-dire sa genèse (*natura* et *phusis* signifient « engendrés »), l'ordre qui la régit, les changements et la diversité qu'elle présente.

De l'atomisme abdéritain on sait surtout ce qu'en disent Aristote et ses commentateurs. Que des atomes en mouvement, en nombre illimité, par leurs chocs et rencontres forment des agrégats différenciés selon la figure, l'ordre et la position des atomes, comme les mots sont composés de lettres. Que le monde — le ciel, la terre, les eaux, les animaux, les sociétés... — se sont formés exclusivement à partir de ces agrégats sans causes finales.

L'atomisme nous est parvenu à travers sa réélaboration dans la période hellénistique par Épiciure (342-270 av. J.-C.). Il a transformé la doctrine plutôt idéaliste de Démocrite (ses atomes étaient des êtres intelligibles sans prise sur le sensible qui relevait de l'opinion plus que de la science) en une physique matérialiste qui fonde tout sur la sensation. Celle-ci n'étant connue que grâce à un seul texte, la « Lettre à Hérodoté sur la physique » sera ici présentée à l'aide d'un exposé plus détaillé, rédigé au I^{er} s. avant J.-C. par Lucrèce (98-55 av. J.-C.), disciple romain d'Épiciure, sous forme d'un poème dont le titre, *De rerum natura*, répond au *Peri Phusiké* rédigé quelques siècles auparavant par l'autre physicien-poète, Empédocle d'Agrigente.

Le poème de Lucrèce, divisé en six chants, présente l'atomisme de manière déductive. Des atomes et du vide, ces deux principes posés au chant I suffisent pour expliquer tout ce qui est. Le chant II définit les propriétés des atomes : leurs mouvements, leur figure et leur fonction : d'où se déduisent une théorie de l'âme (chant III), une théorie de la perception et des idées (IV), une cosmogonie, une histoire de la terre, des êtres vivants et des sociétés humaines (V) et enfin une interprétation des météores et des maladies contagieuses (VI). Tous ces phénomènes se produisent sans l'intervention des dieux par des causes naturelles et nécessaires selon les figures, positions, chocs et rencontres des atomes. Tout est formé de petits corps mus et figurés, de même matière, simplement différenciés par leur taille et leur forme. Le vide immense alentour est posé comme la condition de leur mouvement.

Tel est le monde des atomistes, un monde sans dieux, lumineux, transparent pour l'intellect. Seulement pour le former, pour expliquer le passage du chaos initial d'atomes dispersés au cosmos ordonné en agrégats, Épicure et Lucrèce admettent une petite indétermination, un élément irrationnel à première vue, imprévisible en tout cas. Alors que Démocrite expliquait la formation des agrégats par une causalité mécanique répondant en gros au principe « qui se ressemble s'assemble », Épicure, caractérisant les atomes par leur pesanteur, les suppose en chute libre dans le vide immense de l'univers et explique leur assemblage par un événement fortuit qui se produit « en un lieu et en un temps indéterminé », une déviation (clinamen), très légère, minimale. Cette thèse n'apparaissant pas dans les textes conservés d'Épicure nous est connue par Lucrèce. « Il faut que les atomes s'écartent un peu de la verticale ; mais à peine et le moins possible, que nous n'ayons pas l'air d'imaginer des mouvements obliques ; ce que réfuterait la réalité. Car c'est une chose visible, manifeste, évidente, que les corps pesants ne peuvent d'eux-mêmes prendre une direction oblique en tombant, pour autant que nous puissions le discerner. Mais qu'ils ne dévient absolument pas de la verticale, qui donc pourrait s'en apercevoir » (chant II, v. 242-250). Lucrèce, à la suite d'Épicure, rapporte donc le mouvement des atomes non seulement à la pesanteur et aux chocs mais à « une autre cause motrice, d'où provient en nous le pouvoir de la volonté, laquelle nous le voyons, de rien, rien ne peut naître ».

Ce savoir de la nature des choses, purement matérialiste, était destiné à fonder une sagesse. À l'abri des angoisses de l'au-delà, des tourments de la superstition, le sage devait atteindre la paix de l'âme (ataraxie). Mais les atomistes ne furent jamais en paix. Sans cesse dénigrés, attaqués par leurs rivaux, ils ont aiguisé les armes de la controverse intellectuelle.

Le point le plus contesté de l'atomisme épicurien est ce fameux clinamen. De Cicéron jusqu'à Marx, Bergson et Bachelard, les commentateurs y voient un scandale qui discrédite l'ensemble de la doctrine : une incohérence logique, une impossibilité physique et une contradiction métaphysique avec la thèse d'une

nécessité. Remplacer les dieux par le hasard ! Suggérer une sorte de libre-arbitre des atomes ou du moins chercher dans les atomes le fondement de la liberté humaine, c'est le règne de l'arbitraire ! D'ailleurs cette improbable déclinaison ne semble-t-elle pas gêner Lucrèce qui fait tout pour la minimiser ?

C'est pourtant ce caractère minimal qui permet de redonner cohérence à l'atomisme si l'on se donne la peine de réinterpréter ce passage de Lucrèce par rapport aux connaissances physiques et mathématiques de l'époque comme l'a proposé Michel Serres. L'angle de déclinaison est le plus petit possible comme l'angle de contingence entre une courbe avec sa tangente, défini par Archimède. Ce qui paraissait une incohérence logique et une impossibilité physique par référence à la mécanique des solides peut s'expliquer dans le droit fil des métaphores liquides qui abondent dans le poème, en termes de mécanique des fluides. Le flux laminaire est un écoulement idéal, un être de raison, qui jamais n'advient à l'existence. Dans le réel n'existent que des flux avec des tourbillons qui se produisent en des lieux et en des temps incertains. Ainsi l'ordre du monde atomiste se définirait comme une singularité d'origine aléatoire.

Par-delà les critiques déchaînées contre le clinamen, l'atomisme antique a constamment servi de cible ou référence critique pour définir d'autres styles de physique. Aristote, développant une physique avec quatre éléments sur la base de la théorie héritée d'Empédocle, présente la doctrine de Leucippe et Démocrite comme une doctrine à deux éléments – le plein et le vide – incapable de rendre compte de l'origine du mouvement des atomes (*Métaphysique*, A 4, 985b4). Il leur oppose une physique dans laquelle le mouvement comme le repos sont impossibles dans le vide et qui accorde un rôle majeur aux causes finales (*Physique* II, 3 et IV 8). Aristote rapproche l'atomisme du pythagorisme car admettre des grandeurs primordiales en quantité illimitée et indivisibles en grandeur revient à faire de toutes choses des nombres (*Traité du Ciel*, III, 4,303 a 4). De son côté, Lucrèce ridiculise toutes les doctrines à un ou quatre éléments car il juge impossible que des éléments, déjà investis de qualités, puissent former des corps présentant d'autres qualités. Ainsi s'affrontent deux explications de la nature : l'une, postulant des unités minimales, discrètes, de matière homogène, réduisant les qualités sensibles aux figures et mouvements de ces atomes, oriente vers une physique géométrique et strictement mécaniste ; l'autre, supposant la matière hétérogène, continue, bien différenciée, oriente vers une physique qualitative, vers une science du mixte et non des agrégats, vers une tradition chimique qui longtemps encore rivalisera avec le mécanisme.

Car les philosophes du XVII^e s. trouvent dans l'atomisme antique d'immenses ressources conceptuelles, d'une part, pour destituer la physique qualitative d'Aristote, d'autre part pour fonder une interprétation mécaniste et mathématique de l'ensemble de la nature, depuis la course des astres jusqu'aux couleurs et aux

odeurs. Malgré de bruyantes querelles entre Descartes et Gassendi par exemple, sur l'existence du vide et des atomes, globalement le mécanisme du XVII^e s. favorise un retour à l'atomisme. Jusque dans les laboratoires de chimie, on explique les réactions entre acides et bases en termes de petits corps mus et figurés, pointus et crochus.

Les poids atomiques

En 1803, un professeur de Manchester, John Dalton (1766-1844), s'étonne que les chimistes si soucieux de peser les corps simples et composés n'aient pas eu l'idée d'induire de la proportion des composants dans un composé le poids relatif de leurs particules ultimes, ou atomes. Au lieu d'exposer la constitution des corps en parties (deux parties d'hydrogène pour une d'oxygène, par exemple) ou en proportions centésimales, ils pourraient dresser des tables de poids atomiques pour toutes les substances identifiées, puis les comparer et les classer.

Voici les atomes au pays de la chimie. Que recouvre ce concept ? Un corpuscule, certes, car la conception newtonienne de corpuscules qui s'attirent et se repoussent reste sous-jacente. Mais l'atome de Dalton n'est défini ni par sa taille ni par son mouvement, il est caractérisé exclusivement par son poids. Impossible de peser directement les atomes ! On peut cependant déterminer leur poids relatif grâce aux proportions stoechiométriques des composés chimiques. Le mot stoechiométrie (mesure des éléments) fut introduit, en 1792, par un chimiste allemand, Benjamin Jeremias Richter. Après avoir découvert que dans la formation des sels un poids déterminé d'acide s'unit toujours à un poids déterminé de base, il a dressé une table d'« équivalents » pondéraux d'acides et de bases, jetant ainsi les bases d'une chimie mathématique, science des proportions. En 1802 la notion de proportions fixes et définies a été appliquée par Joseph-Louis Proust à tous les composés chimiques et renforcée par la notion de proportions multiples introduite par Dalton : si deux éléments se combinent pour former deux ou plusieurs composés, les proportions de chaque élément sont toujours des multiples entiers.

L'atome dont on parle vers 1810 est donc issu d'un contexte fort éloigné de l'atome antique. De ce lointain ancêtre que reste-t-il dans le nouvel atomisme ? La nature d'hypothèse car l'atome reste supposé, l'idée d'unité discrète car les combinaisons chimiques se font en quantités discontinues et d'unité minimale. Mais l'analogie s'arrête là car l'atome daltonien ne répond pas à une question sur la composition de la matière. Il désigne le poids minimal d'une substance qui entre en combinaison chimique, déterminé d'après les proportions du composé. C'est pourquoi les manuels de chimie racontent parfois que Dalton a transformé l'« intuition » atomiste antique et métaphysique en un concept scientifique reposant sur des bases solides, expérimentales. Vague réminiscence positiviste doublement fautive : elle oublie la tradition newtonienne et

ignore le caractère fortement conjectural de l'atomisme chimique du XIX^e s., sujet de longues controverses.

Dalton admet que les combinaisons chimiques se font atome par atome et que les atomes de chaque élément sont identiques. Il assigne à chaque élément un nombre, son poids atomique relatif, déterminé d'après les équivalents de combinaison en prenant comme unité de référence, purement conventionnelle, 1 pour l'hydrogène. Dalton admet que dans une combinaison chimique un atome d'un corps A s'unit à un atome d'un corps B pour former le corps AB, ou AB₂, et fait l'hypothèse que dans le cas où deux corps forment plusieurs combinaisons, tout se passe de la manière « la plus simple » : le composé est binaire quand il y en a un seul ; un binaire et un ternaire quand il y en a deux...

Dalton expose ses vues dans *New System of Chemical Philosophy* (1808-1810). En 1809, Gay-Lussac introduit l'idée de proportions fixes et multiples dans les volumes gazeux. Dès 1811, opérant la liaison entre Dalton et Gay-Lussac, Amedeo Avogadro – et indépendamment Ampère – déduisent l'hypothèse que dans les mêmes conditions des mêmes volumes de tous les gaz contiennent le même nombre de molécules. Ceci permet aussitôt à Avogadro de déterminer d'après leur densité gazeuse les poids atomiques de plusieurs corps mais l'oblige à introduire une deuxième hypothèse : qu'au moment d'entrer en combinaison les « molécules intégrantes » se partagent en deux ou plusieurs « molécules élémentaires ». À travers la terminologie de l'époque, on reconnaît la distinction moderne entre molécule et atome.

Ainsi, en quelques années à peine, les chimistes ont forgé des outils conceptuels très performants. L'avenir de l'atome chimique paraît radieux. Malgré les réticences provoquées par les « règles de simplicité » de Dalton, jugées si arbitraires que certains chimistes préférèrent continuer à parler de « poids proportionnels » ou « équivalents », la notion de poids atomique intéresse tous les chimistes car elle permet de caractériser les nouveaux corps simples découverts en nombre grâce au pouvoir analytique de la pile de Volta. Les moyens dont disposent les chimistes pour déterminer ces poids atomiques se multiplient grâce à de nouvelles lois. Et tous de rivaliser d'habileté et de patience pour déterminer avec la plus grande précision possible ces précieux poids atomiques.

Tout en ouvrant aux chimistes un programme d'investigation, le poids atomique suscite quelques controverses. L'une, rampante à travers le siècle, sur le nombre des éléments chimiques – un ou multiple ? –, repose sur une coïncidence. Dalton a décidé arbitrairement d'assigner 1 comme poids à l'hydrogène. Or ce choix vient conforter l'hypothèse avancée quelque temps auparavant par William Prout : que les corps simples multiples et sans cesse plus nombreux dérivent d'un seul élément originaire, l'hydrogène. Tous les poids atomiques qui sont des nombres entiers jouissent des partisans de Prout, tandis que les adversaires s'efforcent d'ajouter des décimales. Mais globalement cette hypothèse a plutôt encouragé la

détermination des poids atomiques comme la classification des éléments.

Atome et molécule

En revanche la controverse entre les atomistes et les équivalentistes, qui culmine dans les années 1850, brise durablement l'essor de l'atomisme chimique, surtout en France. Bien que l'expression « poids équivalent » ait été utilisée très vite pour marquer une distance à l'égard de Dalton, elle ne constituait pas vraiment une alternative. En 1814, Wollaston établit une table d'équivalents sur la base $O = 100$ mais une opération arithmétique simple permettait de passer d'un système dans l'autre. L'enjeu du conflit est moins l'atome que la distinction entre atome et molécule. Introduite en 1811, la loi d'Avogadro ne sera vraiment acceptée qu'en 1860 et encore quelques chimistes, Marcellin Berthelot, par exemple, continuent de s'y opposer. Comment comprendre un tel refus, et ce retard de 50 ans ? Les chimistes étaient-ils aveugles, incompetents ?

On rapporte volontiers cette longue résistance au positivisme du XIX^e s., dont l'influence particulièrement forte en France expliquerait que ce fût le dernier bastion anti-atomiste. En désignant « une philosophie ambiante » comme obstacle à l'avancement de la science, on entretient souvent une vision simpliste de la démarche scientifique qui méconnaît le contexte théorique et expérimental dans lequel s'inscrit une loi. En ce cas précis, l'allégation positiviste est mise en échec. D'une part, ceux qui professaient ouvertement le positivisme – Auguste Comte, et ses successeurs – n'étaient pas foncièrement hostiles à l'atomisme ; d'autre part, en dépit de sa démarche purement conjecturale, l'hypothèse d'Avogadro a été très favorablement accueillie en France, en particulier par Jean-Baptiste Dumas qui a contribué à sa diffusion. C'est seulement après l'avoir utilisée pendant vingt ans pour déterminer des poids atomiques que Dumas se repent et invoque un principe positiviste pour justifier son recul en lançant en 1836 la trop fameuse déclaration : « Si j'en étais le maître j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience ; et jamais en chimie nous ne devons aller plus loin que l'expérience. » Pourquoi cette condamnation ? C'est la contradiction entre les valeurs de poids atomiques obtenues par les diverses lois dont disposent les chimistes qui a conduit Dumas à douter de la loi d'Avogadro et à se replier sur les poids équivalents. Pourquoi sacrifier cette loi plutôt que les autres ? D'une part, elle est limitée aux corps à l'état gazeux mais surtout elle suppose que dans les gaz simples deux atomes de même nature s'unissent pour former une molécule diatomique, ce qui est en contradiction avec la théorie alors régnante de Berzelius selon laquelle les combinaisons chimiques se font par union d'atomes de charge électrique opposée. Ainsi dans les années 1840, une grande partie des chimistes suit Dumas, rejette la loi d'Avogadro et se replie sur les poids équivalents.

Le développement de la chimie organique va conduire à remettre Avogadro et sa distinction à l'honneur. Charles Gerhardt constate, en 1842, que dans les réactions organiques on obtient toujours le double des poids équivalents et propose donc de doubler les poids atomiques du carbone, de l'oxygène et d'une vingtaine de métaux. Les poids équivalents et atomiques cessent donc d'être interchangeables. Dans la définition des termes, même ambiguïté. Auguste Laurent mobilise, dès 1836, une distinction entre atome et molécule, et suggère très nettement une représentation architecturale de la molécule. Dumas, de son côté, distingue l'atome des physiiciens (molécule) indivisible par les forces physiques et l'atome des chimistes, indivisible par les forces chimiques. Si bien qu'au début des années 1850 la communauté des chimistes est une tour de Babel. Aux désaccords sur les mots s'ajoutent les désaccords sur les valeurs numériques. Entre le système de Berzelius ($C = 12$, $O = 16$), le système français ($C = 3$, $O = 8$), et les équivalents de Wollaston et Gmelin ($C = 6$, $O = 8$) la confusion dans la notation est maximale. Et le désaccord retentit dans l'écriture des formules chimiques. Dans son *Lehrbuch der Organischen Chemie* (1859), August Kekulé présente 19 formules différentes de l'acide acétique.

C'est lui qui prend l'initiative de réunir des chimistes de tous les pays pour surmonter les divisions : ce congrès réuni à Karlsruhe, en septembre 1860, est l'un des premiers congrès scientifiques internationaux. Trois questions sont à l'ordre du jour : définir les termes, atome, molécule, équivalent ; décider d'une notation atomiste ou équivalentiste ; adopter une nomenclature uniforme. Ainsi se trouvent inextricablement mêlées une question d'interprétation de la nature et des questions d'écriture relevant de la convention. En fait, la notation et les formules furent le terrain de bataille entre les chimistes, l'existence des atomes et des molécules n'étant jamais directement abordée. Seules importent leurs définitions.

Bien que le Congrès ne tranche pas officiellement entre les deux camps, une majorité de chimistes adopte la notation atomiste de Gerhardt révisée par le chimiste italien Cannizzaro. En fait, la victoire des formules de Gerhardt était déjà presque assurée grâce à des confirmations expérimentales leur donnant raison contre les formules des équivalentistes, et l'idée d'une combinaison entre deux atomes de même nature au sein d'une molécule n'était plus scandaleuse. La théorie électrochimique ayant été évincée et Kekulé ayant établi l'existence d'une liaison carbone-carbone, la notion d'une molécule diatomique n'était plus un scandale. La notation atomiste fondée sur la loi d'Avogadro triomphe donc. En France, Charles Wurtz met tout en œuvre pour la répandre mais Berthelot s'oppose à ces formules jusqu'à sa mort, en 1906, et maintient les formules équivalentistes. En 1913, alors qu'on a déjà formé des modèles de l'atome, les étudiants français rédigent encore leurs copies de chimie en double notation équivalentiste et atomiste.

► BENSAUDE-VINCENT B. & KOUNELIS C. éd., *Les atomes. Une anthologie historique*, Paris, Pocket, 1991. – DUMONT J.-P., *Éléments d'histoire de la philosophie antique*, Paris, Nathan Univ., 1993. – LLOYD G.E., *Les débuts de la science grecque de Thalès à Aristote*, trad. fr. J. Brunschvicg, Paris, Maspero, 1974. – RICKE M., « The rejection of Avogadro's Hypothesis », in HOWSON C. éd., *Method and Appraisal in the Physical Sciences*, Cambridge Univ. Press, 1976. – ROCKE A.J., *Chemical Atomism in the Nineteenth Century. From Dalton to Cannizzaro*, Ohio State Univ. Press, 1984. – SERRES M., *La Naissance de la physique dans le texte de Lucrèce*, Paris, Minuit, 1977. – SOLOVINE M., *Démocrite. Doctrines philosophiques et réflexions morales traduites et précédées d'une introduction*, Paris, 1928. – WURTZ A., *La Théorie atomique*, Paris, G. Baillière, 1879.

Françoise BALIBAR et Bernadette BENSAUDE-VINCENT

→ Antimatière ; Avogadro (Loi d') ; Avogadro (Nombre d') ; Big bang ; Corps noir ; Correspondance (Principe de) ; Electrochimie ; Élément ; Élémentarité ; Équivalence (Principe d') ; Immatérialisme ; Indiscernabilité ; Masse ; Matière ; Matière [PHYSIQUE] ; Mole ; Molécule ; Réel ; Rutherford ; Sommerfeld ; Stéréochimie ; Valence.

ATOMISME LOGIQUE

C'est une thèse élaborée par B. Russell au début du XX^e s. et défendue par L. Wittgenstein à un moment qui correspond à l'écriture du *Tractatus logico-philosophicus* (1921). Selon cette thèse, il y a une correspondance stricte entre la structure linguistique et la structure du monde de même qu'il y a des réalités ultimes qu'on peut mettre au jour par une analyse des propositions. La complexité des propositions est un reflet de la complexité du monde. Il suffit donc de pouvoir rendre compte de la complexité propositionnelle, toujours à notre disposition, pour débrouiller l'analyse du monde.

L'atomisme logique est donc le nom donné par Russell à une philosophie qui croit en l'existence de faits ultimes, indépendants et qui ne sont au fond qu'une articulation d'une réalité ultime faite de particuliers, de propriétés (prédicats unaires) et de relations (prédicats n-aires) : « Les faits atomiques contiennent en plus des relations, les termes de la relation – un terme si c'est une relation monadique, deux si c'est une relation dyadique, etc. Je définis "les particuliers" comme ces "termes" qui font partie des faits atomiques » (*La philosophie de l'atomisme logique*, II, trad. fr. p. 358).

Le réalisme analytique

Dans *Our Knowledge of External World* ([OKEW], 1914), Russell considère que l'« atomisme logique » est une philosophie inspirée à la fois de l'examen critique des mathématiques et de l'empirisme classique de Locke, Berkeley, Hume ; ces derniers ont préfiguré ce type de philosophie en tenant les idées pour être des éléments aussi durs et séparés que des boules de billard. L'atomisme logique est une philosophie apparentée au « néoréalisme » qui « représente le même

progrès en philosophie que celui qui a été introduit par Galilée en physique » (p. 14). De façon critique, l'atomisme logique est un rejet de l'idéalisme et de « la vérité des systèmes vastes et ambitieux », l'idéalisme étant pour Russell cette doctrine fondée sur la « croyance à l'irréalité du monde sensible », et pour laquelle la multiplicité du sensible n'est qu'apparente.

De façon constructive, l'atomisme logique cherche à rendre compte des faits et à leur restituer toute la réalité et toute la diversité que le monisme idéaliste d'un Hegel met en danger. Pour ce faire, Russell emprunte à la logique mathématique, qui s'est développée avec G. Peano et G. Frege, son langage. La rupture avec la syllogistique d'Aristote et la construction d'un langage formulaire seront les acquis que cette nouvelle philosophie va mettre à profit.

C'est ainsi que Russell va distinguer – grâce à l'outil logico-mathématique fourni par la langue idéographique de Frege et le formulaire de Peano – entre les propositions générales et les propositions particulières. « La logique traditionnelle considérait les deux propositions "Socrate est un homme" et "tous les hommes sont mortels" comme des propositions de même forme » (OKEW, p. 51). Or la logique moderne de Frege permet de les différencier quant à leur forme. Ce sont, dans le langage de Russell, deux propositions qui correspondent l'une à un fait particulier et atomique, l'autre à un fait général. La logique frégeenne s'est également libérée du primat de la forme sujet-prédicat qui est une forme de jugement déficiente : « La croyance ou la conviction inconsciente qu'il n'y a pour toute proposition que la forme sujet-prédicat, en d'autres termes que tout fait consiste en la possession d'une qualité par une chose, a rendu la plupart des philosophes incapables de justifier d'autres façons la science ou la vie quotidienne » (OKEW, p. 55).

Dans un article de 1924, intitulé *Logical Atomism* (in Marsh, *Bertrand Russell, Logic and Knowledge Essays 1901-1950*, 1956, New York, p. 323-343), Russell défend la philosophie de l'atomisme logique et tient à la distinguer du réalisme avec lequel on la confond souvent. L'atomisme logique nous dit que nous sommes en contact avec les données sensibles (*sense-data*), non avec les objets physiques ; c'est en cela qu'il se distingue du réalisme naïf qui, selon Russell, confond les deux. Russell maintient contre cette doctrine que le monde des sens est donné alors que le monde physique est inféré. L'argument contre le réalisme naïf est donné clairement en 1940, dans *Inquiry into Meaning and Truth* (trad. fr., p. 23-24) ; Russell note alors que : « Nous partons tous du "réalisme naïf", c'est-à-dire de la doctrine selon laquelle les choses sont ce qu'elles paraissent être. Nous pensons que l'herbe est verte, que les pierres sont dures, et que la neige est froide. Mais la physique nous assure que la verdure de l'herbe, la dureté des pierres et la froideur de la neige ne sont pas la verdure, dureté et froideur que nous connaissons par notre expérience, mais quelque chose de très différent. [...] Le réalisme naïf conduit à la physique et la physique, si elle est vraie, montre que le réalisme naïf est

faux. Par conséquent, le réalisme naïf, s'il est vrai est faux, par conséquent, il est faux.»

Si Russell n'admet pas le réalisme naïf, il accepte cependant de considérer l'atomisme logique comme un « réalisme analytique » ; celui-ci est caractérisé par deux options qui définissent pour la première fois (« Le réalisme analytique », 1911, initialement paru dans le *Bulletin de la Société française de philosophie*, rééd. in *The collected papers of Bertrand Russell*, vol. 6, p. 409-432) le projet atomiste : « l'existence du complexe dépend de l'existence du simple » ; « le constituant d'un complexe est absolument identique, comme constituant, à ce qu'il est en lui-même quand on ne considère pas ses relations ».

On comprend alors que la philosophie de l'atomisme logique commence par légitimer l'analyse qui nous délivre les « ultimes constituants du monde » et par reconnaître un mode de connaissance spécifique, non inférentiel, de ces constituants : l'accointance ou connaissance directe qui nous fait aborder ces constituants en eux-mêmes, de façon isolée. C'est cet isolement qui donne un des sens forts à « atomisme » dans l'expression « atomisme logique ». Il est conforme au principe selon lequel toute proposition que nous pouvons comprendre est composée de constituants avec lesquels nous sommes en accointance.

L'atomisme logique est lié à une conception réaliste de la vérité. L'analyse permet d'aboutir à un terme final : les constituants de la proposition auxquels correspondent les constituants de la réalité ; L. Wittgenstein soutiendra dans le *Tractatus* ce critère de compositionnalité que l'on trouve dans l'atomisme : « La proposition est pour moi comme pour Frege et Russell fonction des expressions qui y sont contenues » (3.318). Le propre de l'analyse, dans la philosophie de l'atomisme logique, est de parvenir à des termes non analysables : particuliers, propriétés, relations et de façon annexe les faits qui sont des articulations de particuliers et de propriétés ou de particuliers et de relations : « L'un des buts qui n'ont cessé de me guider dans tout ce que j'ai dit a été la justification de l'analyse, c'est-à-dire la justification de l'atomisme logique, de l'idée que, en théorie, sinon en pratique, on peut atteindre des éléments simples, ultimes, à partir desquels le monde est construit, et que ces éléments simples ont une espèce de réalité qui n'appartient à rien d'autre » (B. Russell, *La philosophie de l'atomisme logique*, VIII, trad. fr. p. 430).

Propositions atomiques et propositions moléculaires

B. Russell classe les propositions en deux types principaux : les propositions atomiques et les propositions moléculaires. Les propositions atomiques symbolisent des faits atomiques et ne comprennent aucun mot logique ; les faits atomiques sont les faits « les plus simples que l'on puisse imaginer », ce sont ceux qui « consistent en la possession d'une qualité par une chose particulière. Des faits par exemple tels que "ceci est blanc" » (*Philosophie de l'atomisme logique*,

II^e conférence, trad. fr., p. 357, in *Écrits de logique philosophique*, 1992). Les propositions moléculaires contiennent des mots logiques (et, ou, ne pas, tous, quelque), comme par exemple : « Il n'a pas plu et je n'ai pas apporté mon parapluie » (B. Russell, *op. cit.*, p. 357). La vérité des secondes dépend de la vérité des premières qui elle-même dépend des faits.

L'atomisme logique suppose une conception vériconditionnelle de la vérité ; cette conception consiste à faire dépendre la vérité des propositions moléculaires de la vérité ou de la fausseté des propositions qui entrent dans leur composition. Il suffit d'attribuer une valeur de vérité aux propositions atomiques pour pouvoir donner les fonctions de vérité des propositions moléculaires.

La thèse centrale de l'atomisme logique est que les faits sont indépendants, autonomes les uns par rapport aux autres. Ils n'entretiennent pas entre eux de relations internes, si bien qu'il n'y a pas quelque chose comme un fait conjonctif ou un fait disjonctif : le rasoïr d'Ockham interdit de multiplier de telles entités.

Le réductionnisme est une des conséquences de l'atomisme logique : comment réduire la vérité des propositions complexes à celle des propositions atomiques ou élémentaires ? Là est l'objectif poursuivi. Wittgenstein l'abandonnera car il verra que cette réduction ne marche pas. Loïn de penser que les propositions élémentaires sont indépendantes les unes des autres, il en viendra à montrer qu'elles entretiennent des relations logiques internes : de l'existence d'un état de choses on peut conclure à la non-existence d'un autre. De « a est vert » je peux conclure que « a n'est pas rouge ». Il n'y a donc pas d'autonomie des propositions élémentaires ; celles-ci entretiennent entre elles des relations logiques et n'ont donc pas l'indépendance requise par l'analyse ultime que suppose l'atomisme logique. La distinction entre les propositions élémentaires et les propositions moléculaires perd de sa pertinence si par là on veut dire que les premières renvoient à une réalité ou un état de choses et que les secondes sont fonction de la vérité des premières : « Parmi les règles de grammaire, on tend à distinguer entre celles qui établissent une connexion du langage et de la réalité et celles qui ne le font pas. Nous aurions pour le premier genre la règle : "cette couleur s'appelle "rouge" ", pour le deuxième " $\neg \neg p = p$ ". Mais cette distinction est erronée : le langage n'est pas quelque chose que l'on structure pour ensuite l'adapter à la réalité » (*Grammaire philosophique*, IV, trad. fr., p. 98).

La remise en cause de l'atomisme logique s'accompagne de celle de la loi de bivalence. Si les règles sont ce qu'il y a d'ultime, on ne peut présupposer une essence de la réalité telle qu'un fait ne peut qu'exister ou ne pas exister et une proposition être ou vraie ou fausse. Tant qu'on n'a pas énoncé de règle il n'y a aucune obligation à ce qu'une proposition soit ou vraie ou fausse.

L'atomisme logique est lié à une conception métaphysique du monde où l'on pense pouvoir déterminer une essence logique de celui-ci, en le décomposant en

faits ou en états de choses et les propositions, en atomiques et moléculaires. Aux constituants de la proposition correspondent les constituants d'un fait ; cette thèse rencontre des limites chez Russell lui-même autour des propositions de croyance ; celles-ci ne peuvent pas être traitées comme des propositions moléculaires car dans ces dernières nous avons affaire à deux faits, alors qu'« avoir une croyance ne constitue qu'un seul fait. Le cas où la croyance est fausse montre clairement qu'on ne peut en couper un morceau : on ne peut avoir "Je crois/Socrate est mortel" » (B. Russell, *La philosophie de l'atomisme logique*, IV, p. 377). Cet impossible découpage interdit de poursuivre l'hypothèse atomiste jusqu'au bout : « Il n'est pas possible de faire ce que j'appellerais un plan-dans-l'espace d'une croyance. Vous le pouvez pour un fait atomique, mais pas pour une croyance, pour la simple raison que les relations spatiales sont toujours des relations atomiques ou des complications de relations atomiques » (*ibid.*, p. 384), ce qui n'est pas le cas des phénomènes de croyance.

Les attitudes de croyance posent de façon cruciale le problème de la compositionnalité des propositions et de façon plus générale le découpage qui nous autorise à isoler des faits de la réalité. Le Wittgenstein de 1930, très critique à l'égard d'une correspondance proposition/réalité telle que la donne l'atomisme de Russell, défend l'idée d'une « comparaison » qui devrait nous permettre d'« apposer la proposition à la réalité » comme « étalon de mesure » (*Remarques philosophiques*, IV, § 43, p. 75) ; non pas au sens où les propositions sont prises une à une et comparées à des états de choses isolés : « Si j'appose une règle graduée le long d'un objet de l'espace, j'appose à la fois toutes les graduations » ; nous comparons toujours un système entier à la réalité et non une proposition élémentaire à une réalité singulière. Si on objecte que l'étalon de mesure n'appartient pas lui-même à la réalité, c'est qu'on oublie alors que l'étalon, qui remplit la fonction du sens, est nécessairement symbolique et en tant que tel a des caractéristiques matérielles : « L'indication de lieu "Londres" n'a de sens que s'il est possible de chercher Londres » (*ibid.*, § 46, p. 77). Il faut se défaire du privilège du langage verbal dont la composition nous fait croire que les états de choses sont eux-mêmes composés. Les constituants des faits auxquels correspondraient des constituants de la proposition sont de pures chimères ; les propositions atomiques comme « ceci est rouge » ne sont pas une image composée d'une réalité elle-même composée : si on veut maintenir le mot d'image il faut le prendre au sens d'une métaphore, « si l'on cherche, en quelque sorte, à prendre l'expression "image" au sens littéral, alors elle est décidément trompeuse, même néfaste, car elle entraîne à supposer de façon absurde qu'aux mots isolés doit correspondre quelque chose dans la réalité et qu'une tâche ronde et rouge est composée de la rondeur et de la rougeur » (*Dictées de Wittgenstein à Waissmann et pour Schlick*, trad. fr., 1997, p. 358).

En parlant de règle graduée et d'étalon de mesure

Wittgenstein veut rompre avec le langage correspondantiste qui fut le sien lors du *Tractatus* et qu'il partageait alors avec Russell ; non, la proposition n'est pas une image de la réalité, sa structure n'est pas une reproduction de la structure du réel pour la simple raison, énoncée par Berkeley depuis longtemps déjà, que les mots ne ressemblent pas aux choses. Nous pouvons cependant garder le mot « image » au sens de quelque chose qui est appliqué contre le réel, à la manière d'une règle appliquée contre un objet pour le mesurer. L'avantage du mot « image » c'est qu'il « nous retient de penser exclusivement au langage verbal à propos de l'expression "proposition" » (L. Wittgenstein, *Dictées*, p. 255). Ces analyses de Wittgenstein, parties très tôt des phénomènes de croyance – puisque Russell reconnaît en 1918 déjà que son élève Wittgenstein l'avait aidé à voir la spécificité non atomique de ces phénomènes – débouchent dans les années 1930 sur un abandon de l'atomisme logique.

► BENMAKHOLOUF A., *Bertrand Russell, l'atomisme logique*, Paris, PUF, 1996. – CARNAP R., *Der Logische Aufbau der Welt*, Berlin, Weltkreis Verlag, 1928. – MARSH R.C. éd., *Bertrand Russell, Logic and Knowledge Essays 1901-1950*, New York, 1956. – RUSSELL B., *The philosophy of logical atomism* (1918), trad. fr., *La philosophie de l'atomisme logique*, in *Écrits de logique philosophique*, Paris, PUF, 1992 ; *Our Knowledge of External World as a field for scientific method in philosophy*, Chicago/Londres, Open Court/Allen & Unwin, 1914 (trad. fr., *La méthode scientifique en philosophie*, rééd., Paris, Payot, 1969) ; *Inquiry into Meaning and Truth*, Philadelphie, 1940 (trad. fr., *Signification et vérité*, Paris, Flammarion, 1969). – SOULEZ A. dir., *Dictées de Wittgenstein à Waissmann et pour Schlick*, trad. fr., PUF, 1997. – WITTEGENSTEIN L., *Philosophische Grammatik* (1931-1934 ; publ., 1969), trad. fr., *Grammaire philosophique*, Paris, Gallimard, 1980 ; *Tractatus logico-philosophicus* (1913-1918 ; publ., 1921), trad. fr., Paris, Gallimard « Tel », 1971 ; *Remarques philosophiques*, trad. fr., Paris, Gallimard « Tel », 1975.

Ali BENMAKHOLOUF

→ Idéalisme ; Langages formels ; Proposition ; Russell ; Vérification ; Vérité ; Wittgenstein ; Wittgenstein et le positivisme logique.

AUTOMATE

Tout d'abord, l'image de l'automate évoque celle d'une machine, c'est-à-dire d'un objet artificiel capable de mouvements cohérents destinés à transformer de l'énergie et à utiliser cette transformation pour effectuer des tâches prescrites – et l'automate est une machine avec, comme seule nuance, le fait qu'il peut contrôler lui-même ses mouvements et que la fin de ceux-ci et des transformations énergétiques qu'il autorise semble être sa propre fin. Ce caractère intrinsèque de l'automate technique se retrouve dans ses diverses définitions, ainsi : « Petits engins automatés, c'est-à-dire se mouvant eux-mêmes. » C'est cette définition que propose Rabelais en 1534 dans *Gargantua* (I, 24) lorsque le terme naît dans la langue française.

amorçant une constellation de sens où affleurent les termes d'autosuffisance, d'autonomie, de liberté, d'imitation de la vie, transférés sur le plan réel (celui du travail, de l'industrie) ou imaginaire (celui de l'art, du fantastique, de la fantaisie) – on parle alors d'*automatisme* (ou *automatique*) pour désigner des fonctionnements spontanés (l'écriture automatique), réguliers, rythmés. D'autres termes accompagnent l'automate : le *golem*, issu de la tradition cabalistique est pétri d'argile rouge à l'imitation de Dieu dans la Genèse, et doté de la vie par le magicien qui inscrit sur son front le mot « vie » : il devient dès lors un esclave docile mais qui doit être surveillé car sa croissance est illimitée jusqu'à l'inscription finale du mot « mort » : K. Capek crée en 1924 le terme *robot* (travail, en tchèque) : « androïde » est mis en valeur par l'*Encyclopédie* de Diderot. Étymologiquement, le verbe grec *auto-matizô* : faire quelque chose de son propre mouvement, gouverne les premiers « automatismes » : Homère l'emploie pour désigner les portes de l'Olympe qui se meuvent « seules » (*Iliade*, V, 749) et les trépieds d'Héphaïstos qui s'agitent d'eux-mêmes (*Iliade*, XVIII, 376). Platon, dans le *Sophiste* (265 c) parle de « cause automatique » naturelle. Quant à Aristote, dans la *Physique* (II, 4, 1), il attribue à Automaton le registre du « Hasard » (en référence sans doute à Automatia, Déesse du Hasard) par opposition à ce qui relève de la « Techné », du travail, du métier, de l'expédient...

Perspectives

1) D'entrée de jeu, un paradoxe techno-philosophique apparaît : les images et concepts signalés témoignent que « l'automate » peut désigner aussi bien – mais selon le contexte – la liberté la plus forte ou la causalité la plus nécessitante. En lui, en quelque sorte, les deux extrêmes de l'acte technique (la création « divine », le travail esclavagisé) se rejoignent asymptotiquement ; hasard, contingence d'une part, mécanique contraignante de l'autre. 2) L'automate peut être considéré comme désignant certaine « essence » du domaine technique dont il serait le révélateur. Pourtant ses « images-mères », hellénistiques et même modernes, sont littéraires, cosmologiques, métaphysiques – avant que la convergence de l'âge industriel sur la dimension ergonomique ne les laïcise quelque peu. Il peut désigner l'artifice démiurgique, le jeu du vide et du plein (le faux automate du *Joueur d'échecs de Maelzel* d'E. Poe), le trucage ; réciproquement, il qualifie certain idéal de la machine-outil, de son organisation usinière, urbaine (l'utopie politique, le panoptique), le rêve qui va jusqu'à nier l'homme pour mieux en accomplir l'image. 3) Ainsi l'automate est-il une machine singulière. Les « machines simples » du *Traité des mécaniques* de Galilée sont des conceptions directes de la force qui s'applique au monde. Un poste de télévision, une automobile ne sont pas des automates dans la mesure où ils dépendent d'une source énergétique qui leur est externe. Cependant, il

existe des machines capables de se contrôler, de parler – peut-être, dit Von Neumann, de se « reproduire » – et surtout les machines les plus élémentaires, par circularités sociales, réseaux publicitaires, systèmes informatiques, participent aujourd'hui à des « champs d'automatisme » où elles sont d'ailleurs à la fois le chasseur (d'information) et le gibier (qu'il faut vendre sinon tuer pour que la guerre commerciale continue). 4) L'automate parle le langage du fou aux échecs : dans le jeu des technostructures qui constituent notre seconde nature, il garde les frontières où corps et esprit convergent encore, les limites de la vie et de la mort (question médicale urgente) ; les petites libertés qui font aussi les grands bonheurs comme le masque du clown ou la démarche de Charlott laissent entrevoir d'autres libertés profondes. 5) Chaque époque possède son image technique de l'automate – de l'Antiquité grecque à l'informatique contemporaine. Chaque culture aussi, depuis les masques africains, les totems et statues divers. Mais le fil demeure, à travers ses diverses expressions, du paradoxe de la fatalité et de l'autonomie dont le sens dernier réside dans l'impuissance où nous sommes de dire sans détours « la technique », donc la nécessité de l'interroger philosophiquement, en ses fondements automatiques.

L'automate antique et médiéval

La « technologie » grecque n'est pas d'un abord aisé. L'automate, pourtant, est partout présent, et d'abord dans le personnage de l'esclave (valeur ergonomique disponible qui dispense les citoyens d'une réflexion plus approfondie sur les machines) ; il est présent dans l'image démiurgique du cosmos (suspendue au thème de l'éternel retour) ; il est présent dans les merveilleuses apories de Zénon d'Elée qui, pour montrer l'immobilité de l'Être et l'inexistence du temps conçoit de « petits automates intellectuels » jouant avec la divisibilité infinie du trajet des corps en mouvement ; il est présent dans les machines conçues par les ingénieurs de Byzance : Ctésibios, auteur d'une horloge hydraulique ; Héron, deux siècles plus tard (~ 100 av. J.-C.) à Alexandrie qui invente une fontaine à vin, un théâtre roulant, conçoit surtout des mécanismes fondés sur la multiplication des engrenages et la vis sans fin, remplaçant le liquide, qui pour Ctésibios assurait l'unité fonctionnelle de la machine, par des roulements à grains de moutarde. L'automate, du mythe à la machine, est présent dès l'origine des actes et des choses. La civilisation chinoise le connaît : le texte sacré du *Yi-king* est une machine combinatoire (presque) parfaite. Al-Jazari au XII^e s. crée des machines à assurer le captage de l'eau qui améliorent l'ancienne noria par des engrenages modifiant considérablement le paysage technique de l'homme, lui apportant bientôt les moulins à eau et à vent (ceux-là même que Don Quichotte, peu technicien sans doute, prendra pour des géants), le gouvernail d'étambot qui invente l'Amérique par caravelle interposée, des machines de

guerre et jusqu'aux petits personnages stylisés que Villard de Honnecourt et ses compagnons-artisans vont créer pour agrémenter les horloges monumentales des cathédrales. L'automatisme antique et médiéval, multiple mais cohérent, est une parole qui s'adresse au monde et veut retrouver en ses plus les éléments constitutifs de sa chair. C'est l'eau, la terre, le feu qui sont sollicités – l'air icarien ou dédalique également : l'automate conserve une expression animiste de ce « corps du monde » que l'homme ressent au plus fort de son être, qui l'amène à sublimer ce contact premier avec les choses pour leur conférer son art – pour bientôt devenir, Descartes l'affirme, « comme maître et possesseur de la nature ».

L'horloge et la machine

La définition cartésienne de l'homme matériel dans son *Traité* : « Je suppose que le corps n'est autre chose qu'une statue ou machine de terre que Dieu forme tout exprès pour la rendre la plus semblable à nous qu'il est possible », n'a pas oublié l'ancienne image du Golem. Pourtant l'esprit est nouveau : ce que propose Descartes avec son « animal-machine » – ou son « homme-machine » – c'est un modèle permettant de comprendre de manière physique le fonctionnement des mouvements du corps à partir de quelques hypothèses mécaniques simples : la glande pinéale contrôlant la circulation des esprits animaux comme un régulateur quasi-métronomique, un certain nombre de filtres distribuant le sang au cerveau ou au cœur, un ensemble de réflexes – notion automatiennienne qui va proposer aux médecins un beau thème expérimental, jusqu'à la psychiatrie actuelle. À l'âge classique, Descartes en témoigne, l'automate est entré dans les sciences, car il est difficile de distinguer « machine » et « automate » – les deux termes sont devenus à peu près interchangeables pour désigner le corps mécanique. Mais l'automatisme est compris également comme un phénomène métaphysique : le rapport de l'âme et du corps est en question. Il permet de comprendre le dérèglement des passions ou l'harmonie des représentations. Le monde gagne son identité dans cet automatisme et Leibniz l'exprime mieux que tout autre par l'harmonie préétablie (synthèse de l'âme et du corps) ainsi que par sa *Monadologie*, paysage panoptique : « Toute monade de l'Univers est un miroir de l'univers... ainsi chaque corps organique est une espèce de machine divine ou d'automate naturel qui surpasse infiniment tous les automates artificiels » (§ 63-64). Du Dieu mathématicien à l'infime portion de la matière, par la combinatoire, les principes de continuité, des indiscernables et de raison suffisante, c'est un système encyclopédique et automatique que Leibniz a voulu concevoir et imposer selon les écritures des signes. La « raison automatique » en cet âge classique est toujours la plus droite (Descartes), la plus « économique » (la substance « cause-de-soi » de Spinoza), la « meilleure » enfin (Leibniz), même si toutes ces rationalités conservent en leurs recoins des souvenirs obscurs d'autres

épisodes où l'automate quelque peu alchimiste puisait dans d'autres mystères archaïques.

Le mot est revenu en effet avec Rabelais, Vésale, les médecins anatomistes : les liens avec le vivant – mais aussi avec « le mort » ne sont pas innocents. D'autre part l'automate s'affirme déjà comme une curiosité, une pièce de collection, un jeu pour les princes. Giovanni della Porta dans sa *Magie naturelle* de 1589 conçoit un dragon volant d'après l'observation du vol des oiseaux – rêve mécanique que Léonard de Vinci reprend dans son langage précis. Campanella, autre icarien, est à la fois expérimentateur et magicien. En bref, c'est un animalier fantastique qui s'est établi du XII^e au XVIII^e s., voguant parfois sur la « nef des fous », torturé par quelque diable et que l'on retrouve sur les toits des cathédrales, associé aux grandes horloges qui vont profondément modifier les rapports de l'homme à son destin, à son travail, à sa nature : car l'unité de cet ensemble automatique-mécanique, depuis le XIV^e s., c'est le schéma de l'horloge qui la donne – et l'homme-machine de Descartes est, à sa manière, une « horloge mise à plat », une expression de l'autorisation intellectuelle de décomposition que l'horloge consacre par son dessin (elle est un système, conçu selon un ordre des pièces qui lui confère son identité mécanique) et par ses fonctions (cette capacité de décomposition rythmée du temps, d'où cette prise sur nos existences). La pièce centrale de ces deux systématitudes, le point où se réfugie sa nature automatique, c'est l'échappement par « roue de rencontre » qui laisse échapper une dent avant de la reprendre, pouvoir infime mais indispensable, point zéro où le mouvement rotatif continu (le rouage actionné par le ressort) se relie au mouvement alternatif (le régulateur, le balancier) qui garantit la rythmicité régulière de l'automate. À la lettre, l'échappement est un « temps mort » – celui où le rouage « s'échappe » pour mieux se relancer. Pour oser une métaphore, l'échappement évoque la glande pinéale de l'homme-machine. D'ailleurs les soucis des premiers horlogers et de Descartes se ressemblent étrangement : régulariser cet ensemble, éviter les pertes, les passions incongrues, les dysharmonies de tout ordre. Il faut concevoir des régulateurs supplémentaires (la fusée), travailler sur la qualité des organes, leur agencement. Le rapport de l'échappement au Temps en général est celui du mouvement perpétuel anticipé par l'invention du résonateur qui maintient l'énergie de l'ensemble en puisant ce qu'il faut à la source motrice. Un temps parfaitement régulier cependant n'est atteint qu'en 1675 avec l'invention par C. Huygens du balancier-spiral et de la montre individuelle. L'horloge réalise ainsi le « schéma-automate », concrétise l'alliance de l'alternatif et du rotatif qui conditionne les moulins mais aussi des machines à représenter le monde, un artisanat ludique de tableaux animés – d'abord, les jaquemarts qui manifestent les mouvements du temps horloger aux cathédrales de Paris, Reims, Lyon, Strasbourg, Berne..., des instruments de musique et jusqu'aux premiers métiers à tisser.

Les animaux renaturés

À la fin du XVIII^e s., l'automate retrouve quelque spécificité : d'abord, il accentue l'individualité de l'objet technique qu'il désigne. Sa personne s'affirme comme celle d'un « individu » – parfois issu d'un bricolage qui serait, pour Lévi-Strauss, l'expression d'une « rationalité-autre ». Une relation privilégiée avec le vivant établit quelques séquences célèbres : l'homme-machine de La Mettrie, plus matérialiste que celui de Descartes ; la « statue » de Condillac qui s'ouvre progressivement aux sensations du monde ; l'aveugle de Locke, de Diderot et de tous les auteurs de l'époque qui essaient de savoir ce qu'il verrait s'il retrouvait la vue (belle tentative de correspondance des sens, de « mise en miroir », ce dernier appareil étant un mécanisme fort prisé à l'époque).

Dans le *Traité des animaux* de Condillac, une nouvelle expression de la Nature intervient : commentant les propos de Buffon, sa conception de la sensation comme un ensemble de vibrations, Condillac accorde certain langage aux animaux (ce ne sont plus, alors, de « pures » machines) – mais surtout sa conception de l'homme en sort « revitalisée », soumise à certaine conciliation de « la dépendance et de la liberté » qui puise dans le paradoxe automatique antique transposé en expression électrique des êtres. Il prend sa qualité la plus « sensible » (en un sens « médical ») pour désigner, chez Diderot, les vibrations quasi musicales par lesquelles les hommes oscillent de manière plaisante, comme une corde d'instrument semblable à la fibre nerveuse. L'homme joue d'un véritable automate pour correspondre avec les choses, de manière musicale, érotique, hypnotique bientôt. Individu scientifique aux lisières d'un monde aristocratique, décadent parfois, l'automate joue encore des ambiguïtés de l'interne et de l'externe, de l'âme et du corps. Raffiné, poudré, il évoque aussi Don Juan et le Commandeur, deux automatismes antagonistes et complémentaires, le premier répétitif et narcissique (qui ne désire plus la femme mais le nombre, le désir lui-même), l'autre nocturne, inéluctable, comme une remontée sur scène de la vertu des grands principes. La musique et l'automate, l'opéra, la philosophie aussi peuvent entretenir sa ruse. Des inventeurs apparaissent qui ne sont plus de purs artisans. Dans l'article « Androïde » de l'*Encyclopédie*, d'Alembert reprend à la lettre le *Mémoire* où Vaucanson décrit l'élaboration du Flûteur qu'il a exposé à Paris en 1738. Vaucanson était pour son temps allé très loin. D'abord, par la finesse de la réalisation des personnages qui l'ont rendu célèbre : Le Flûteur, Le Joueur de tambourin, Le Canard – toutes pièces imitatives du réel mais individus inimitables. Vaucanson collaborait avec le médecin Le Cat, rêvant à la construction d'un homme artificiel – et les diverses exhibitions vont amorcer une « généalogie » d'artistes-horlogers : ainsi l'Écrivain, le Dessinateur, la Joueuse de clavecin de Leschot et P. Jaquet-Droz demeurent, à Neuchâtel, dans la même veine. Certain esprit de l'automatisme se perpétue ainsi jusqu'à nos jours avec

les marionnettes, les diverses poupées musiciennes, les animaux pour enfants, les humanoïdes (sortis par exemple de l'atelier de J. Farkas). C'est un monde étrange que Vaucanson a initié, celui de Robert-Houdin, fabricant et magicien-illusionniste, celui de la machine solitaire aussi, jusqu'à l'engin spatial américain qui prélève des échantillons de lune et ressemble à l'homme-marchant de Giacometti. Mais Vaucanson était encore un « industriel en herbe », qui voulait faire glisser l'intérêt que l'on manifestait pour les curiosités de salon du côté de la machine-outil, donc en 1730, de la machine-textile. On lui attribue l'invention du métier à filer et tisser la soie que Jacquard retrouvera quelques décennies plus tard, l'invention du différentiel, de la grue. Surtout Vaucanson, comme Buffon à Montbard, voulait créer des complexes manufacturiers, aux Mignaux, à Aubenas, à Montpellier, à Romans. Échec partout, révoltes d'ouvriers. On lui reproche ce qui sera valorisé par Taylor : Vaucanson voulait simplifier les actions en les rectifiant. Impensable, à l'époque. Vaucanson demeure un encyclopédiste – il n'est pas un industriel. Il restait à passer à un autre âge qui reprenne les vieilles hantises mais les réoriente dans trois directions principales qui se recoupent sans cesse : la simulation de la vie, la répétition du travail, l'imitation de la pensée.

La simulation de la vie

Au XIX^e s., Hegel le dit clairement, la mort est entrée dans l'Histoire : les médecins de Napoléon, Larrey en tête, opèrent sur les champs de bataille. Lorsque les anesthésiques se répandent vers 1850, c'est une certaine expression fantomatique de l'existence qui confère à leur art une nouvelle puissance. On n'est pas loin de l'automatisme considéré comme capacité à se mettre à l'« écart de soi-même » pour laisser parler d'autres forces : hypnose, magnétisme, éther et diverses substances pharmacologiques creusent la physiologie jusqu'au point crucial de la douleur, de la maladie et de la sur-vie. La simulation de la vie, programme antique s'il en fut, devient chaque jour un enjeu exemplaire : non seulement le vivant se fabrique comme dans une usine depuis la connaissance des systèmes héréditaires mais il se répare ou se reproduit en serre, en laboratoire. L'automatisme désigne la reprise de ces pratiques par un néomécanisme qui se colore quand il le faut d'un organicisme nouveau – autrement dit, quel est le premier terme : la greffe ou la prothèse, l'homme (en morceaux) ou la machine (supposée totale) ? On n'opère plus une tumeur par simple ouverture du corps mais après avoir « lu » le mal – comme en ces simulacres dont Épicure disait qu'ils accompagnaient tout objet réel – après avoir « constitué » l'opération par avance. Automate veut dire alors modèle, maquette, reconstitution, réimplantation – donc prélèvement de peau, d'organes et greffes consécutives. Mais le tableau des implantations et greffes « vitales » demeure empli d'aléas : il faudrait parvenir à quelque « science totale du vivant » dont nous sommes encore

assez éloignés. C'est pourquoi, souvent, on fait appel à la prothèse, plus lourde, mais aussi moins délicate et moins onéreuse. Dans les prothèses contemporaines, la reproduction de l'organe manquant dont il faut concevoir concrètement les performances s'adresse deux fois à la biologie : d'abord en reconstituant le donné absent ; ensuite en reconnectant celui-ci au corps tout entier selon des urgences supposées calculables, contrôlées par la technique elle-même. En ce sens, les prothèses expriment de « manière automatique » et scientifique la logique du vivant, du hasard et de la nécessité conjointes. Finalement l'horizon de l'automate est non « le » vivant – mais l'« assimilable au vivant », au plus près. Réciproquement les vivants eux-mêmes n'échappent pas à ce redoublement : de prothèse en prothèse, ne rêve-t-on pas de fabriquer un double technique plus solide, plus durable – d'où, à travers l'utopie contemporaine, la résurgence de « l'homme perpétuel » ou du remède universel ? Ainsi ce sont des « corps-machines » qui seraient notre avenir – semblables à ces « animaux à pattes » qui accomplissent automatiquement des tâches délicates en des lieux impropres à la vie... De meilleurs vivants imitant mieux la machine ? De même l'utilisation de fibres optiques comme reconnaissance d'une véritable continuité entre la plante et l'artificiel, fondée non plus sur l'analogie mais sur l'expérience concrète, gouvernée par des procédés-lasers, a depuis longtemps ouvert des voies que l'INRA explore à souhait. Du laser au scanner et à l'image virtuelle, l'automate désigne le lieu géométrique de ces actions. Mais la mutation scientifique de l'automate n'a pas attendu les moyens techniques contemporains : au XIX^e siècle, déjà, en médecine et dans les sciences de la vie, il est intégré à certaine psychologie politique et sociale ; l'automate fonctionnaliste condense nombre d'images eugénistes qui n'ont d'ailleurs pas fini de nous stériliser, comme une sorte d'accompagnement obligé du darwinisme galtonien par des mesures bioéthiques adaptées. Il ne faudrait pas insister beaucoup pour que celles-ci soient régies par quelque nouveau Lyssenko. Car la bio-politique fonctionne comme un panoptique du « rejet par l'enfermement » : « faire vivre et laisser mourir » reste le slogan de l'automate social qui nous entoure. L'automate, souvent, déborde sur le monde social. La médecine, parfois, se prend elle-même au piège. En 1888, à la Salpêtrière, Charcot présente des vagabonds, des miséreux, des « juifs errants » à ses « Leçons du mardi » et crée pour eux le concept peu flatteur d'« automate ambulatoire ». Il désigne ainsi, en une intuition syncrétique, une nouvelle émergence du mécanisme adaptée aux conceptions neurologiques de l'époque – la théorie de l'arc-réflexe en particulier. Ces « automates ambulatoires » aux comportements répétitifs, hypnotiques, inconscients sont bien des automates ordinaires. Cette qualification puise aussi dans le « criminel-né » de Lombroso, les « déviants » de Gall, Lavater, et l'on ajoute parfois au qualificatif de Charcot celui de « dromomane dégénéré ». Le plus intéressant de l'affaire réside dans le fait que l'un des auditeurs de

Charcot à Paris, en 1888, s'appelle S. Freud qui refusera toujours d'abandonner, pour qualifier « le fond » de l'homme, cette étrange pulsion de mort qui conserve bien des aspects automatiques. L'automate nous rappelle en effet ce détail : au-delà des utopies et des rêves qu'il entretient ou condense, la mort de l'homme – ce contact froid et direct avec la matérialité d'un objet – est peut-être première aux regards de la vitalité des choses. L'automate est le souvenir froid d'une enfance perdue de clown triste que Vaucanson et ses élèves ont bien su rendre. Husserl le savait aussi : quand la conscience de l'homme « s'arrête », tout se passe comme s'il tombait en panne...

Le travail automatisé et la ville-usine

L'automate ambulatoire, vagabond nocturne, ne contrôlait pas son « temps d'absence », son temps de flânerie dira un peu plus tard Taylor soucieux d'identifier rationalité (économique et technique) du travail et contrôle du temps libre. Pour supprimer la perte de temps qui affecte le travail en usine, il propose de ramener les gestes de l'ouvrier qui construit un mur en briques de 18 à 5 actions codifiées. Certaine contradiction apparaît, si l'on se souvient de Charcot, entre le médecin-psychiatre et l'ingénieur social : l'imaginaire est la même mais la maladie de l'un devient le remède de l'autre. L'automatisme, ainsi projeté sur le travail et sur la nosologie de l'homme, peut apparaître comme la meilleure ou la pire des choses selon que l'individu contrôle ou ne contrôle pas son activité. Le « contrôleur » de cet ensemble ergonomique est l'ingénieur, moral et puritain, très exceptionnellement inventeur mais surtout « résonateur », médecin des temps et des âmes ; le travail est « en miettes » dit G. Friedmann : l'ingénieur doit donc surveiller les ouvriers des « Temps modernes », enchaînés dans la Machine et l'Usine qui sont aussi de belles utopies radiales. Des robots ou des hommes ? demande H. Dubreuil commentant l'influence de l'ingénieur Taylor et conclut en prévoyant l'arrivée de nouvelles machines-outils qui présentent ce caractère particulier d'être capables de fonctionner sans exiger à leur côté la présence permanente d'un ouvrier – la nouvelle technologie « va se passer de l'opérateur » – Taylor lui-même est dépassé ! D'ailleurs le schème-automate retrouve ici sa définition originare qui n'a cessé de hanter les « techniciens » du travail industriel. Lorsque l'ingénieur physiocrate E. Cheysson envisage que tout le travail qui est nécessaire au monde puisse être effectué par un seul automate dirigé par une « manivelle de Sismondi » tournée par une main de femme, celle de la Reine d'Angleterre par exemple, il conclut que « le corps est une sorte de chaudière dont les poumons sont les soufflets et les aliments le combustible » – encore un bel homme-machine – et que « la véritable fonction du travail n'est pas tant d'assurer une subsistance que de maintenir un ordre, d'assurer un bon ordre des choses et des gens » (revue *La réforme sociale*, février 1883). L'utopie de l'âge d'or est-elle aujourd'hui

automatique? À travers les analyses contemporaines de Rifkin, D. Méda, nous sommes condamnés sans doute à « désenchanter le travail », à sortir d'une vision tragique, sacrificielle de l'homme et de nos semblables. La question revient alors, insistante : que faire du temps gagné si les automates pouvaient nous remplacer totalement ? Et encore : avons-nous fait tout ce qui était en notre pouvoir pour qu'une vraie reconnaissance de la technicité se profile dans nos systèmes éducatifs, culturels ? Saurions-nous encore être des « inventeurs » comme ces merveilleux automaticiens-ingénieurs spectrographes du monde objectif, E.J. Marey au premier chef qui conçoit et réalise des « capteurs » du mouvement des animaux, des fusils optiques et appareils lecteurs des variations internes des corps ; Marey, dont F. Dagognet a reconstitué l'aventure, est-il l'exception qui confirme la règle de la misère ? L'automate industriel, cependant, même devenu complexe industriel reste une machine, un ensemble de machines, un ensemble de fonctions techniques et urbaines coordonnées. Tout au long de l'âge industriel, apparaissent les machines-outils automatiques et avec l'ingénieur allemand Reuleaux, les semi-automatismes (le tour de précision Boley avec leviers, la raboteuse à mains, la machine multiple à percer et tarauder), les machines à turbine, les machines électriques, les tours automatiques, les linotypes et jusqu'à des métiers à tisser réactualisés. Le principe de toutes ces machines réside dans leur adaptation à la demande de l'action engagée et leur finalité économique explicite. Elles devront permettre de diviser et régulariser les actions – la loi déterminante est celle d'une « fidélité » semblable à celle, désirée, de l'ouvrier lui-même. Ces machines ne sont donc jamais « auto-fonctionnelles », d'ailleurs ce ne sont pas à la lettre des « moteurs ». G. Simondon (qui valorise cette image) considère l'automate comme « un assez bas degré de perfection technique... ». Une machine entièrement automatique, fermée sur elle-même, sur un fonctionnement prédéterminé ne peut donner que des résultats sommaires. Est-ce le cas des aciéries Mitsubishi dont l'intégration totale en structure automatique et hiérarchisée a été réalisée, vers 1960, par un vaste ensemble d'ordinateurs ? La réalisation a été totalement effectuée et terminée dix ans plus tard : l'usine est entièrement automatisée. En fait, on a licencié la plupart des ouvriers qualifiés – et, globalement, on pouvait produire un meilleur acier pour moins cher car l'opération fut longue et coûteuse. L'automatisation techno-commerciale n'est pas qu'une fantaisie de « patrons-démirgès ». Espérons-le, en tout cas.

La communication et la pensée

L'automate contemporain a, comme toutes les « machines scientifiques » (depuis celles de Pascal et de Leibniz), redécouvert le langage, sa puissance syntaxique, sa capacité de codage, de traitement de l'information, ses multiples réseaux de sens et de traduction. D'autre part les travaux des psychologues,

physiologistes-neurologues, psychanalystes modernes nous ont convaincus que l'on percevait le monde par figures schématiques, par une bonne dose d'automatisme mental qui n'est pas contradictoire avec l'imagination corollaire et ses jeux de fictions. C'est sur cette base automatique que repose en partie la capacité d'acquisition première des données éducatives et culturelles. Il restait à trouver le modèle technique de cette capacité. C'est avec Wiener et von Neumann que l'automate contemporain trouve sa nouvelle « personnalité » : N. Wiener, fondateur de la cybernétique, conçoit des systèmes d'information « feed-back », c'est-à-dire capables de s'autoréguler, de surveiller leur propre développement. Les premiers automates à information reposent sur deux exigences : unifier le code sémiotique de la machine ; quantifier l'information en question pour qu'elle soit bien utilisée par la machine ; ces deux opérations ont été rapportées à la même procédure, celle du langage binaire, le seul que la machine peut comprendre et communiquer. On retrouve ainsi la simplicité maximale du principe (0, 1). Le « reste » de l'informatique est une question de traductions, de programmes, de mises en miroir, de rapports à des idéographies adaptées pour les images et les icônes. Chaque moment historique, chaque progrès apporte des perfectionnements en tous genres depuis 50 ans, mais les principes automaticiens de base demeurent identiques. La seule question, à mesure de l'extension et du rayonnement de ces systèmes, Internet ou autre, réside dans l'appréciation de la « frontière », de l'interface réelle existant entre le milieu interne et le milieu externe des réseaux (leurs appendices périphériques). Le problème des êtres vivants est alors retrouvé mais à un autre niveau de complexité. Les sciences de la vie, en formulant des expériences, des diagnostics, nous apprennent que la peau révèle le fonctionnement intérieur de l'être ; les machines à information, par le réseau et l'interface, privilégient le support de la diffusion, les effets de miroir analysés par G. Chazal et tous les jeux de l'esprit en lesquels on voit sans doute, comme l'a montré D. Parrochia, apparaître de nouvelles formes de rapports entre le monde physique et le monde socio-informatique. Si le réseau est devenu l'horizon, c'est bien que l'automate a regagné encore quelques fantômes, fût-ce au prix de sa propre personne. La « philosophie » de J. Von Neumann est à cet égard exemplaire par les attributs vitalistes qu'il accorde – en mathématicien ! – à l'automate. Tout automate capable d'en produire d'autres ne pourra produire que des automates moins complexes, moins « vivants ». L'autoreproduction est le vœu sinon la règle de cette science des machines où l'on retrouve à la fois la correspondance du technique et du vivant (le neurone et l'organe électrique) mais aussi le vieux mythe de l'homme-machine toujours aussi vivace.

La « pensée artificielle » est sollicitée également. J. Bouveresse, se rapportant aux travaux de N. Wiener, conclut de manière prudente que si la machine a battu aux dames l'homme qui l'a programmée, elle rivalisera

avec lui en un certain sens mais dans un rayon d'action limité. Pour des jugements principaux, pour des idées vagues ou des émotions, la machine n'est pas près de rivaliser avec le cerveau. « Je pense, dit-il, qu'il y aura toujours entre les deux une frontière mouvante mais je n'ose pas m'aventurer à dire où elle passera » (*La parole malheureuse*, conclusion). De fait, les questions neuro-techniques doivent faire l'objet de quelques précautions : 1) c'est la créature – y compris technique – qui est intelligente, non le cerveau ; 2) un robot qui simulerait assez bien le comportement humain pour qu'on lui accorde la vie, serait vu sous le mode du trucage, de la supercherie – alors qu'un clown qui imite parfaitement la machine nous étonne et nous ravit ; 3) une certaine ressemblance corporelle reste, semble-t-il, nécessaire pour que nous accordions à la machine toute analogie intellectuelle que ce soit ; 4) le moderne robot-golem place son créateur dans une position de mage et de sorcier. Ces domaines sont dangereux et la magie de l'automatisation est alors particulièrement apte à séduire les « hommes de pouvoir », car, en rejetant la responsabilité de leurs décisions sur une fatalité mécanique à l'objectivité présumée, ils se dédouanent à bon compte de toute inquiétude morale. La question de la « machine à penser » ne saurait évidemment s'arrêter là : il faut évoquer aujourd'hui la machine surpuissante à jouer aux échecs, le super computer Deep Blue engagé dans des tournois gratifiants – reviviscence du grand-méchant ordinateur HAL de A.C. Clarcke (in *2001. Odyssée de l'Espace*) : il reste également quelque souvenir de Joey, l'enfant-machine de B. Bettelheim, qui « arrivait dans la salle à manger, déroulait un fil électrique, le branchait à une prise de courant imaginaire, le tirait, s'asseyait et se branchait lui-même ». La techno-intelligence est loin d'avoir dit son dernier mot. De l'électrochoc au jeu d'échecs-ordinateur, y compris aux ordinateurs paranoïaques fabriqués à l'université Stanford dès 1965 par le Pr Colby – la raison récupère un vieux débat enfoui sous des couches d'images confuses. Mais entre machine et automate il est nécessaire de rester aux aguets – de même qu'il faut, dans l'autre sens, surveiller l'écart entre l'automate et l'homme. Une meilleure clarté des questions techniques générales, de leur signification épistémologique et philosophique passe non par la maximisation outrancière mais par la surveillance permanente de ces deux frontières. Une information qui s'est répandue dans les journaux de l'été 1997 parle d'un automate étrange : mythe sexuel déshabillé sur une multiplicité de sites Internet, « elle » risque de ne pas vieillir. Lara Croft est l'héroïne d'un jeu vidéo « Tomb Raider » au succès gigantesque, plus de deux millions d'exemplaires dont 300 000 vendus en France dès les premiers jours de sa sortie. Pour la première fois, dit le journaliste, une création virtuelle envahit l'univers médiatique et créatif. Une Ève virtuelle ! Vaucanson semble bien dépassé. Cette fiancée de Frankenstein possède son jargon, ses commandes, ses trucs et ses

rôles. Enfin un théâtre automatique à portée de la main. Réalisons-nous enfin le rêve de Héron d'Alexandrie ?

Une machine célibataire ?

L'automate, au bout du compte, est peut-être une machine immobile – trop sûre de son mouvement pour avoir besoin de bouger – d'où le souvenir du moteur immobile d'Aristote et la compulsion de mort qui souvent l'étreint. Mais l'automate est aussi et surtout une œuvre d'art – Vaucanson le sait au premier chef, Descartes lui-même n'en doute pas, les horlogers suisses encore moins, ni Méliès, ni O. Welles, ni Y. Giampi, ni Mozart lui-même. Le cinéma a su souvent lui rendre hommage et F. Lang, dans *Métropolis*, en 1927, conçoit une femme-robot qui sème la révolte chez des sous-hommes exploités et refoulés dans des mines infernales – double robotisation, naturelle et artificielle. La littérature, pas uniquement de science-fiction, contient une procession d'automates : le 1984 d'Orwell en présente une image politique inquiétante ; Duchamp, Meyrink, Hoffmann, Kafka, B. Casarès, Caillois : autant d'amoureux de cette « machine célibataire », pour reprendre le terme de M. Carrouges qui passe en revue les inventions de ces auteurs ; l'automate n'est jamais aussi fidèle à sa définition paradoxale que lorsqu'on le rencontre au coin d'une phrase, dans un rire – fût-il noir – dans ce trait d'ironie qu'il condense, dans cette nébuleuse originelle qui gouverne tous ses gestes et qu'il sait ensuite à la fois économiser pour sa vie intérieure et projeter sur le monde. Ainsi sa mémoire laisse entrevoir la lueur un instant conciliée de la liberté et du destin, du jeu et du savoir, de l'âme et du corps qui peut détruire, refléter, traduire et reconstruire l'ordre du Monde.

► ARSAC J., *Les machines à penser : des ordinateurs ou des hommes*, Paris, Le Seuil, 1987. – BEAUNE J.-C., *L'automate et ses mobiles*, Paris, Flammarion, 1980 ; *Le vagabond et la machine. Essai sur l'automatisme ambulatoire*, Seyssel, Champ Vallon, 1983. – BETTELHEIM B., *La forteresse vide*, Paris, Gallimard, 1981. – BOUVERESSE J., *La parole malheureuse – Le fantôme dans la machine*, Paris, Minuit, 1971. – BRETON P., *Une histoire de l'informatique*, Paris, La Découverte, 1990. – CANGUILHEM G., *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, PUF, 1955. – CARROUGES M., *Les machines célibataires*, Paris, Chêne, 1976. – CHAPUIS A. & DROZ E., *Les automates. Histoire et technique*, Neuchâtel, Le Griffon, 1949. – CHAZAL G., *Le miroir automate – Introduction à une philosophie de l'informatique*, Seyssel, Champ Vallon, 1995. – CLÉRAMBAULT G. de, *L'automatisme mental*, Le Plessis, Les empêcheurs de penser en rond, 1992. – COHEN J., *Les robots humains*, Paris, Vrin, 1968. – COULOUBARTIS L. & HOTTOIS G., *Penser l'informatique – Informatiser la pensée*, Bruxelles, Éd. Univ. libre de Bruxelles, 1987. – DAGOGNET F., *L'animal selon Condillac (cf. Traité des animaux)*, Paris, Vrin, 1989 ; *E.J. Marey*, Paris, Hazan, 1987. – DESCARTES R., *Traité de l'homme*, t. 1, Paris, Garnier, 1963. – DOYON A. & LIAIGRE L., *Jacques Vaucanson, mécanicien de génie*, Publ. Fac. des Lettres de Grenoble, Paris, PUF, 1966. – DOBREUIL H., *Des robots ou des hommes ? L'œuvre et l'influence de l'ingénieur Taylor*, Paris, Grasset, 1956. – FRIEDMANN G., *Le travail en miettes*, Paris, Gallimard « Idées, NRF », 1964.

— GANASCIA J.G., *L'âme-machine, les enjeux de l'intelligence artificielle*, Paris, Le Seuil, 1990. — GILLE B., *Les ingénieurs de la Renaissance*, Paris, Le Seuil, 1978. — GUÉROULT M., « Animaux-machines et cybernétique », *Études sur Descartes, Spinoza, Malebranche et Leibniz*, Hildesheim, G. Olms, 1970. — JACOMY B., *Une histoire des techniques*, Paris, Le Seuil, 1990. — LA METTRIE, *L'homme-machine*, Paris, J.J. Pauvert, 1966. — LANDES D.S., *L'heure qu'il est*, Paris, NRF-Gallimard, 1983. — LECOURET D., *Lyssenko - Histoire réelle d'une science prolétarienne*, Paris, Maspero, 1976. — LEIBNIZ G.W., *Monadologie*, Paris, PUF, 1954. — LUSSATO B., *Le défi informatique*, Paris, Fayard, 1981. — MAURER P., *Machines automatiques, mécaniques et électriques*, Paris, A. Colin, 1934. — MEYRINK K., *Le golem*, Paris, La Colombe, 1961. — MINSKY M., *La société de l'esprit*, Paris, InterEditions, 1988. — NEUMANN J. von, *Théorie générale et logique des automates* (1951), trad. et introd. G. Chazal, Seyssel, Champ Vallon, 1996; *L'ordinateur et le cerveau* (1955), Paris, La Découverte, 1992; *Theory of self-reproducing automata*, éd. Burks, Urbana Univ. of Illinois Press, 1966. — PARROCHIA D., *Philosophie des réseaux*, Paris, PUF, 1993; *Cosmologie de l'information*, Paris, Hermès/PUF, 1994. — PEREZ J.C., *La révolution des ordinateurs neuronaux*, Paris, Hermès, 1990. — POE E., « Le joueur d'échecs de Maclzel » (trad., Baudelaire), *Œuvres complètes*, Club français du livre, t. 2, 1966. — PRASTEAU J., *Les automates*, Paris, Gründ, 1968. — QUÉAU P., *Éloge de la simulation*, Seyssel, Champ Vallon, 1986. — REULEAUX F., *Cinématique. Principes d'une théorie générale des machines*, trad. Debize, Paris, F. Savy, 1877. — SCHWARTZ Y., *Expérience et connaissance du travail*, Paris, Éd. sociales, 1988. — SÉRIS J.P., *La technique*, Paris, PUF, 1990. — SIMONDON G., *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier-Montaigne, 1958. — TAYLOR F.W., *La direction scientifique des entreprises*, Paris, Dunod, 1911. — VARELA F.J., *Connaître les sciences cognitives - Tendances et perspectives*, Paris, Le Seuil, 1989. — WIENER N., *Cybernétique et société*, trad. Mistoulon, Paris, 10/18, 1964; *God and Golem*, MIT Press, 1964; *Cybernetics* (1948), rééd. Cambridge (Mass.), MIT Press, 1961. — Coll. : — *Encyclopédie de Diderot et D'Alembert*, Pergamon Press rééd. (articles : « Androïde », « Automate », « Mort », etc.). — *Le dossier de la cybernétique*, Verviers, Marabout Univ., 1968. — *Les machines à calculer et la pensée humaine*, Colloque international du CNRS, juin 1951, publ. du CNRS, 1953. — *Histoire des robots - La Grande Anthologie de Science Fiction*, Paris, 1974. — *Revue Millieux*, Le Creusot, Institut J.-B. Dumay : en part. n° 30 : *L'intelligence artificielle*, 1987 : n° 31 : *Squelettes et robots*, 1987. — Nombreux articles in : *La Recherche, Pour la science, Science et avenir*, etc.

Jean-Claude BEAUNE

→ Cartésianisme ; Logique et informatique ; Nature (Système de la) ; Technique ; Vitalisme et mécanisme.

AVICENNE, 980 7-1037

Abū Ali al-Husayn Ibn Sīna — en latin Avicenne — est un philosophe et médecin né à Afsana près de Bukhara. Il a commenté l'œuvre d'Aristote en l'enrichissant de références néoplatoniciennes et d'une culture arabomusulmane. Son *Canon de la médecine* et une partie de son *Livre de la guérison (kitāb al-Shifā')*, sont connus des Latins dès le XII^e s. A la différence de Razi qui avait accumulé de nombreuses observations, Avicenne, dans le *Canon*, ordonne méthodiquement la science de la médecine : l'ouvrage commence par exposer les

généralités de cette science avant de décrire les maladies particulières puis la pharmacopée ; cet ordre se retrouve dans les traités médicaux du Moyen Âge.

Quant au *Shifā'*, il comprend une partie mathématique, une partie logique, une partie métaphysique et une partie physique. Chacune de ces parties se distingue par une disposition nouvelle du savoir aristotélicien : la physique est expurgée des considérations métaphysiques et donne l'occasion à Avicenne de réfuter l'atomisme des Anciens, doctrine mise au goût du jour par les théologiens spéculatifs musulmans ; la logique est orientée vers une doctrine de l'assentiment où l'accent est mis sur les degrés de vérité ; la métaphysique s'articule autour d'une démonstration de l'existence de l'être nécessaire et autour d'une doctrine néoplatonicienne de l'émanation où les intelligences séparées sont présentées comme des intermédiaires entre Dieu et le monde. D'autres textes comme *Le Livre des directives et des remarques* présentent les phases d'une initiation mystique de l'âme. Les thèses philosophiques d'Avicenne ont fait l'objet d'âpres critiques aussi bien de la part des philosophes mystiques comme Al-Ghazālī, pour qui la théologie ne doit pas se dissoudre en une métaphysique, que de la part des philosophes rationalistes andalous comme Averroès, qui orientent la philosophie sur le terrain d'un savoir dégagé de la sagesse illuminative de l'orient.

● *Poème de la médecine (Urjuza fi t-tibb)*, trad. fr. H. Jahier & A. Nourciddine, Paris, 1956.

➤ FELLMANN I., « Ist der Qanun des Ibn Sina ein Plagiat des Kitab al-hawi von Ar-Razi ? », *Zeitschrift für Geschichte der Arabisch-Islamischen Wissenschaften*, 1, 1984, p. 148-154. — JACQUART D. & MICHEAU F., *La médecine arabe et l'occident médiéval*, Paris, Maisonneuve & Larose, 1996. — MEYERHOF M. & JOANNIDES D., *La gynécologie et l'obstétrique chez Avicenne (Ibn Sina) et leurs rapports avec celles des Grecs*, 1938. — SHAH M.H., *The general principles of Avicenna's Canon of Medicine*, Karachi, 1966 (livre I, d'après le texte arabe et la version ourdou).

Ali BENMAKHOULF

→ Atome ; Fossile.

AVOGADRO (Loi d')

Du nom du physicien italien Amedeo Avogadro (1776-1856) qui l'a énoncée pour la première fois en 1811, cette loi établit qu'à température et pression égales, tous les gaz contiennent le même nombre de molécules dans le même volume. Formulée indépendamment par André-Marie Ampère (1775-1836) en 1814, elle est parfois appelée loi d'Avogadro-Ampère.

Cette loi fondamentale de la chimie peut servir de base à la détermination des poids atomiques et moléculaires. Mais au XIX^e s., elle était contestée par les adversaires de la théorie atomique qui la regardaient comme une hypothèse arbitraire. Ceux-ci écrivaient les formules chimiques dans la notation en « équivalents »

qu'ils jugeaient, un peu hâtivement, strictement fondés sur l'expérience. Ainsi, par exemple, ils écrivaient l'eau HO (O=8, H=1) au lieu de H₂O (O=16, H=1).

Une hypothèse controversée

L'hypothèse énoncée par Avogadro en 1811, puis, dans un deuxième mémoire en 1814, n'était pas cependant gratuite. La découverte que tous les gaz, indépendamment de leur nature, sont soumis aux mêmes lois physiques (loi de Mariotte, loi de dilatation thermique), avait conduit les physiciens à admettre que les forces attractives qui s'exercent mutuellement entre les particules gazeuses sont négligeables et que les distances entre ces particules sont déterminées par la seule force expansive du calorique, fluide élastique supposé entourer les dernières particules des corps. Pour Avogadro, l'hypothèse la plus vraisemblable à cet effet était de dire qu'à température et pression égales les particules de tous les gaz se tiennent à égale distance, et par conséquent, qu'elles sont en même nombre dans un même volume.

Pour expliquer les volumes des réactions à l'état gazeux (loi de Gay-Lussac, 1808), Avogadro avait encore supposé que les molécules qui se forment par l'union des particules des corps qui entrent en réaction se divisent en deux, ou en quatre, ou en un autre nombre, de façon à ce que leur nombre soit proportionnel au volume. Ainsi, selon Avogadro, deux molécules d'hydrogène s'unissent à une molécule d'oxygène et l'ensemble se divise en deux pour former deux molécules d'eau (hypothèse du partage des molécules). Il appelle « molécules constituantes » les molécules de l'hydrogène et de l'oxygène qui entrent en réaction et « molécules intégrantes » celles de l'eau, et admet que chaque molécule, intégrante ou constituante, est formée de plusieurs molécules « élémentaires ». En admettant ces hypothèses, les poids moléculaires sont proportionnels aux densités gazeuses, et le rapport des volumes qui entrent en réaction est égal à celui du nombre des molécules des corps simples qui entrent dans la formation d'un corps composé. Avogadro a ainsi calculé les « masses relatives des molécules » des gaz simples et composés par une voie qui, comme il disait, était plus sûre que la méthode utilisée par John Dalton quelques années plus tôt (1808). L'importance pour la chimie de la (double) hypothèse d'Avogadro tient à ce qu'elle permet de passer des paramètres mesurables (densités gazeuses et rapport des volumes) à des considérations théoriques sur le poids ou sur le nombre des particules simples qui entrent dans la formation d'un corps composé. De la composition en poids d'une substance il est alors possible de déduire sa formule chimique.

Pourtant, le chemin jusqu'à l'adoption définitive de cette hypothèse à la base de la détermination des poids atomiques et moléculaires réservait encore beaucoup de difficultés. Les mémoires d'Avogadro, publiés dans un journal scientifique sans notoriété (*Journal de physique* de J.C. de la Méthérie), n'ont pas retenu

l'attention de ses contemporains. Non que les chimistes aient ignoré, dans les années qui ont suivi, la relation « même volume-même nombre ». Mais la plupart d'entre eux refusaient de l'appliquer de manière générale à tous les gaz. De plus, comme il n'y avait pas alors de consensus sur la signification des termes *atome* et *molécule*, chacun employait des termes différents pour désigner les petits corps qui dans les gaz sont tenus à distances égales. En 1814, Ampère les appelle *particules* et considère chacune d'elles comme étant formée de quatre molécules au moins. L'eau, pour Ampère, est formée par la réunion d'une particule d'hydrogène et de la moitié d'une particule d'oxygène ou, selon ses propres termes, de quatre molécules d'hydrogène et de deux molécules d'oxygène. En Angleterre, le système de notation de Thomas Thomson et de William Prout (vers 1815) est contraire à l'hypothèse « même volume-même nombre », puisque dans ce système, où l'eau s'écrit HO, il est admis implicitement qu'à volumes égaux, il y a deux fois plus d'atomes d'oxygène que d'atomes d'hydrogène. En France, en revanche, sous l'influence de la théorie atomique de Berzélius développée à partir de 1814 et très respectée dans les années 1820, la notation ayant pour base les nombres O = 16, H = 1 est presque unanimement admise. Cependant, Berzélius n'admet l'hypothèse « même volume-même nombre » que partiellement. En décrétant « un atome est égal à un volume », il admet que tous les gaz simples contiennent le même nombre d'atomes à volume égal, et par conséquent, que les poids atomiques sont proportionnels aux densités. Mais il refuse de l'appliquer aux vapeurs et aux corps composés. De plus, l'hypothèse de la division des molécules ou atomes est inacceptable pour lui, car contraire à sa théorie électrochimique qui établit que deux particules ne peuvent se tenir ensemble que si elles possèdent des polarités électriques différentes.

En 1826, le chimiste J.-B. Dumas cite l'hypothèse « même volume-même nombre de molécules » comme étant généralement admise par les *physiciens*. Mais ses expériences sur les densités de vapeur du soufre, du phosphore et du mercure, au début des années 1830, font installer le doute. Faut-il l'appliquer aux atomes, aux molécules ou à des groupes moléculaires ? En 1833, Marc-Antoine Gaudin part du « principe » que les molécules se trouvent à des distances égales et admet, contre la théorie électrochimique, que les gaz simples, oxygène, hydrogène et chlore, et les vapeurs du brome et de l'iode, sont diatomiques. En 1836, le chimiste Auguste Laurent rigarde les densités gazeuses comme étant proportionnelles aux poids moléculaires, malgré les anomalies constatées pour la densité de vapeur de certains composés organiques, comme les acides acétique et formique, anomalies que nous expliquons aujourd'hui par la dimérisation de ces acides en phase gazeuse. En 1842, Charles Gerhardt écrit les formules de l'eau et des composés organiques conformément à l'hypothèse d'Avogadro, et, en 1845, Auguste Cahours lui apporte de nouveaux appuis grâce à ses

travaux sur la densité de vapeur de l'acide acétique. Mais la plupart des chimistes refusent encore de prendre les densités gazeuses comme guide pour les formules organiques. En partant du fait que l'éther se produit en éliminant l'eau à l'alcool, ils écrivent l'alcool $C_8H_{12}O_2$ et l'éther $C_8H_{10}O$ ($C = 6$, notation de Dumas et de Liebig). C'est-à-dire, ils admettent l'existence du même nombre d'atomes de carbone dans la molécule de chacun de ces corps.

Deux voies indépendantes, chimie et physique

La controverse reste ouverte et d'autres arguments encore sont nécessaires pour trancher la question de l'écriture des formules par la voie de la chimie. Le pas est franchi vers 1852, quand la synthèse des éthers mixtes (ROR') a confirmé la théorie des types, défendue alors par Gerhardt, Williamson, Hofmann et Wurtz. D'après cette théorie, l'eau devrait s'écrire H_2O , l'alcool $EtOH$ ($Et = C_2H_5$, $C = 12$) et l'éther Et_2O (composés de type « eau »). Autrement dit, la formule de Dumas et de Liebig pour l'alcool devrait être dédoublée. Nous sommes aux débuts de la théorie de la valence. D'après ces formules, les poids moléculaires sont proportionnels aux densités gazeuses (hypothèse d'Avogadro). En faisant la synthèse de ces travaux, au congrès de Karlsruhe en 1860, le chimiste italien Stanislao Cannizzaro (1826-1910) a correctement appliqué l'hypothèse d'Avogadro à la détermination des poids atomiques. Après avoir déterminé le poids moléculaire en partant de la densité gazeuse, et la composition d'un grand nombre de corps renfermant un même élément, il en a déduit, en les comparant, le poids atomique de chaque élément défini comme étant « la plus petite quantité de cet élément qui entre dans les combinaisons » (loi des atomes). La distinction entre atome et molécule, de même que l'existence de molécules diatomiques, pouvaient désormais s'établir nettement.

À peu près à la même époque, une confirmation de l'hypothèse d'Avogadro est venue, cette fois-ci, de la physique, dans le cadre de la théorie cinétique des gaz. Dans les travaux de Clausius et de Maxwell (1857-1858) l'hypothèse « même volume-même nombre » de molécules se déduit de la propriété de l'énergie cinétique moyenne d'être indépendante de la nature du gaz. Les atomes, quant à eux, seraient des constituants des molécules. L'hypothèse de la diatomicité se confirmait par la nécessité d'admettre que les molécules des gaz tels l'oxygène et l'hydrogène possèdent, en plus de l'énergie de translation, une énergie de vibration, hypothèse sans laquelle le rapport théorique des chaleurs spécifiques C_p/C_v était en désaccord avec l'expérience.

Ainsi fondée de manière solide et cohérente au milieu du XIX^e s. sur deux champs de connaissances distincts, l'hypothèse d'Avogadro et Ampère avait tout pour être admise au titre de loi. Mais tous les chimistes ne la voyaient pas ainsi. Kekulé qui, en 1877,

refuse encore d'identifier molécules physiques et molécules chimiques, accepte avec réserve la méthode qui consiste à écrire les formules chimiques d'après les densités gazeuses. Mais c'est principalement en France qu'une nouvelle vague de critiques s'élève après 1860. Elle s'alimente en grande partie par les densités de vapeur anormales de l'hydrate de chloral, du chlorhydrate d'ammoniaque, du perchlorure du phosphore et autres sels à bases et acides volatiles. Pour les adversaires de la théorie atomique, les vapeurs de ces corps occuperaient un volume double de celui qu'occupent les autres composés. Cela signifie que ces corps contiendraient, sous le même volume, deux fois moins d'équivalents que les vapeurs des composés organiques. Pour Adolphe Wurtz, au contraire, l'anomalie n'est qu'apparente. Elle s'explique par la dissociation ou décomposition partielle de ces corps à température élevée. La densité anormale n'est pas, dit-il, la vraie densité, celle qui répond aux molécules de ces corps, mais une densité qui répond à un mélange des produits de leur décomposition. Or, Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881) refuse de regarder comme mélange ce qui à ses yeux est une vraie combinaison. Un accord entre les deux camps, les « atomistes » et les « équivalentistes », sur l'hypothèse d'Avogadro est alors compromis dès lors que les uns s'expriment en équivalents, les autres en molécules, et que les expériences délicates destinées à trancher la question de la distinction entre mélange et combinaison en phase gazeuse n'ont pas la même valeur démonstrative pour les uns et pour les autres. Sous l'influence de Marcelin Berthelot, de Sainte-Claire Deville et de L. Troost, nombreux sont les chimistes ou physiciens qui rejettent la notation atomique défendue par Wurtz et ses élèves, et continuent jusqu'à la veille du siècle à écrire les formules chimiques en « équivalents ». Pierre Duhem admet l'hypothèse d'Avogadro à la base de la notation chimique en 1892, et Berthelot seulement dans la dernière édition de son *Traité de chimie organique* en 1898.

► BROOKE J.H., « Avogadro's Hypothesis and its Fate : A Case-Study in the Failure of Case-Studies », *History of Science*, 1981, 235-273. — CIARDI M., *L'atomo fantasma, Genesi storica dell'ipotesi di Avogadro*, Florence (biblioteca di Nuncius, XVII) Leo S. Olschki, 1995. — FISHER N., « Avogadro, the Chemists and the Historians of Chemistry », *History of Science*, 20, 1982, 77-102 et 212-231. — MORSELLI M., *Amedeo Avogadro, a Scientific Biography*, Dordrecht, D. Reidel Publ. Co., 1984. — NYE M.J., *The Question of the Atom. From the Karlsruhe Congress to the Solvay Conference, 1860-1911*, Los Angeles, Tomash. — ROCKE A.J., *Chemical Atomism in the Nineteenth Century. From Dalton to Cannizzaro*, Columbus, Ohio State Univ. Press, 1984. — TORRACCA E., « Le densità gassose "anormale" e la teoria atomico-molecolare », in ANTONIOTTI P. & CERRUTI L. éd., *Atti del 1° Convegno di Storia della Chimica*, Turin, 1985, 138-148.

Catherine KOUNELIS

→ Atome ; Avogadro (Nombre d') ; Gaz ; Moie ; Molécule ; Symbole.

AVOGADRO (Nombre d')

Le développement de la théorie cinétique dans les années 1860 n'a pas seulement démontré que les gaz contiennent le même nombre de molécules dans le même volume. Il a aussi ouvert la possibilité de déterminer le nombre de molécules dans l'unité de volume. La première estimation de ce nombre date de 1865 et elle est due au physicien autrichien Josef Loschmidt (1821-1895). En relation à une unité chimique, la molécule-gramme (« Mol », proposé par Ostwald en 1893), le nombre d'Avogadro N, appelé aussi constante de Loschmidt, apparaît seulement au XIX^e s. Dès lors, il exprime le nombre de molécules dans une molécule-gramme ou dans 22,4 litres de gaz ($T = 0^\circ C$, $P = 1 \text{ atm}$) et, par extension, le nombre d'atomes dans l'atome-gramme, ou celui d'ions dans un ion-gramme. Le nombre ou constante d'Avogadro est voisin de $6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Les premières estimations du nombre d'Avogadro N s'obtiennent, donc, dans le cadre de la théorie cinétique des gaz. De l'équation de Clausius et Maxwell (1859), il suffit de connaître le libre parcours moyen L et le diamètre des molécules D pour déterminer leur nombre dans l'unité de volume. Toute la difficulté consiste pourtant à calculer ces deux paramètres, étant donné qu'aucune méthode au XIX^e s. ne permet la mesure directe des propriétés individuelles des molécules. Seules des estimations étaient possibles. Maxwell l'avait déjà fait pour le libre parcours moyen. Le propos de Loschmidt dans son mémoire de 1865 est de proposer une méthode pour obtenir une estimation du diamètre des molécules D. La première estimation du nombre de molécules par cm^3 se trouve dans un résumé de cet article paru la même année. Pour Loschmidt, comme souvent pour beaucoup de physiciens qui ont contribué au développement de la théorie cinétique, le nombre N n'est pas un objectif en soi, et bien souvent les calculs s'arrêtent à l'estimation de L ou de D.

Le développement de la théorie cinétique permettait de calculer N avec une précision de plus en plus grande. Le libre parcours moyen pouvait se déterminer dans le cadre des lois relatives aux phénomènes du transport, comme la diffusion et la viscosité. En 1870, William Thomson, le futur Lord Kelvin, expose dans la revue *Nature* quatre méthodes différentes pour déterminer le diamètre des molécules. L'équation de van der Waals en offrait une nouvelle approximation. Mais encore, en raison des approximations admises dans les formules, l'incertitude était environ de 30 % vers 1875.

Parmi les expériences du XIX^e s., il faut encore citer celles des physiciens Rayleigh et Röntgen qui ont déterminé, indépendamment l'un de l'autre, les diamètres moléculaires d'après l'épaisseur de couches fines d'huile étendues sur la surface de l'eau. Cette méthode a permis l'estimation de D avec une bonne approximation. En 1899, Rayleigh a encore déterminé N par une tout autre voie, en partant de la loi de diffusion de la lumière qui explique la couleur bleue du ciel.

L'étude du mouvement brownien offrait une grande

série de méthodes pour la détermination du nombre d'Avogadro. Après les travaux théoriques d'Einstein et Smolukowski (1906), Jean Perrin a obtenu les premières vérifications expérimentales par ses travaux sur les solutions colloïdales (1908). La précision dans la détermination du nombre N par ces méthodes reste encore insuffisante, d'une part parce que la formule d'Einstein-Smolukowski comprend des approximations, mais aussi à cause du caractère statistique des mesures. Cependant, les expériences de Perrin sur le mouvement brownien ont une très grande importance historique, car elles sont considérées comme des preuves de la réalité moléculaire.

Le nombre d'Avogadro est calculé avec une approximation de 1 % par le physicien américain Robert A. Millikan (1868-1953) en 1909. La méthode s'appuie sur la loi de Faraday $F = N.e$. Millikan a déterminé la charge de l'électron e au moyen de gouttelettes d'huile portant des charges négatives et tenues en suspension dans un champ électrique vertical par deux forces opposées, la force électrique et la force de gravitation. La valeur d'un faraday, quantité d'électricité d'une mole d'ions monovalents étant connue indépendamment, cette loi permet la détermination du nombre N.

Dans son célèbre livre *Les atomes* (1913), Jean Perrin expose les principes d'une série de treize méthodes indépendantes pour la détermination du nombre N, aussi variées que l'équation de van der Waals, le mouvement brownien, le bleu du ciel, le spectre du corps noir, les lois de l'électricité et les rayons X, pouvant atteindre une approximation de 0,1 % environ. Depuis, la précision s'est beaucoup améliorée, grâce notamment à l'usage des rayons X. Ces mesures portent sur des cristaux. Le nombre N est calculé d'après le rapport du volume molaire, c'est-à-dire du volume d'une mole de substance, à son volume atomique. Le premier est obtenu par la détermination de la masse molaire de la matière qui forme le cristal et par la mesure de sa densité. Le second est calculé par la technique des rayons X. Dans les années 1980, ces méthodes ont permis la détermination du nombre d'Avogadro avec une approximation proche d'un millionième.

► ALLARD G. & PERRIN F., « La structure de la matière », *Encyclopédie française*, t. II, *La physique*, 1955, p. 2.36.3-2.36.14. — HAWTHORNE R.M., « Avogadro's Number : Early values by Loschmidt and others », *J. Chem. Educ.*, 47, 1970, 751-755. — MATHIEU J.P., « Histoire de la constante d'Avogadro », *Cahiers d'histoire des sciences*, n° 9, 1984. — NOËL Y., « Éléments de l'histoire d'une unité, celle de quantité chimique, la mole, depuis 1893 », in WITTHÖFT H., *Die historische Metrologie in den Wissenschaften*, Scripta Mercatorum Verlag, 1986, p. 169-181. — PERRIN J., *Les atomes* (1913), Paris, dernière éd., Flammarion « Champs », 1991. — SACCONI A. et al., « Towards the Avogadro Constant - Preliminary Results on the Molar Volume of Silicon », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 38, 1989, 200-205.

Catherine KOUNELIS

→ Atome ; Avogadro (Loi d') ; Gaz (Théorie des) ; Mole ; Probabilité (PHYSIQUE).

AXIOMATISATION ET FORMALISATION

MATHÉMATIQUES

Depuis son origine en Grèce Antique jusqu'à nos jours, l'axiomatisation a été un mode de présentation souvent associé à la rigueur mathématique. Mais le statut et la fonction des axiomes varient au cours de l'histoire et il est difficile, même en se restreignant aux mathématiques comme nous le ferons ici, de donner un sens précis à la notion de formalisation. Il apparaît néanmoins que des systèmes d'axiomes, anciens mais aussi récents, ne recourent pas nécessairement à des expressions symboliques. L'axiomatisation apparaît aussi souvent comme un recours privilégié pour mettre un terme aux troubles philosophiques que les mathématiques peuvent parfois connaître...

La Grèce Antique et les origines de l'axiomatisation

La pensée grecque antique se distingue par une pratique du raisonnement qui a façonné à la fois la philosophie, les sciences et la vie politique. Le corpus des œuvres qui nous sont parvenues présente, entre autres caractéristiques remarquables, la double originalité de contenir d'une part des textes scientifiques, notamment mathématiques, présentés sous forme axiomatique et qui sont généralement reconnus comme des modèles de rigueur, et de contenir d'autre part des écrits philosophiques développant une réflexion sur les sciences et leurs principes.

En mathématiques, les *Éléments* d'Euclide (~ 300 av. J.-C.) constituent incontestablement le document le plus ancien et le plus achevé qui nous soit parvenu dans lequel l'arithmétique et la géométrie sont présentées sous forme axiomatique. Composés de treize livres, ils présentent un enchaînement de propositions et de démonstrations qui ne font appel qu'à des propositions déjà démontrées ou à des énoncés premiers (définitions, postulats et notions communes), introduits antérieurement. De plus, ces propositions et leurs démonstrations portent toujours sur des grandeurs, des nombres ou des figures considérés dans leur généralité et non sur des valeurs ou des figures particulières. Le texte est aussi dépourvu d'introduction, de commentaires et d'exemples. Les énoncés sont ainsi formulés avec une généralité caractéristique qui semble sans précédent, notamment dans les mathématiques babyloniennes ou égyptiennes que nous connaissons surtout à travers des problèmes numériques concrets, sinon réalistes. Par ailleurs, le refus de tout fondement empirique conduit leur auteur à donner des démonstrations de propositions dont la validité est évidente (par exemple que deux cercles distincts ont au plus deux points communs). Ces *Éléments* constituent l'exemple rare d'une œuvre prise tout au long de l'histoire comme référence pour sa rigueur, depuis l'Antiquité (en témoigne par exemple Proclus, 410-485) jusqu'à Bourbaki, en passant par les traditions médiévales arabe et

latine, les savants du XVII^e s. et les géomètres italiens de la fin du XIX^e s. Inversement, il n'est pas rare de voir refuser tout caractère démonstratif à des textes mathématiques, antérieurs ou postérieurs, qui ne seraient pas présentés sous cette forme ou qui ne seraient pas susceptibles de l'être.

Mais ces caractéristiques et cette postérité ne permettent pourtant pas de conclure à une conception immuable et universelle de l'axiomatisation. Ainsi, Euclide distingue parmi les énoncés premiers les définitions, les postulats et les notions communes, distinctions qui ne coïncident pas exactement avec celles à l'œuvre chez d'autres auteurs grecs, tels Aristote, Archimède ou Proclus. De plus, certaines définitions des *Éléments*, comme celle de la ligne définie comme une longueur sans largeur, ne sont jamais utilisées dans la suite du texte et ne sont d'ailleurs nullement opératoires, mais sans qu'il en soit pour autant ainsi de toutes les définitions.

Les *Éléments* d'Euclide n'ont pas tant pour objet de découvrir des propositions nouvelles que de présenter en suivant un ordre logique un grand ensemble de propositions généralement connues. Ils ont ainsi une visée systématique et didactique pour laquelle les exposés axiomatiques semblent convenir. Mais cette présentation et sa rigueur constituent aussi un cadre rigide que certains historiens ont pu évoquer pour expliquer la relative stagnation du développement des mathématiques pendant de nombreux siècles. Néanmoins, cette présentation n'est pas propre à ce genre de texte. Elle se retrouve aussi dans d'autres ouvrages, comme certains traités de physique ou de mathématiques d'Archimède consacrés à des résultats nouveaux ou à des problèmes jusque-là non résolus.

Si l'on considère maintenant le corpus philosophique, il faut s'arrêter sur les *Seconds analytiques* d'Aristote (384-322 av. J.-C.) qui sont consacrés à l'examen des principes généraux des sciences démonstratives. Ils portent principalement sur la distinction entre démonstrations et principes, ces derniers étant nécessaires à celles-ci tout en étant indémonstrables. Aristote distingue trois types de principes : les hypothèses qui posent l'existence d'une chose, les définitions qui en donnent la signification et les axiomes qui sont communs à toutes les sciences indépendamment du genre de leur sujet (par exemple : si, de choses égales, on ôte des choses égales, les restes sont égaux). La nature de la connaissance des principes est différente de celle des conclusions obtenues par démonstration : les principes sont connus par induction et il n'y a de science démonstrative que pour les conclusions, de sorte qu'en ce qui concerne les principes eux-mêmes, le géomètre, en tant que géomètre, ne doit pas en rendre raison » (*Seconds analytiques*, I 12, 77b5). Ainsi, ce qui est connu par principe ne peut l'être par démonstration et inversement. Il y a de plus pour Aristote une antériorité essentielle des principes, comme il y a une antériorité essentielle des prémisses sur les conclusions, et l'ordre dans lequel les théorèmes se

succèdent n'est pas conventionnel mais déterminé par le sujet étudié. De la même manière, chaque science relève selon lui d'un genre propre (par exemple, la géométrie traite des grandeurs, et l'arithmétique des nombres) et le rapport des genres entre eux détermine la hiérarchie des sciences entre elles (l'optique est par exemple subordonnée à la géométrie). Les démonstrations et les principes ne peuvent être repris à l'identique dans un autre genre, mais les axiomes font exception, et encore ne sont-ils communs que par analogie. Par ailleurs, Aristote affirme clairement que la science porte sur des prédicats universels et non particuliers. Elle est ainsi entièrement intelligible de sorte qu'une qualité qui pourrait être connue par la perception (il donne comme exemple l'égalité de la somme des angles d'un triangle à deux droits) devrait encore être démontrée. Une science est aussi d'autant plus exacte que la part du substrat de son sujet est réduite. Dès lors qu'en mathématiques tout substrat a été abstrait, celles-ci ne considèrent que des formes, ce qui n'exclut pas qu'elles se rapportent à des sujets et à des genres différents. Aristote développe ainsi une conception axiomatique des sciences démonstratives qui s'étend au-delà des mathématiques, même si celles-ci en constituent un exemple privilégié. Mais l'idée selon laquelle une science porte sur les rapports entre attributs d'un même sujet organise l'ensemble de sa réflexion et le conduit, en particulier, à réduire la notion de démonstration à celle de syllogisme.

Du fait même de ces développements à la fois philosophiques et mathématiques, l'origine de l'axiomatisation des sciences, et particulièrement celle des mathématiques, reste une question controversée parmi les historiens. Pour certains, cette origine est philosophique, pour d'autres, elle est mathématique. Certains des partisans d'une origine philosophique voient dans l'axiomatisation l'influence directe des philosophes éléates, principalement Parménide et Zénon : le refus par ces philosophes de l'empirisme et leur recours au raisonnement par l'absurde seraient à l'origine du genre de démonstration à l'œuvre dans les *Éléments* d'Euclide. D'autres défenseurs de l'origine philosophique font jouer un rôle déterminant à Platon et son Académie ou encore à Aristote, en raison notamment de ses réflexions sur les sciences déductives et leurs principes exposées dans ses *Seconds analytiques*. Ceux qui défendent un développement interne aux mathématiques mettent plutôt l'accent sur les grandeurs incommensurables : ce serait la découverte de ces grandeurs qui ne sont pas le rapport de deux grandeurs qui aurait obligé les mathématiciens à rompre avec l'intuition, à douter de l'existence de leurs objets et à adopter un point de vue axiomatique. Évidemment, suivant qu'il s'inscrit dans l'une ou l'autre de ces deux perspectives, l'historien est conduit à des interprétations différentes des sources et de leur cohérence, et les avis peuvent ainsi diverger sur la conformité des distinctions entre les principes adoptés dans les *Éléments* d'Euclide et celles établies par Aristote dans les *Seconds analytiques*.

Du développement des nouvelles géométries aux Grundlagen der Geometrie de Hilbert

Dès l'Antiquité et jusqu'au XIX^e s., les mathématiciens n'ont pas manqué de s'interroger sur la possibilité de démontrer le postulat d'Euclide relatif à l'existence d'une droite parallèle à une autre droite et passant par un point donné extérieur à celle-ci. Durant toute cette période, de nombreuses tentatives ont été faites pour démontrer que ce postulat était une conséquence des autres principes de la géométrie. Ces recherches, motivées par le refus d'accepter comme principe une proposition qui pourrait être démontrée, connurent un nouveau développement au cours du XIX^e s. et contribuèrent ainsi au renouvellement, à la fin de ce siècle, du rôle de l'axiomatisation en mathématiques et plus généralement dans les sciences.

Au début du XIX^e s., plusieurs travaux ont montré qu'il était possible de développer des systèmes de propositions dans lesquels le fameux postulat d'Euclide n'était pas vérifié. L'absence de contradiction apparente au sein de ces systèmes a d'abord été la seule garantie de leur consistance, jusqu'à ce que Felix Klein (1849-1925) en donne en 1873 une interprétation à l'intérieur de la géométrie euclidienne. Dès lors, si les géométries non euclidiennes étaient contradictoires, la géométrie euclidienne devait l'être aussi et donc les géométries non euclidiennes se révélaient aussi consistantes que la géométrie euclidienne. Obtenir ce type de résultat requiert, comme en géométrie projective, de donner aux points et aux droites des interprétations inhabituelles : il faut, par exemple, que le terme « point » puisse désigner une droite de l'espace euclidien, que celui de « droite » puisse désigner inversement un point, ou encore un demi-cercle ou un plan... L'interprétation des énoncés (théorèmes ou axiomes) n'est dès lors plus univoque et donnée par le modèle unique, l'espace euclidien à trois dimensions, pour lequel ils ont été introduits. Cette pluralité transforme une conception de l'axiomatisation établie depuis l'Antiquité et conduit à désolidariser la signification et la validité d'un énoncé de sa signification géométrique originale. Cette pluralité conduit aussi à une question nouvelle : ces géométries étant toutes aussi consistantes, laquelle rend compte de la géométrie de l'espace physique ? Ainsi, Gauss (1777-1855), Lobatchevski (1792-1856), Riemann (1826-1866) et Helmholtz (1821-1894) peuvent envisager des expériences qui permettraient de trancher cette question, que les physiciens ne cessent depuis de se poser... Il est aussi remarquable qu'une fois de plus les conséquences de ces développements mathématiques, joints à ceux de la logique, aient été discutées par des mathématiciens et des philosophes, les discussions portant sur le caractère *a priori* et intuitifs des axiomes de la géométrie euclidienne ainsi que sur leur aptitude à saisir les formes transcendantes de l'intuition. Pour certains, les géométries non euclidiennes confirment la métaphysique kantienne, pour d'autres elles rendent

nécessaires certains aménagements quand elles ne la ruinent pas.

Les *Grundlagen der Geometrie* de Hilbert (1862-1943), publiés en 1899, s'inscrivent dans ce vaste courant de recherches géométriques développées tout au long du XIX^e s. en même temps qu'ils inaugurent un changement profond de leurs perspectives. Hilbert considère dans ce livre une vingtaine d'axiomes regroupés suivant les relations et les propriétés géométriques qu'ils expriment intuitivement : l'appartenance (pour le plan et l'espace), l'ordre (pour la droite et le plan), la congruence (pour la droite et le plan), l'axiome des parallèles et la continuité. Les points, les droites et les plans auxquels se rapportent ces axiomes sont d'emblée détachés de leurs représentations intuitives habituelles pour n'être plus que « trois systèmes différents de choses » qui ne se distinguent les uns des autres que par le type de lettres qui sert à les désigner dans les axiomes et les propositions. Cette conception n'est pas nouvelle, elle parcourt tout le XIX^e s., mais Hilbert va en faire un usage qui est, lui, nouveau.

L'étude des géométries non euclidiennes et projectives a déjà conduit à analyser la non-contradiction et l'indépendance des axiomes en donnant diverses interprétations géométriques aux points, aux droites et aux plans. En particulier, le recours à une représentation analytique (c'est-à-dire à un système de coordonnées réelles) a permis de ramener la question de la consistance de ces systèmes d'axiomes géométriques à celle de l'arithmétique des nombres réels. Hilbert reprend cette technique, mais en considérant aussi les nombres réels à partir d'un système d'axiomes. Une partie de ces axiomes ne caractérisera plus les nombres réels mais pourra néanmoins suffire à définir un système de coordonnées et donc à construire une géométrie avec des points, des droites et des plans, définis par leurs équations. Hilbert appelle de tels systèmes d'axiomes des « systèmes complexes de nombres ». Jouant sur la pluralité des interprétations qu'il est possible de donner à un « système de nombres », il peut par exemple, en prenant pour celui-ci les nombres réels, établir la consistance de l'ensemble des cinq groupes d'axiomes. En prenant l'ensemble des nombres algébriques, il peut montrer l'indépendance de l'un d'eux (axiome d'intégrité) par rapport aux autres. Mais l'intérêt de cette axiomatisation des nombres réels et des « systèmes complexes de nombres » apparaît avec l'élaboration d'une « géométrie non archimédienne ». Pour construire une telle géométrie, dans laquelle les axiomes des cinq groupes sont valables, à l'exception de l'axiome d'Archimède, Hilbert prend cette fois comme « système complexe de nombres » un ensemble de fonctions (en l'occurrence algébriques) : un « point » est dès lors un triplet (x, y, z) , où x, y et z ne sont pas des nombres réels, mais des fonctions ! L'axiomatisation et l'exclusion de l'intuition géométrique n'est plus ici seulement une intention déclarée, plus ou moins satisfaisante : elle sert à démontrer l'indépendance d'un axiome. De plus, non seulement les points et les droites de cette géométrie non

archimédienne n'ont plus effectivement leur interprétation habituelle, comme c'était déjà le cas avec les géométries non euclidiennes et projectives, mais surtout, ils ne sont même pas représentables dans l'espace euclidien à l'intérieur duquel s'inscrivaient jusque-là essentiellement ces géométries.

Considérant inversement une partie de son système d'axiomes géométriques, Hilbert peut définir une addition et une multiplication sur les segments qui vont à leur tour satisfaire une partie du système d'axiomes associé aux nombres réels. À un système d'axiomes géométriques va dès lors correspondre un « système complexe de nombres » dont les caractéristiques respectives peuvent être mises en correspondance. Ainsi, à un système d'axiomes dans lequel il est possible de démontrer un théorème géométrique donné va correspondre un système arithmétique dont, par exemple, la multiplication sera commutative, ou dont l'addition sera associative et commutative, etc. Hilbert construit donc d'une part des géométries à partir de représentations analytiques fondées sur des « systèmes complexes de nombres » et, d'autre part, il associe inversement un système de nombre à un système d'axiomes d'une géométrie. Cette correspondance à double sens, fondée à la fois sur l'axiomatisation de la géométrie et celle des nombres réels, permet d'établir que tel théorème (en l'occurrence le théorème de Pascal) ne peut être démontré sans le recours à certains axiomes (en l'occurrence ceux d'appartenance, relatifs à l'espace, ou ceux de la congruence, même avec l'aide des axiomes de continuité). Ainsi, non seulement la validité de ce théorème est rapportée aux systèmes d'axiomes à partir desquels il est possible ou non de le dériver, et non à une signification géométrique intrinsèque et univoque, mais surtout, changeant de niveau d'analyse, Hilbert est en mesure de déterminer des conditions générales sur les systèmes d'axiomes à l'intérieur desquels il est possible de le démontrer. La question n'est donc plus seulement de savoir s'il est ou non possible de démontrer un théorème géométrique (en l'occurrence élémentaire...) à partir d'un système d'axiomes donné, mais plutôt de démontrer un théorème métamathématique (ou plus simplement logique) sur les systèmes d'axiomes dans lesquels il est possible de démontrer ce théorème géométrique. À la différence des nombreux travaux contemporains qui offrent des axiomatisations de la géométrie, ou même de l'arithmétique, de la logique et plus tard de la théorie des ensembles, il ne s'agit pas tant de proposer un système d'axiomes adapté à l'un de ces domaines que de développer une analyse mathématique d'un tel système d'axiomes. En particulier, la mise entre parenthèses de la signification géométrique habituelle des termes et des propositions n'est pas seulement liée à un mode d'exposition répondant à des exigences de clarté et de rigueur ; elle est un principe nécessaire à la démonstration de certains théorèmes. Toute discussion d'ordre philosophique ou expérimentale sur la nature et le statut des axiomes a été ici écartée : les problèmes

qui sont discutés sont tous tranchés par des démonstrations exclusivement mathématiques.

Comme la plupart des travaux de la fin du XIX^e s. consacrés à l'axiomatisation des géométries non euclidiennes et projectives, les *Grundlagen der Geometrie* de Hilbert recourent à un langage qui ne comprend guère plus d'expressions symboliques que les *Éléments* d'Euclide ou les *Seconds analytiques* d'Aristote ! C'est avec les travaux sur la logique et l'arithmétique de Frege, de Peano, de Russell et ceux plus tardifs de Hilbert que les systèmes d'axiomes seront formulés au moyen de semblables expressions.

Logique formelle et axiomatisation de l'arithmétique

Leibniz (1646-1716) eut toute sa vie le projet d'une caractéristique universelle qui devait lui permettre de réduire le raisonnement à un calcul : « C'est le but principal de cette grande science que j'ay accoutumé d'appeler *Caractéristique*, dont ce que nous appellons l'Algebre n'est qu'une branche forte petite. Car c'est la Caractéristique qui donne les paroles aux langues, les lettres aux paroles, les chiffres à l'Arithmétique, les notes à la Musique ; c'est elle qui nous apprend le secret de fixer le raisonnement, et de l'obliger à laisser comme des traces visibles sur le papier en petit volume, pour estre examiné à loisir : c'est enfin elle, qui nous fait raisonner à peu de frais, en mettant des caracteres à la place des choses, pour des-embarrasser l'imagination » (*De la méthode de l'Universalité*).

Mais ce vaste projet, dont le calcul différentiel était pour Leibniz un « échantillon », n'eut guère de postérité mathématique avant le XIX^e s. Indépendamment de toute volonté d'axiomatiser, les algébristes anglais (Woodhouse, 1773-1827 ; Peacock, 1791-1858 ; Gregory, 1813-1844 ; De Morgan, 1806-1871, etc.) ont développé l'algèbre symbolique qu'ils ont étendue au calcul différentiel et intégral, retenant surtout la permanence de certaines relations algébriques à travers la diversité des interprétations de leurs symboles. C'est dans ce prolongement que George Boole (1815-1864) exprime par des équations arithmétiques les lois de la pensée qui gouvernent nos raisonnements. La forme de la logique est alors donnée par le symbolisme arithmétique qui ne s'applique plus à des nombres (entiers, négatifs, réels ou imaginaires...) mais à des classes d'objets (celle des « hommes », par exemple). Les symboles 0 et 1 représentent respectivement la classe vide et celle de tous les objets, l'addition le « ou » et la multiplication le « et ». Comme les autres algébristes anglais, Boole a repris un formalisme algébrique, dérivé de l'arithmétique, dont il a adapté les règles aux relations logiques. Ce rapport entre la logique et l'arithmétique s'inverse en quelque sorte vers la fin du XIX^e s. avec les « logisticiens » (Frege, 1848-1925 ; Russell, 1872-1970 ; mais aussi Dedekind, 1831-1916) qui entendent, eux, réduire les mathématiques à la logique et montrer que les axiomes mathématiques, et principalement ceux de l'arithmétique, sont en fait des théorèmes de la logique. Parmi

eux, Frege et Russell s'accordent pour dénoncer l'aptitude du langage naturel à rendre les rapports logiques et proposent de réduire tous les raisonnements mathématiques, et notamment ceux de l'arithmétique, à la combinaison de signes suivant des règles logiques. Ainsi, Frege remplace dans sa logique les concepts grammaticaux de sujet et de prédicat par ceux de fonction et d'argument. Cela lui permet notamment de considérer des propositions avec des quantificateurs universels et existentiels, et ainsi de rendre compte de plus de raisonnements mathématiques que ne le permettraient la logique aristotélicienne et l'algèbre booléenne. Il précise aussi les règles de déductions, restées jusque-là implicites. Mais si Frege entend élaborer des systèmes de signes capables d'exprimer tous les raisonnements mathématiques, il s'oppose néanmoins aux formalistes pour qui les mathématiques et la logique se réduisent à la manipulation de signes imprimés sur le papier. Pour lui, au contraire, les signes sont « une présentation intuitive des formes de pensée » : « Je n'ai pas voulu donner en formules une logique abstraite, mais donner l'expression d'un contenu au moyen de signes écrits, et d'une manière plus précise et plus claire au regard que cela n'est possible au moyen des mots » (« Sur le but de l'idéographie »). Ce faisant, il s'oppose aussi à Kant, car ces formes de pensée ne font intervenir aucune intuition, même *a priori*.

Dans son *Arithmetices principia nova methodo exposita* (1889), Peano (1858-1932) n'entend pas, lui, réduire l'arithmétique à la logique. Il propose au contraire des systèmes d'axiomes distincts pour l'arithmétique et pour la géométrie. Chaque théorie a ainsi des axiomes propres et des signes propres pour désigner ses entités, le symbolisme logique leur étant commun : « Un résultat de cette analyse était la construction d'un graphisme symbolique, ou idéographie, capable de représenter toutes les idées de la logique, de sorte qu'en introduisant des symboles pour représenter les idées des autres sciences, on peut exprimer chaque théorie de manière symbolique » (« *Studi di logica matematica* », 1896). Soucieux à la fois de s'exprimer dans un langage international et d'assurer la rigueur des mathématiques, Peano dénonce les ambiguïtés du langage ordinaire et développe pour y pallier un langage formulaire dans lequel les propositions ont « la forme et la précision » qu'ont les équations en algèbre. Sur la base de ces idées, il coordonna la publication d'un *Formulaire de mathématiques* en cinq volumes dans lequel les différentes branches des mathématiques sont exposées par une succession quasiment ininterrompue de formules. C'est aussi l'aspect des *Principia Mathematica* (1910) dans lesquelles Whitehead et Russell proposent un traitement cette fois unifié des mathématiques fondé sur la logique des propositions et un calcul des classes et des relations.

Ces travaux et ces positions donneront lieu à une polémique peu amène entre Poincaré (1854-1912) et Russell, Zermelo (1871-1953) et Couturat, héritier du logicisme en France. Poincaré s'est à cette occasion opposé au réductionnisme logique en défendant que

l'intuition était un guide dont le géomètre ne pouvait se passer pour choisir la meilleure construction parmi toutes celles que l'analyse logique lui fournit. La réduction de l'arithmétique à la logique conduit aussi selon lui à un cercle vicieux auquel les formules de Peano ne peuvent rien puisque les logisticiens seront obligés pour réaliser leur programme de recourir au principe d'induction (une propriété est vraie pour tous les entiers si elle est vraie pour 1, et si l'on peut démontrer qu'elle est vraie pour $n + 1$ en supposant qu'elle l'est pour n). Plus efficaces que les arguments de Poincaré, les antinomies révélées au tout début du siècle ont ébranlé ces différents systèmes logiques ainsi que la théorie des ensembles naissante. Elles ont amené la logique à se détacher progressivement de ces questions de fondements pour devenir elle-même un champ propre des mathématiques qui produit depuis son lot de théorèmes (au premier rang desquels, les fameux théorèmes d'incomplétude de Gödel et les démonstrations de la consistance et de l'indépendance de nombreux axiomes, notamment l'axiome du choix et l'hypothèse du continu) et qui résout à l'occasion des problèmes que les mathématiciens ont eux-mêmes formulés sans pouvoir les résoudre ou qui en donne de nouvelles démonstrations.

Axiomatisation et structures mathématiques

L'axiomatisation en mathématiques n'a pas été cantonnée aux recherches sur les fondements. Elle a été aussi développée vers la fin du XIX^e et surtout à partir du début du XX^e s. avec notamment les travaux de Dedekind (1831-1916) puis ceux de Steinitz (1871-1928), d'Artin (1898-1962) et d'Emmy Noether (1882-1935), d'abord principalement en algèbre puis plus généralement en topologie, en analyse fonctionnelle, etc. Le livre de van der Waerden *Modern Algebra* (1930) présente la synthèse de ces recherches en algèbre. Par opposition aux systèmes d'axiomes servant à décrire une réalité essentiellement unique (géométrie, arithmétique, etc.) et devant caractériser celle-ci de manière économique mais surtout complète, l'intérêt du recours à des systèmes d'axiomes réside ici au contraire dans la diversité de leurs interprétations. La structure de « corps » est ainsi définie par des axiomes que satisfont différents ensembles de nombres (rationnels, algébriques, réels et leurs extensions) mais qui s'appliquent aussi aux fonctions algébriques. Un théorème démontré à partir de ces axiomes est valable pour n'importe quel ensemble d'objets vérifiant ces axiomes. Cela permet des rapprochements inattendus entre des domaines auparavant traités séparément ainsi que l'extension à d'autres ensembles de théorèmes démontrés, par exemple, pour des nombres, la décomposition d'un nombre entier en un produit de nombres premiers ayant joué ici un rôle particulièrement important. Ces structures sont généralement définies par un petit nombre d'axiomes qui doivent être suffisamment généraux pour avoir des interprétations variées, mais aussi suffisamment riches pour permettre la

reproduction des démonstrations des théorèmes souhaités. L'axiomatisation permet ainsi de donner un traitement mathématique de certaines analogies. Les questions telles que la consistance, l'indépendance et la complétude, essentielles dans les recherches sur les fondements et en logique, importent peu ici. Par ailleurs, ces travaux utilisent le langage ordinaire sans introduire de symbolismes particuliers comme l'ont fait Frege, Peano, Russell, etc. Si ces structures sont « abstraites », dans la mesure où il n'est fait dans les démonstrations aucune référence aux interprétations possibles des axiomes, leur intérêt est avant tout de permettre la mise en correspondance de domaines différents des mathématiques et de transporter de l'un à l'autre les « intuitions » propres à chacun. Ainsi, par exemple, la topologie algébrique recourt à des structures algébriques pour résoudre, partiellement, des problèmes de topologie. Alors que les mathématiques connaissent au XX^e s. un développement et un éclatement sans précédent, ces structures permettent d'en dégager l'unité, à la fois par un traitement axiomatique commun et par la circulation qu'elles permettent entre les diverses théories, mais elles maintiennent aussi des distinctions liées aux intuitions auxquelles chacune d'elles est en définitive associée dans l'esprit des mathématiciens qui les utilisent. Cette circulation entre les théories aura été un des traits caractéristiques des mathématiques du XX^e s., comme cela ressort des intitulés des disciplines développées au cours de ce siècle : topologie algébrique, géométrie algébrique, arithmétique géométrique, logique algébrique (théorie des modèles), etc. Le groupe de mathématiciens français Bourbaki a développé de manière systématique ce point de vue dans ses *Éléments de mathématiques* (sous-titré « Les structures fondamentales de l'analyse ») dont le premier volume paraît en 1940. Reconnu pour sa rigueur et sa clarté mais aussi critiqué pour son abstraction jugée parfois excessive, cet ouvrage influença largement la conception des mathématiques de la seconde moitié du XX^e s. Cette influence s'étendit, notamment en France, jusqu'aux programmes de l'enseignement des mathématiques, de l'université à la maternelle !

► ARISTOTE, *Les Seconds Analytiques*, trad. fr. J. Tricot, Paris, Vrin, 1995. — BANACHI S., « Sur les opérations dans les ensembles abstraits et leur application aux équations intégrales », *Fundamenta Mathematicae*, 1922, 3, p. 133-181. — BELHOSTE B., GISPERT H. & HULIN N. dir., *Les sciences au lycée. Un siècle de réformes des mathématiques et de la physique en France et à l'étranger*, Paris, Vuibert-INRP, 1996. — BLANCHÉ R., *L'axiomatique*, Paris, PUF « Quadrige », 1990 ; *La logique et son histoire d'Aristote à Russell*, Paris, A. Colin, 1970. — BOURBAKI N., « L'architecture des mathématiques », *Les grands courants de la pensée mathématique*, Paris, Le Lionnais F., 1948. — CORRY L., *Modern Algebra and the Rise of Mathematical Structures*, Bâle, Birkhäuser, 1996. — COUTURAT L., *La logique de Leibniz*, Paris, 1901 ; « Pour la logistique », *Revue de Métaphysique et de Morale*, 1906, 14, p. 208-250. — DEDEKIND R., « Sur la théorie des nombres entiers algébriques », *Bulletin des sciences mathématiques*, 1877, 9, p. 1-121. — EUCLIDE, *Les Éléments*, trad. et comm. B. Vitrac,

Paris, PUF, 1990-1994. — FREGE G., *Begriffsschrift* (1879), trad. angl. in VAN HEIJENOORT J. dir., *From Frege to Gödel. A source book in Mathematical Logic, 1879-1931*, Harvard, Harvard Univ. Press, 1967, p. 5-82. — FREUDENTHAL H., « The main trends in the foundations of geometry in the 19th century », *Logic, Methodology and Phil. a. Science*, Proc. 1960 Int. Congress, Stanford, 1962. — FRIEDMAN M., *Kant and the Exact sciences*, Cambridge (Mass.)/Londres, Harvard Univ. Press, 1992. — GUILLAUME M., « Axiomatique et logique », in DIEUDONNÉ J. dir., *Abrégé d'histoire des mathématiques 1700-1900*, Paris, Hermann, 1978. — HEINZMANN G., *Poincaré, Russell, Zermelo et Peano. Textes de la discussion (1906-1912) sur les fondements des mathématiques : des antinomies à la prédicativité*, Paris, Blanchard, 1986. — HELMHOLTZ H. VON, « The Origin and Meaning of Geometrical Axioms », *Mind*, 1876, 1, p. 303-321. — HILBERT D., « Axiomatisches Denken », *Mathematische Annalen*, 78, 1918, p. 405-415 ; *Grundlagen der Geometrie*, Leipzig, 1899 (trad. fr. P. Rossier, *Les fondements de la géométrie*, Paris, Dunod, 1971). — HINTIKKA J., GRUENDER D. & AGAZZI E. dir., *Theory of Change, Ancient Axiomatics, and Galileo's Methodology*, Proceedings of the 1978 Pisa conference on the History and Philosophy of Science, Dordrecht/Boston/Londres, D. Reidel Publ. Co, 1981. — HOUZEL C., « Histoire de la théorie des parallèles », in RASHED R. dir., *Mathématiques et philosophie, de l'Antiquité à l'Âge classique*, Paris, Ed. du CNRS, 1991. — KENNEDY H.C., « The Origins of Modern Axiomatics : Pasch to Peano », *American Mathematical Monthly*, 1972, 79, p. 133-136. — KLEIN F., « Über die

sogenannte Nicht-Euklidische Geometrie II », *Mathematische Annalen*, 1873, 6. — LARGEAULT J., *Intuitionnisme et théorie de la démonstration*, Paris, Vrin « Mathesis », 1992. — LEIBNIZ, *La caractéristique géométrique*, Paris, Vrin « Mathesis », 1995. — NOETHER E., « Idealtheorie in Ringbereichen », *Mathematische Annalen*, 1921, 83, p. 24-60. — PASCH M., *Vorlesungen über neuere Geometrie*, Leipzig, Teubner, 1882. — PEANO G., *Aritmetices principia, nova methodo exposita*, Turin, Bocca, 1889. — RUSSELL B. & WHITEHEAD N., *Principia mathematica*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1910-1913. — SEGRE M., « Peano's Axioms in their Historical Context », *Archives for History of Exact Sciences*, 1994, 48, p. 201-342. — SINACEUR H., *Corps et théorie des modèles*, Paris, Vrin « Mathesis », 1991. — STEINITZ E., « Algebraische Theorie der Körper », *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1910, 137, p. 167-302. — SZABÓ Á., *Les débuts des mathématiques grecques*, Paris, Vrin, 1977. — VAN HEIJENOORT J. dir., *From Frege to Gödel. A source book in Mathematical Logic, 1879-1931*, Harvard, Harvard Univ. Press, 1967. — WAERDEN B.L. VAN DER, *Moderne Algebra*, Berlin, Springer, 1930. — WEYL H., « A half-century of Mathematics », *American Mathematical Monthly*, 1951, 58, p. 523-553.

Alain HERREMAN

→ Catégories et foncteurs ; Démonstration ; Formalisme ; Géométries ; Local et global ; Logicisme ; Structure ; Transformation géométrique.

B

BABBAGE Charles, 1792-1871

Charles Babbage est connu pour son ouvrage de 1832 *De l'économie machinale* (*On the economy of machinery*), publié à Londres, et largement commenté par Karl Marx dans le premier livre du *Capital*. C'est avec Andrew Ure, également cité et critiqué par Marx, un classique de la « philosophie des manufactures ». Il est un fondateur pour toute étude de la rationalité indissociablement économique et technique dans l'entreprise.

Sa découverte tient à la mise en évidence des mutations radicales subies par un procédé de fabrication, dès lors que le procédé de la division technique (« manufacturière ») du travail s'y applique, et du gain financier qui découle de cette révolution des méthodes. Babbage fait un compte arithmétique de ces mutations coordonnées dans les branches de la production qui appliquent le principe de la division des tâches. Il observe que « lorsque l'expérience a appris, selon la nature particulière des produits de chaque manufacture, tant à diviser l'art de fabriquer qu'à compter le nombre de travailleurs nécessaires (à chacune des opérations), tout établissement ne disposant pas d'un multiple exact de ce nombre fabriquera à plus haut coût » (chap. 21, p. 172-173). Cette arithmétique fait faire un saut qualitatif à la production : « Du moment qu'on partage le travail en nombreuses opérations distinctes, requérant chacune un degré distinct de force et de dextérité, le manufacturier peut se procurer précisément le quantum nécessaire à chaque opération. »

À la suite de Mandeville et d'Adam Smith, mais aussi avant les travaux de H. Simon, Babbage a contribué à fonder une théorie expérimentale de la production industrielle.

► MARX K., *Le Capital*, Œuvres, Paris, Gallimard, 1956, t. I.
- URE A., *The philosophy of manufactures*, Frank Cass & Co, 1967.

François GUÉRY

→ Computation ; Informatique.

BACHELARD Gaston, 1884-1962

Philosophe et épistémologue français. Professeur de physique et de chimie au collège de sa ville natale à partir de 1919, G. Bachelard commence des études de

philosophie (licence en 1920, agrégation en 1922). En 1927, il soutient sa thèse de philosophie, qui sera couronnée l'année suivante par l'Académie des sciences, et donnera lieu à la publication de *L'essai sur la connaissance approchée*. En 1930, il est nommé professeur de philosophie des sciences à la Faculté de Dijon. En 1938 sont publiés les deux ouvrages qui inaugurent l'allure double de son œuvre (épistémologique et poétique) : *La formation de l'esprit scientifique*, qui introduit le concept d'obstacle épistémologique et ouvre une nouvelle direction de questionnement sur la science (instaurant l'erreur, et non plus la vérité, l'imagination et non plus la raison, au centre de la réflexion épistémologique), et *La psychanalyse du feu*, où il engage une méditation sur les éléments dont Empédocle et après lui toute une tradition alchimique soutenaient qu'ils constituaient les fondements de l'univers : le feu, l'eau, la terre, l'air.

En 1940, il prend, à la Sorbonne, la succession d'Abel Rey et la direction de l'Institut d'Histoire des Sciences et des Techniques. Il y développera ses recherches dans les deux directions inaugurées par les publications de l'année 1938. Au cours des années d'après-guerre, l'imagination apparaît comme un objet de controverses (Sartre, par exemple, dans *L'être et le néant*, déclare, à propos des premiers livres de Bachelard consacrés à l'imagination : « À vrai dire, ce terme d'imagination ne nous convient pas, ni non plus cette tentative de chercher derrière les choses et leur matière gélatineuse, solide ou fluide, les images que nous y "projetterions" », Paris, Gallimard, 1943) et bientôt comme un thème de recherche. Lorsqu'en 1947 Gilbert Durand, jeune agrégé de philosophie, entame sous la direction de Gaston Bachelard des recherches qui aboutiront à la publication des *Structures anthropologiques de l'imaginaire* (Paris, Dunod, 1969), il engage le processus par lequel des réflexions encore préliminaires s'extraient de cet état pour accéder au titre de thème de recherche universitaire. Quelques années plus tard, Gilbert Durand créera, à l'université de Chambéry, le Centre de Recherche sur l'Imaginaire.

Les poèmes sont des images

Le 5 mars 1953 Joseph Staline meurt à Moscou. Le même jour, dans la même ville, s'éteint le compositeur Sergéï Prokofiev à l'âge de 67 ans. La musique, voilà

- bien une chose dont Bachelard a peu parlé, lui, le lecteur de Schopenhauer (lequel avait si bien su utiliser contre Kant toutes les ressources que pouvait contenir la considération de l'émotion musicale). Étrangement peu parlé, même, préférant décrire les poèmes comme des images plutôt que comme des sons, ou comme des mots.

Que l'on songe à Edgar Degas qui, se plaignant auprès de Stéphane Mallarmé de ne pas parvenir à écrire des poèmes alors qu'il avait « des idées », s'entendit répondre que la poésie se faisait non pas avec des idées mais avec des mots. Sentence que Paul Valéry rapporte en ajoutant qu'elle comporte une grande leçon de poésie. Alors quelle grande leçon de philosophie (pour autant qu'il existe des leçons en philosophie) comporte l'annexion des poèmes (faits de mots, suivant la leçon de Mallarmé) sous la catégorie de l'image ?

Mais, tout d'abord, où Bachelard rend-il raison de cette anxiété, où pose-t-il nettement la question de la pertinence de l'idée d'image littéraire ? A cette question on peut trouver des éléments de réponse dans quelques-unes de ses notes, mais non pas toutefois la réponse. Et ceci pour la raison simple et essentielle que cette question en est à peine une pour Bachelard. Elle se préserve plutôt à l'intérieur d'une énigmatique évidence : « Oui, bien sûr, les poèmes sont des images » (citée par J. Lescuré, *Un été avec Bachelard*, Paris, Lunot Ascot, 1983, p. 39).

Énigmatique évidence qui le conduit à s'écarter des courants philosophiques dominants. Par exemple, « la neige est blanche » : c'est là ce que tout un courant de pensée identifie comme une « proposition » pour s'interroger ensuite sur son sens, sur sa vérité, sur sa valeur de description. Bachelard dit au contraire : « Une image comme : "la neige lucidité de l'âme" précède à quel point l'imagination est au-delà de la description » (*ibid.*, p. 203). La question de l'image littéraire n'est donc pas une question mais une preuve. La preuve de l'existence d'un « Règne poétique » autonome, celui-là même dans lequel les mots sont des images. C'est pourquoi un poème doit être fait avec « des images et non des descriptions, non des souvenirs » (*ibid.*, p. 204), il doit être plutôt une mémoire renversée, une mémoire qui part devant, conquérir d'autres régions du monde poétique où établir son règne.

Le concept de phénix épistémologique

1953 est aussi l'année où Bachelard publie le dernier de ses livres consacrés à l'épistémologie : *Le matérialisme rationnel*. Cette partie de son œuvre suscite désormais d'abondants commentaires qui sont publiés dans des revues philosophiques. Ces textes permettent de porter un regard oblique, indirect, sur l'œuvre de Gaston Bachelard et sur la manière dont elle est perçue par ses contemporains.

Raymond Ruyer, dans un article intitulé « Le matérialisme rationnel selon G. Bachelard » (*in Revue de*

métaphysique et de morale, 58, 1953, p. 413-422), souligne que pour Bachelard le mot matérialisme est pris dans le sens de connaissance scientifique de la matière plutôt que dans celui de « doctrine philosophique selon laquelle la matière est fondamentale ». Faire sentir combien les étiquettes philosophiques correspondent peu à l'activité réelle des scientifiques, c'est là selon lui le grand mérite de Bachelard : « Les hypothèses scientifiques, G. Bachelard ne cesse de nous en avertir, sont toujours prises en un sens plus délicat que ne l'imagine le philosophe. » Lorsque Bachelard entreprend une leçon consacrée au matérialisme, ce n'est pas du déroulement majestueux de doctrines philosophiques qu'il va être question, mais de cas concrets, précis, limités, dans lesquels il montre le progrès de l'intelligence des choses, le raffinement des stratégies mises en œuvre pour parvenir à les comprendre. Le matérialisme de Bachelard n'est pas une doctrine mais un exercice qui se pratique en allant à la rencontre des problèmes concrets que pose la compréhension de la matière. Inversement, le matérialisme en exercice, celui des scientifiques, n'a pas à être soutenu par une doctrine philosophique de la matière : ses succès lui suffisent. Il se peut bien que ces succès s'édifient sur l'abîme métaphysique de la question de l'être vers lequel Heidegger savait conduire ses questions, mais ce n'est justement pas de ce côté que se dirigent les questions scientifiques. Elles s'en détournent au contraire, et à défaut de pouvoir le prouver, font comme si quelque chose existait effectivement derrière les questions qu'elle adresse à la nature. Ses réflexions, Bachelard les déplace ainsi à la surface des aspérités du terrain de l'expérience et c'est en cela que son matérialisme prend modèle sur celui des scientifiques.

Pour Jean Hyppolite, dans l'article « Gaston Bachelard ou le romantisme de l'intelligence » (*in Revue philosophique de la France et de l'Étranger*, 144, 1954, p. 85-96), au contraire, le trait marquant de l'œuvre de Bachelard réside dans sa double allure épistémologique et poétique. C'est sur elle qu'il faut, selon lui, méditer si l'on veut accéder à son principe générateur et dévoiler la source unique d'où dérivent ces deux versants. L'audacieuse tentative de synthèse de Jean Hyppolite le conduit à voir en Bachelard un philosophe animé par le projet d'une « théorie transcendantale de l'imagination créatrice ». Et c'est bien sûr à Kant qu'il estime pouvoir faire remonter la première expression d'un tel projet : « Au reste, cette généralisation de l'imagination a été commencée par Kant et par Fichte – appliquée à la poésie par Novalis – quand ils ont traité d'une imagination absolument productrice, d'une imagination transcendantale, d'un projet de l'être. »

Dans l'introduction à la *Critique de la raison pure*, Kant écrit : « La colombe légère, qui, dans son libre vol, fend l'air dont elle sent la résistance, pourrait s'imaginer qu'elle volerait bien mieux encore dans le vide. C'est ainsi que Platon quittant le monde sensible, qui renferme l'intelligence dans de si étroites limites, se hasarda, sur les ailes des idées, dans les espaces vides de l'entendement pur » (trad. J. Barni, Paris,

Flammarion, 1987). Si la colombe kantienne doit craindre de perdre son appui sur l'air sans lequel son vol deviendrait impossible, elle ne doit pas cependant renoncer à sa position de survol pour contempler de sa hauteur l'horizon le plus vaste dans l'idéalité de son vol sans obstacle.

Si une créature animale devait être chargée de capter dans ses attitudes la forme générale de la pensée de Bachelard, elle n'imiterait certainement pas cet oiseau de haut vol, mais elle n'imiterait pas non plus cependant le trafic terrestre du rongeur qui ausculte le sol à petits pas rapides avec l'assurance d'avoir quelque chose sous ses pieds, ainsi que paraît le penser Raymond Ruyer. Non, elle évoluerait à peu de distance du sol, mais non collée au sol, se maintenant entre la racine et la cime des arbres, sans perdre de vue les aspérités du terrain, mais sans non plus s'éloigner des branches de sa rêverie. Elle ressemblerait à un oiseau des feuillages dont le plumage s'allume ou s'éteint selon que son vol le propulse dans un rayon de soleil ou d'ombre, à un oiseau qui s'enflamme et disparaît sans cesse, un oiseau de feu, un phénix en somme. Que le phénix, justement, soit apparu comme l'une des dernières et les plus flamboyantes images dont Gaston Bachelard ait entrepris de percer le mystère poétique (cf. en particulier son ouvrage posthume, *Fragments d'une poésie du feu*), que ceci ne soit nettement apparu, en outre, qu'au terme d'une longue méditation sur l'imagination, c'est peut-être le signe que cette créature fantastique entretient avec la posture générale de sa pensée un lien métaphorique intense.

Succès des successions

En 1963, peu après la mort de Bachelard (survenue le 16 octobre 1962), Georges Canguilhem écrira : « En renouvelant aussi profondément le sens de l'histoire des sciences en l'arrachant à sa situation jusqu'alors subalterne, en la promouvant au rang d'une discipline philosophique de premier rang, Gaston Bachelard a fait plus que frayer une voie, il a fixé une tâche » (« L'histoire des sciences dans l'œuvre épistémologique de Gaston Bachelard », *in Annales de l'université de Paris*, Paris, 1963, p. 24-39). En 1977, il semble que la tâche ait fait davantage que d'être simplement reprise, elle a aussi été transmise et transformée. Canguilhem écrit : « L'introduction, à partir de 1976-1968 dans mon enseignement ou dans quelques articles et conférences, du concept d'idéologie scientifique, sous l'influence des travaux de Michel Foucault et de Louis Althusser, n'était pas seulement une marque d'acquiescement accordée à ces contributions originales en déontologie de l'histoire des sciences. C'était une façon de rafraîchir, sans la rejeter, la leçon d'un maître dont j'avais lu les livres, faute d'avoir pu suivre les cours, la leçon de Gaston Bachelard, dont, quelques libertés qu'ils aient prises avec elle, mes jeunes collègues s'étaient en fait inspirés et fortifiés » (*Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, Paris, Vrin, 1977, p. 9). L'œuvre de Bachelard a ainsi

ouvert un grand nombre de pistes dont se nourrit encore la réflexion contemporaine sur la science et sur la littérature, et plus encore peut-être sur la relation entre ces deux formes d'expression de la pensée.

● *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 1928 (couronné par l'Institut, prix Geger). – *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934. – *La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, Paris, Vrin, 1938 (couronné par l'Institut). – *La psychanalyse du feu*, Paris, Gallimard, 1938. – *L'eau et les rêves : essai sur l'imagination de la matière*, Paris, José Corti, 1942. – *L'air et les songes : essai sur l'imagination du mouvement*, Paris, José Corti, 1943. – *La terre et les rêveries de la volonté : essai sur l'imagination des forces*, Paris, José Corti, 1948. – *La terre et les rêveries du repos : essai sur les images de l'intimité*, Paris, José Corti, 1948. – *Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949. – *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951. – *Le Matérialisme rationnel*, Paris, PUF, 1953. – *La Poétique de l'Espace*, Paris, PUF, 1957. – *Fragments d'une poésie du feu*, Paris, PUF, 1988 (publ. posthume).

► DAGOGNET F., *Gaston Bachelard, sa vie, son œuvre, avec un exposé de sa philosophie*, Paris, PUF, 1965. – DELACAMPAGNE C., *Bachelard aujourd'hui*, Paris, Clancier-Guénard, 1986. – GAGEY J., *Gaston Bachelard ou la conversion à l'imaginaire*, Paris, Marcel Rivière & Cie, 1969. – GINESTIER P., *Bachelard*, Paris, Bordas, 1965. – LECOURT D., *Bachelard ou le jour et la nuit, un essai du matérialisme dialectique*, Paris, Grasset, 1974. – *L'épistémologie historique de Gaston Bachelard*, Paris, Vrin, 1969. – MANSUY M., *Gaston Bachelard et les éléments*, Paris, José Corti, 1967. – MARGOLIN J.C., *Bachelard*, Paris, Le Seuil, 1974. – PIRE F., *De l'imagination poétique dans l'œuvre de Gaston Bachelard*, Paris, José Corti, 1967.

Pascal NOUVEL

→ Complexité ; Continuité ; Découverte ; Dialectique ; Épistémologie ; Idéalisme ; Rationalisme ; Rupture.

BACON Francis, 1561-1626

Fils et neveu de serviteurs de la Couronne, avocat de formation, membre de la Chambre des Communes depuis 1584, Bacon est, peu après l'intronisation de Jacques I^{er}, nommé porte-parole du roi auprès du Parlement et rapporteur des débats. Promu Garde des Sceaux en 1617, il sera fait Lord Chancelier l'année suivante avant de se voir conférer le titre de baron de Verulam puis de vicomte de Saint-Albans. Conséquence d'une condamnation pour corruption par le Parlement, sa disgrâce de 1621 met un terme à sa brillante carrière d'homme d'État.

Affirmant très tôt l'identité de la science et de la puissance, Bacon plaide, dès son traité *Of the Proficiency and Advancement of Learning* (1605), pour une réforme sociale de la science. Dans le *Novum Organum* (1620), rédigé au plus fort d'une intense activité politique, il tire les conséquences méthodologiques de la réorientation du savoir qu'il cherche à promouvoir et débusque les « idoles » qui font obstacle à la production de connaissances réelles.

Après sa disgrâce, se consacrant à plein temps à son œuvre philosophique et naturaliste, il publie une

History of the Reign of Henry the seventh et une *Historia Ventorum*, révisé son traité de 1605 en vue de l'éditer en latin sous le titre *De Dignitate et Augmentis Scientiarum* et fait paraître une troisième édition réaugmentée des *Essays or Counsels, civil and moral*. Il meurt en laissant de nombreux inédits, parmi lesquels la *Sylva Sylvarum* et la *New Atlantis* dont la « Maison de Salomon » fournira l'un des modèles de la Royal Society fondée en 1662.

● *The Works and Letters of Francis Bacon*, Londres, 14 vol., 1848-1874 (textes établis, annotés et au besoin traduits en anglais par Spedding, Ellis et Heath) : repr. Stuttgart, F. Frommann Verlag, 1963. Traductions disponibles : *Les Essais*, trad., introd. et notes M. Castelain, Paris, Aubier, 1948. - *La Nouvelle Atlantide*, trad. et comm. M. Le Dreff & M. Llasera, Paris, Payot, 1983. - *Le Valerius Terminus (ou de l'interprétation de la nature)*, trad. et notes F. Vert, Paris, Méridien-Klincksieck, 1986. - *Novum Organum*, trad. et introd. M. Malherbe & J.M. Pousseur, Paris, PUF, 1986. - *Récusation des doctrines philosophiques et autres opuscules*, trad., introd. et notes D. Deleule & G. Rombi, Paris, PUF, 1987. - *Du Progrès et de la promotion des savoirs*, trad., avant-propos et notes M. Le Dreff, Paris, Gallimard « Tel », 1991.

► JARDINE, L., *F. Bacon, Discovery and the Art of Discourse*, Cambridge, 1974. - ROSSI P., *F. Bacon, della magia alla scienza*, Turin, 1974. - WORMALD B.H.G., *F. Bacon : History, Politics and Science, 1561-1626*, Cambridge, 1993. - Coll. : *Bacon, Science et Méthode*, Paris, Vrin, 1985. - *Les Études philosophiques*, n° 3/1985. - *Revue internationale de philosophie*, 1986, n° 159.

François BOITUZAT

→ Expérience ; Expérience cruciale ; Loi de la nature ; Méthode ; Progrès ; Technique ; Test.

BACTÉRIOPHAGE

La découverte du bactériophage

L'histoire du bactériophage commence par la découverte d'un phénomène singulier décrit par Frederick W. Twort en 1915 (« An investigation on the nature of ultra-microscopic viruses », *The Lancet*, 2, p. 1241-1243).

En cherchant pour les virus ultra-microscopiques l'équivalent des propriétés connues pour les microorganismes, Twort découvre le phénomène des « plages vitreuses » parmi les colonies de jeunes staphylocoques. On assistait ainsi à « la production apparemment spontanée d'un matériel autodestructeur [des bactéries] qui, une fois mis en route augmentait en quantité ». Le phénomène était indéfiniment reproductible. Twort en propose les interprétations possibles : il peut être causé par un virus ultramicroscopique, une enzyme douée d'un pouvoir de croissance, une étape dans la vie du microcoque. Ainsi se trouvaient posés les termes des controverses qui allaient durer jusqu'aux travaux d'André Lwoff à l'Institut Pasteur de Paris, c'est-à-dire jusqu'à l'élucidation du pouvoir lysogène du bactériophage en 1950.

Si F.W. Twort (1877-1950) a observé le phénomène de la « bactériophagie » selon le terme employé dans les années qui vont suivre (Eugène Wollman, « Recherches sur la bactériophagie-phénomène de Twort-d'Hérelle », 1925, *Annales de l'Institut Pasteur*, 39, p. 791), c'est à Félix d'Hérelle (1873-1949) que revient le retentissement de la découverte.

L'examen systématique d'un convalescent atteint de dysenterie due au bacille de *Shiga* et traité à l'hôpital de l'Institut Pasteur de Paris l'amène à en publier les conclusions dans une note présentée par E. Roux à l'Académie des sciences (F. d'Hérelle, « Sur un microbe invisible antagoniste des bacilles dysentériques », *C.R. Ac. Sc. Paris*, 45, 1917, p. 373-375).

D'Hérelle crée le mot « bactériophage » et décrit l'expérience qui met « la particule » en évidence. Les réensemencements successifs reproduisent le phénomène de lyse. D'Hérelle ne doute pas qu'il s'agit d'un germe vivant, corpusculaire. Ceci paraît confirmé par la formation des « plages claires » qui donnera lieu à la technique des plages et à la numération des bactériophages. « Si l'on ajoute à une culture de *Shiga* une dilution d'une culture précédemment lysée de façon que la culture de *Shiga* n'en contienne qu'un millionième environ, et si, immédiatement après, on étale sur gélose inclinée une gouttelette de cette culture, on obtient après incubation une couche de bacilles dysentériques présentant un certain nombre de cercles d'environ un millimètre de diamètre, où la culture est nulle ; ces points ne peuvent représenter que des colonies du microbe antagoniste : une substance chimique ne pourrait se concentrer sur des points définis » (F. d'Hérelle, 1917, *op. cit.*, p. 375).

Alors que Twort laissait ouverte la question sur la nature de l'agent, d'Hérelle n'hésite pas à le désigner par le terme « ultramicrobe, selon l'expression de Calmette ». « Le principe lytique que j'ai dénommé *Bactériophagum intestinale* ou Bactériophage, est une particule qui se multiplie aux dépens de la substance des bactéries, capable par conséquent d'assimilation, et qui est indéfiniment cultivable en série, *in vitro*, sous sa forme filtrante » (F. d'Hérelle, *Le Bactériophage, son rôle dans l'immunité*, Paris, 1921, p. 10). On trouve dans cette communication l'ensemble des positions que d'Hérelle défendra avec ténacité. Pour lui, le bactériophage était un. Il pouvait par accoutumance s'exercer sur plusieurs germes ; « parasite obligé », c'est « un microbe d'immunité ». D'où son rôle en médecine (F. d'Hérelle, 1921, *op. cit.*, 2^e partie, chap. 1^{er} : « Le Bactériophage dans la maladie »). Le travail d'Hérelle présentait une grande clarté. La méthode des plages, aisément reproductible, établissait la nature discontinue des corpuscules et permettait une étude quantitative. On comprend qu'elle ait impressionné F.M. Burnet en 1929 et M. Delbrück en 1938.

Interrogations et controverses

Eugène Wollman (1883-1943) relate qu'en 1919, frappé par l'analogie qu'il relève entre plusieurs

processus pathologiques transmissibles par filtrats comme la mosaïque du tabac, le sarcome de Rous et la bactériophagie, accepte tout naturellement l'hypothèse d'un virus ultramicroscopique (Eugène Wollman, 1925, *op. cit.*, p. 789). Le terme de virus ne doit pas nous surprendre. Au tournant du siècle et selon la formule de Pasteur, « tout virus est un microbe » (L. Pasteur, *Œuvres complètes*, t. VI, Paris, 1933, p. 673). Comme l'écrivait E. Roux en 1903 (Bulletin de l'Institut Pasteur, t. I, p. 7) : « Jusqu'en 1898, ces microbes invisibles n'étaient que des êtres de raison, les travaux de ces quatre dernières années leur ont donné une réalité. » Seul Martinus Willem Beijerinck (1851-1931) fonde la virologie. Pour lui le virus de la mosaïque du tabac « n'est pas un microbe. C'est un *contagium vivum fluidum*. Il est moléculaire et soluble. Une idée révolutionnaire, en opposition absolue avec l'idée même du microorganisme » (André Lwoff, *Ann. Virol.*, 132, 1981, p. 123 ; l'article de Beijerinck paraît en 1898, *Afd. K. Akad. Wet. Amst.*, 7, 229-235). Les objections à la notion d'ultramicrobe vinrent de Jules Bordet (1870-1961). En 1920, Bordet et M. Ciuca interprètent tout différemment le processus de « bactériophagie ». À la reproduction d'un germe, ils opposent « un facteur intracellulaire de variation » (J. Bordet et M. Ciuca, « Exsudats leucocytaires et autolyse microbienne transmissible », *C.R. Soc. Biologie*, 83, 1920, p. 1293-1295). L'essence du phénomène réside dans l'autolyse microbienne transmissible... (J. Bordet et E. Renaux, « L'autolyse microbienne transmissible ou le bactériophage », *Ann. Inst. Pasteur*, 42, 1928, p. 1283-1336). Ce qui revient à dire : « The invisible virus of d'Hérelle does not exist » (J. Bordet, « Croonian Lecture. The theories of the Bacteriophage », *Proc. Royal Soc. B*, 1931, 107, p. 404).

La découverte de la lysogénie (1921-1925)

En 1921, précise André Lwoff, « une culture lysogène était une culture contenant du bactériophage, une culture dans laquelle le bactériophage était produit et pouvait induire la lyse d'autres cultures » (A. Lwoff, 1953, 17, p. 273). En 1922, J. Bordet affirme être mis en présence d'un pouvoir lysogène « spontané ». Le pouvoir lysogène « peut exister dans des cultures qui n'ont pas été artificiellement contaminées ». C'est ce que montraient les expériences de M. Lisbonne et L. Carrère (1922) (« Antagonisme microbien, la lyse transmissible du *B. de Shiga* », *C.R. Soc. Biol.*, 86, p. 340). Entre 1921 et 1925, les bactériologistes allemands, E. Gildemeister, K. Herzberg et surtout O. Bail, étaient parvenus à la même conclusion. Désormais on pouvait parler avec Bordet d'une lysogénie « active et spontanée » par opposition à une lysogénie « passive ». Seule la première possède le principe lysogène. Ce pouvoir est « inscrit dans la trame même de l'individu bactérien », selon la formule remarquable de Bordet (« Pouvoir lysogène actif ou spontané et pouvoir lysogène ou provoqué », *C.R. Soc. Biol.*, 93, 1925,

p. 1055). Moins heureuse était l'idée d'une sécrétion du principe lytique, sécrétion non pathogène pour un type bactérien alors que le même principe serait pathogène pour un type différent du premier. André Lwoff a mis en garde contre le danger des « sécrétions hypothétiques ». Il faudra attendre les expériences de ce dernier en 1949 et 1950 sur des bactéries isolées pour dissiper l'illusion d'une sécrétion non pathogène : une bactérie qui produit des bactériophages est « condamnée à mort ». Il faudra également concevoir la notion de prophage. André Lwoff le fera ces mêmes années.

Serait-ce un gène ?

Lorsque H.J. Muller (1890-1967) prend connaissance par André Gratia du phénomène décrit par Twort et d'Hérelle, il ne tarde pas à le comparer aux propriétés que le généticien reconnaît aux gènes. Le bactériophage n'est-il pas doué du pouvoir de se reproduire lui-même ? N'est-il pas « une substance autocatalytique » ? N'est-il pas susceptible de variations héréditaires, c'est-à-dire de mutabilité ? Si ces corpuscules de Félix d'Hérelle sont réellement des gènes, écrit de façon saisissante H.J. Muller, « fondamentalement semblables à nos gènes chromosomiques, ils nous ouvriraient une perspective absolument nouvelle sur le problème du gène » (« Variation due to change in the Individual Gene », *Am. Nat.*, 56, 1922, p. 49).

Eugène Wollman de son côté avait mis en doute la nature microbienne du bactériophage. Il émet, en 1925, une hypothèse hardie : « Le bactériophage apparaît comme le résultat d'une variation (mutation ?) dont l'élément déterminant serait transmissible soit de cellule-mère à cellule-fille, soit indirectement, de cellule atteinte à cellule normale, par le milieu extérieur » (Eugène Wollman, 1925, *op. cit.*, p. 819). Le concept de « parahérédité » était trouvé. En 1929, Franck Macfarlane Burnet (1899-1985) considère le phage comme pouvant être un gène « dans la constitution héréditaire de la bactérie sensible » (« "Smooth-Rough" variation in Bacteria in its relation to Bacteriophage », *J. of Path. and Bact.*, 32, 1929, p. 35). On voit que de 1922 à 1929, de nombreux auteurs assimilent le bactériophage au gène.

La lysogénie (1929-1939)

F.M. Burnet commence en 1927 ses recherches sur des souches de *Salmonella enteridis Gaertner* : « La permanence du caractère lysogène rend nécessaire d'assumer la présence du bactériophage ou de son "anlage" dans chacune des cellules de la culture, c'est-à-dire qui fait partie de la constitution héréditaire de la souche. Les conditions dans lesquelles cet "anlage" est libéré ou activé sont extrêmement obscures » (F.M. Burnet et M. McKie, « Observation on a Permanently Lysogenic Strain of *B. enteridis Gaertner* », *Austr. J. of Ex. Biol. and Med. Sci.*, 6,

1929, p. 282). Sous le terme d'*anlage* qu'A. Lwoff traduit par « ébauche », on désigne un élément potentiel spécifique. Comme le souligne Lwoff en 1953 (*op. cit.*, p. 277), la libération peut correspondre à deux processus différents : révéler un virus latent, préexistant, ou bien le développement de quelque chose qui n'est pas un phage. Ici encore la notion de prophage résoudra la difficulté. En 1930-1931 cependant, un chercheur hollandais, L.E. den Dooren de Jong, travaillant sur le *B. Megaterium*, semble prouver l'origine endogène du bactériophage. C'est sur ce même bacille qu'Eugène et Elisabeth Wollman (1888-1943) introduisent le concept de « phases » des bactériophages. Les bactériophages se présentent sous deux états différents. On distinguera les bactériophages « mûrs », des bactériophages « latents » à l'état « cryptophagique ». Rien de tel n'existait dans le domaine des inframicrobes. Une étape venait d'être franchie dans l'histoire de la Virologie (E. et E. Wollman, « Les "phases" des bactériophages (facteurs lysogènes) », *C.R. Soc. de Biologie*, 124, 1937, p. 931). André Lwoff précisera en 1953 que les phages existent sous deux phases : celle des particules infectieuses et celle, latente, non infectieuse (« Lysogery », *Bact. Rev.*, 17, p. 276).

Nouvelles études. Max Delbrück

Le bactériophage fut aussi étudié par des techniques physico-chimiques. En France, les recherches d'Holweck et de Lacassagne devaient aboutir à l'étude d'E. Wollman, F. Holweck et S. Luria (« Sur l'effet des radiations sur le bactériophage C 16 », *Nature*, 145, 1940, p. 935-936). D'autre part, les travaux de Schlesinger montraient en 1934 et 1936 que les bactériophages contenaient 3,7 % de phosphore. Ils sont un composé de protéines et d'acide désoxyribonucléique (M. Schlesinger, « Zur Frage der chemischer Zusammensetzung des Bakteriophagen », *Biochem. Z.*, 273, 1934, 306). Quant à l'étude biochimique, elle semblait montrer avec John H. Northrop qu'une analogie réelle existait entre la production des phages et la formation d'enzymes (cf. J.H. Northrop, M. Kunitz and R.M. Herriott, « Bacteriophage », *Crystalline enzymes*, New York, Columbia Univ. Press, 1948). En 1938, Max Delbrück (1906-1981), à la suite de Schlesinger et contre Northrop, commence à mettre au point les procédures quantitatives de la multiplication des bactériophages virulents T par la méthode des plages : « Le nombre des plages est proportionnel à la concentration des phages » (Emory L. Ellis & Max Delbrück, « The Growth of Bacteriophage », *J. of Gen. Physiol.*, 22, 1939, p. 365-384).

Le prophage

En 1949 et 1950, André Lwoff (1902-1994) et ses collaborateurs clarifiaient le cycle des bactéries lysogènes. Pour montrer qu'une bactérie lysogène ne présente un caractère pathogène qu'à un de ses stades,

il ne fallait étudier qu'un seul individu bactérien. C'est la multiplication des bactériophages qui constitue le « fait pathologique ». Quant au caractère lysogène, il se perpétuait sous la forme d'un prophage. Le bactériophage capable de donner lieu à des systèmes lysogènes s'appellera désormais « tempéré ». Le changement de l'état de prophage à celui de phage, c'est-à-dire l'expression du caractère potentiel qu'est la lysogénie peut être induit par un facteur exogène. C'est l'« induction » obtenue par André Lwoff et ses collaborateurs en 1950. Le problème de l'intégration du prophage au matériel héréditaire bactérien sera résolu dès 1952, indépendamment par Élie Wollman, Esther et Joshua Lederberg sur la souche lysogène *E. Coli K 12* (Élie Wollman, « Sur le déterminisme génétique de la lysogénie », *Ann. Inst. Pasteur*, 84, 1953, p. 281-293; E. Lederberg & J. Lederberg, « Genetic studies of lysogenicity in *E. Coli* », *Genetics*, 38, 1953, p. 51-64). « L'immunité » dont jouissent les bactéries lysogènes à l'égard des bactériophages homologues sera le premier objet d'étude de F. Jacob. Désormais l'étude du phage et celle du chromosome bactérien seront associées. En 1952, A.D. Hershey et M. Chase mettront en évidence que c'est bien l'acide désoxyribonucléique du phage T2 qui a une fonction dans la reproduction de ce dernier. Une nouvelle ère s'ouvre. Le bactériophage est un *virus* désormais défini par André Lwoff en 1953 (*op. cit.*)

● BROCK Th.D., *The Emergence of Bacterial Genetics*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990 (chap. 6, 7, 8).
 – BURIAN R. M. & GAYON J., « The French school of Genetics. From Physiological and Population Genetics to Regulatory Molecular Genetics », *Ann. Rev. of genetics*, vol. 33, 1999, 313-349. – D'HÉRELLE F., *Le Bactériophage, son rôle dans l'immunité*, Paris, Masson « Monographies de l'Inst. Pasteur », 1921. – GALPERIN Ch., « Le bactériophage, la lysogénie et son déterminisme génétique », *Hist. Phil. Life Sci.*, 9, 1987, p. 175-224. – HELVOORT T. VAN, *Research Styles in Virus studies in the 20th Century*, Maastricht, Doct. Diss. Univ. of Limburg, 1993. – LWOFF A., « Lysogenicity », *Bact. Rev.*, 17, 1953, p. 270-332. – MORANGE M., *Histoire de la biologie moléculaire*, Paris, La Découverte, 1994, chap. 14. – Coll. : *Phage and the Origin of Molecular Biology*, éd. J. Cairns, G. Stent & J.D. Watson, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2^e éd., 1992.

Charles GALPERIN

→ Delbrück; Immunologie; Lwoff; Régulation moléculaire; Rétrovirus; Virus.

BAUMÉ Antoine, 1728-1804

Fils d'un aubergiste de Senlis, Antoine Baumé se forma à l'art de la pharmacie comme garçon de laboratoire auprès de Geoffroy dit le Cadet (1685-1752). Reçu maître apothicaire en 1752, il se vit confier un cours de chimie par le Collège des pharmaciens de Paris. Ce fut pour lui l'occasion d'un premier travail avec Macquer sur l'éther.

Patricien plus que théoricien, il fonda un véritable laboratoire de produits pharmaceutiques qui fit sa fortune. Ses travaux sur les préparations médicinales, mais aussi sur la teinture des draps, ses études sur les ciments et les plâtres, ses essais sur les porcelaines avec Macquer et l'invention de plusieurs pése-liqueurs dont le plus célèbre est l'aréomètre (alcoomètre) qui porte encore son nom, lui méritèrent une place d'adjoind (1772) puis d'associé-chimiste (1778) à l'Académie des Sciences.

Considéré par Lavoisier comme « le disciple de Stahl le plus fidèle », il s'opposa à l'adoption de la nouvelle nomenclature au nom « de la confusion, de l'incertitude dans les procédés et de l'obscurité dans les citations des auteurs qui nous ont précédés » que son introduction dans les pharmacopées n'aurait pas manqué de créer. Ses *Éléments de pharmacie théorique et pratique* publiés pour la première fois en 1762, n'en connurent pas moins neuf éditions, dont deux après sa mort survenue en 1804 alors qu'il avait, grâce à un nouveau laboratoire, à peu près reconstruit la fortune dont l'avait privé la Révolution.

► BENSUADE-VINCENT B. & ABBRI F. dir., *Lavoisier in European Context : Negotiating a New Language for Chemistry*, Science History Publ./USA, 1995. – PREVOST M., AMAT R. D', TRIBOUT DE MOREMBERT H. & LOBIES J.P. dir., *Dictionnaire de biographies françaises*, Paris, Librairie Letouzey & Ané, vol. 5, p. 934-935.

Anne Claire DÉRÉ

→ Stahl.

BECCEREL Henri, 1852-1908

Quatre générations de Becquerel se sont succédées à la tête du laboratoire et ont occupé la chaire de physique du Muséum National d'Histoire Naturelle. Henri Becquerel, représentant le plus illustre de cette dynastie scientifique, est né le 15 décembre 1852 dans la maison familiale du Jardin des Plantes. Comme son père et son grand-père, il accumula titres et postes : polytechnicien, ingénieur de l'École des Mines, professeur au Muséum en 1892 et à l'École Polytechnique en 1895, académicien à 36 ans, secrétaire de l'Académie des Sciences en 1907, une année avant sa mort.

Ses travaux portèrent sur la polarisation rotatoire magnétique, sur l'action du magnétisme terrestre sur l'atmosphère, et surtout sur la lumière et ses propriétés. Fin février 1896, il découvrit un nouveau rayonnement, émis spontanément par l'uranium, capable d'impressionner une plaque photographique même en l'absence de lumière, ce qui sera considéré plus tard comme la découverte de la radioactivité. Fin 1897, Becquerel abandonna son sujet, pensant l'avoir épuisé. Il ne reprendra ses expériences sur les corps radioactifs qu'en mars 1899, après la découverte du polonium et du radium par les Curie, avec qui il partagera le prix Nobel de physique de 1903.

● *Recherches sur une propriété nouvelle de la matière*, Paris, Mémoires de l'Académie des Sciences, 1903.

► BADASH L., « Henri Becquerel : une découverte inachevée », *La Recherche*, juin 1996, 78-82. – SCHUBNEL H.J. éd., *Histoire naturelle de la radioactivité*, Paris, Muséum d'Histoire Naturelle, 1996.

Soraya BOUDIA

→ Radioactivité; Rutherford.

BELTRAMI Eugenio, 1835-1900

Eugenio Beltrami est né à Crémone en 1835. Il a étudié les mathématiques à l'université de Pavie avec Francesco Brioschi et publie ses premiers travaux en géométrie différentielle. La première partie de sa vie mathématique, de 1862 à 1872 environ, est essentiellement consacrée à la géométrie différentielle, influencée par Gauss, Lamé et Riemann; après 1872 il s'intéresse aux mathématiques appliquées.

Étudiant les surfaces à courbure constante (*Annali di matematica pura ed applicata*, 1865), Beltrami montre que sur une telle surface on peut trouver un système de coordonnées curvilignes tel que les géodésiques soient définies par des équations linéaires et que cette propriété caractérise les surfaces à courbure constante, autrement dit une surface est à courbure constante si et seulement si elle peut être appliquée sur un plan de sorte que les géodésiques soient appliquées sur les droites du plan. Ce travail le conduira à relire Lobatchevski en s'appuyant sur la théorie des surfaces de Gauss, ce qui l'amène à reconnaître dans les surfaces à courbure négative constante des réalisations de la géométrie plane de Lobatchevski. C'est l'objet de l'article « Saggio di interpretazione della geometria non-euclidea » (1869). Notons que les surfaces à courbure constante avaient été étudiées au milieu du siècle par Minding sans que ce dernier fasse le lien avec la géométrie de Lobatchevski.

Beltrami établissait ainsi un lien entre la géométrie non euclidienne et la géométrie différentielle des surfaces, lien sûrement connu de Gauss comme le laissent penser certaines pages de son mémoire de 1827. La construction de Beltrami montrait ainsi que toute contradiction logique de la géométrie de Lobatchevski impliquait une contradiction de la géométrie euclidienne. Quelques années plus tard, en 1871, Felix Klein, s'appuyant sur des constructions de Cayley, exhiba d'autres modèles euclidiens de la géométrie non euclidienne.

Après avoir pris connaissance du mémoire de Riemann « Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie » (écrit en 1854 mais publié seulement en 1869), Beltrami étendait ses résultats aux espaces de dimension quelconque (« Teoria fondamentale degli spazi di curvatura costante », 1868-1869). Ainsi la géométrie non euclidienne devenait un chapitre de la

géométrie différentielle, l'étude des variétés riemanniennes à courbure constante.

Toujours dans le cadre de la géométrie différentielle des surfaces, Beltrami, s'appuyant sur des travaux de Lamé, définit les « paramètres différentiels » sur les surfaces, opérateurs différentiels associés à la métrique. Lamé avait introduit en 1859 pour les besoins de la physique mathématique les deux opérateurs différentiels

$$\Delta_1 f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2$$

$$\Delta_2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

où l'espace est rapporté à un repère orthonormé et f désigne une fonction. En utilisant les notations de l'analyse vectorielle, on a les relations

$$\Delta_1 f = (\text{grad}f)^2 \quad \Delta_2 f = \text{div}(\text{grad}f)$$

Beltrami introduit alors sur une surface rapportée à des coordonnées curvilignes (u, v) et admettant la première forme fondamentale

$$Edu^2 + 2Fdu dv + Gdv^2$$

les opérateurs suivants analogues à ceux définis par Lamé

$$\Delta_1 f = \frac{1}{EG - F^2} \left(G \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)^2 - F \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial f}{\partial v} - E \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)^2 \right)$$

$$\Delta_2 f = \frac{1}{\sqrt{EG - F^2}} \left\{ \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{1}{\sqrt{EG - F^2}} \left(G \frac{\partial f}{\partial u} - F \frac{\partial f}{\partial v} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{1}{\sqrt{EG - F^2}} \left(-F \frac{\partial f}{\partial u} + E \frac{\partial f}{\partial v} \right) \right) \right\}$$

Ses travaux de mathématiques appliquées qui vont de la mécanique des fluides à la théorie électromagnétique de Maxwell s'appuieront sur ses travaux de géométrie différentielle.

Enfin, Beltrami s'est intéressé aussi à l'histoire des mathématiques, en particulier nous noterons un article sur le mathématicien italien Giovanni Saccheri (1667-1733) qui avait tenté de démontrer le postulat des parallèles.

● « *Intorno alle proprietà delle superficie di rivoluzione* », *Annali di Matematica pura ed applicata*, sér. 1, t. VI, 1864, p. 271-279. — « *Ricerche di analisi applicata alla geometria* », *Giornale di Matematiche*, vol. II, 1864, p. 267-282, 297-306, 331-339, 355-375 ; vol. III, 1865, p. 15-22, 33-41, 82-91, 228-240, 311-314. — « *Risoluzione del problema : Riportare i punti di una superficie sopra un piano in modo che le linee geodetiche vengano rappresentate da linee rette* », *Annali di Matematica pura ed applicata*, sér. 1, t. VII, 1865, p. 185-204. — « *Saggio di interpretazione della geometria noneuclidea* », *Giornale di Matematiche*, 6, 1868, p. 284-312 (trad. fr. J. Hoüel, in *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 6, 1869). — « *Sulla teoria generale dei parametri differenziali* », *Memorie delle Accademia di Bologna*, sér. II, vol. VIII, 1868, p. 551-590. — « *Sulla teoria delle linee geodetiche* », *Rendiconti del Reale Istituto Lombardo*, sér. II, vol. I, 1868, p. 708-718.

— « *Teoria fondamentale degli spazi di curvatura costante* », *Annali di Matematica pura ed applicata*, sér. 2, 1868-1869, 232-255 (trad. fr. J. Hoüel, in *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 6, 1869). — « *Formules fondamentales de Cinématique dans les espaces de courbure constante* », *Bulletin des Sciences mathématiques et astronomiques*, t. IX, 1876, p. 233-240. — « *Interno ad alcuni punti della teoria del potenziale* », *Memorie delle Accademia delle Scienze delle Istituzioni di Bologna*, sér. 3, t. IX, 1878, p. 451-475. — « *Un precursore italiano di Legendre e di Lobatchevsky* », *Atti del Reale Accademia dei Lincei*, sér. 3, vol. V, 1^{re} partie, 1884, p. 441-448.

► Bor L., *Le problème mathématique de l'espace (une quête de l'intelligibilité)*, préf. R. Thom, Berlin, Springer, 1995. — BONOLA R., *Non-euclidean Geometry* (1912), trad. et comm. H.S. Carslaw, introd. F. Enriques (suppl. avec Dr G.B. Halsted, *The Science of Absolute Space* [1833], trad. J. Bolyai, et *The Theory of Parallels* [1840], trad. N. Lobachevski), New York, Dover Publ., Inc., 1955. — GAUSS C.F., *Disquisitiones generales circa superficies curvas* (1827), trad. fr. M.E. Roger, *Recherches générales sur les surfaces courbes* (1855), Paris, Blanchard, 1967. — RIEMANN B., « *Sur les hypothèses qui servent de fondement à la géométrie* » (trad. J. Hoüel), in *Œuvres Mathématiques*, Paris, Blanchard, 1968 (rééd. Gabay, 1989). — ROSENFELD B.A., *A History of Non-Euclidean Geometry*, trad. A. Shenitzer, New York/Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1988.

Rudolf BKOUCHE

→ Axiomatisme et formalisation ; Formalisme ; Géométries ; Groupes et symétrie ; Local et global ; Structure ; Transformation géométrique.

BERGSONISME

Le terme de « bergsonisme » ne renvoie pas seulement à la doctrine et à la méthode générales de Bergson (comme c'est le cas chez Thibaudet, 1923, ou Deleuze, 1966). Il peut renvoyer aussi au courant théorique qui a tenté, à la suite de Bergson lui-même, d'appliquer cette doctrine, notamment à différents problèmes scientifiques, ou encore au plus vaste mouvement culturel qui s'est inspiré de cette œuvre, notamment pour critiquer « la science » en général (ainsi chez Benda, 1913, ou Politzer, 1929). La notion même de bergsonisme est donc inséparable de l'histoire et de la philosophie des sciences. Mais pour comprendre comment le bergsonisme a pu donner lieu à la fois à une pratique et à une critique des sciences, il faut comprendre comment cela a été possible à l'intérieur même de l'œuvre de Bergson, constituée de quatre livres majeurs parus entre 1889 et 1932. Plus encore, chacun de ces livres ayant constitué un jalon, non seulement dans l'élaboration interne de la philosophie de Bergson, mais dans sa double réception publique (dont le sommet se situe entre 1900 et 1914), il faut examiner chacun d'eux séparément. On assistera ainsi à la genèse, au déploiement, et peut-être à l'éclipse du « bergsonisme », mais on comprendra aussi quels traits singuliers ont fait son importance, à la charnière entre la science ou certaines sciences et la philosophie, et au tournant entre le XIX^e et le XX^e s.

L'Essai sur les données immédiates de la conscience (1889) et la naissance du bergsonisme

Dès le premier livre de Bergson, *l'Essai sur les données immédiates de la conscience*, on rencontrera les deux traits qui caractériseront le « bergsonisme » : une critique générale et philosophique de la science, fondée sur une analyse de l'espace et du temps, mais aussi le parcours interne d'un champ scientifique déterminé, celui de la psychologie notamment. Les premiers lecteurs relèveront déjà ce double enjeu : une critique à placer sur le même plan que celle de Kant, et opposée à elle, mais aussi une théorie à confronter à celles des savants contemporains, notamment de psychologues comme Ribot ou James. Mais comment ces deux aspects sont-ils compatibles ? En quoi annoncent-ils ce qui ne deviendra le « bergsonisme » qu'à partir des livres suivants de Bergson ? Il faut en dire un mot.

« Je m'aperçus, à mon grand étonnement, que le temps scientifique ne dure pas » (Lettre à William James, *Mélanges*, p. 765-766). Tout commence donc, selon le célèbre récit rétrospectif de Bergson, par une surprise concernant le temps : celui-ci, en tant qu'il se définit pour nous par un passage continu, échappe à la connaissance scientifique, qui doit immobiliser son objet pour le mesurer, et construit ainsi un temps qui n'est plus celui de notre expérience et de notre vie. Cette surprise initiale a cependant une double série de conséquences.

Elle conduit d'abord Bergson à une distinction tout à fait générale, établie dans le deuxième chapitre de son premier livre. Alors que la science se fonde sur l'espace, qui impose à ses objets ses caractères d'homogénéité partout indifférenciable, de divisibilité et de simultanéité (dans l'instant d'une représentation), la durée changeante, continue et successive constitue une conscience, accessible seulement à une connaissance d'un autre genre. Ainsi « la science » est-elle d'un même geste fondée et limitée : assurée d'une prise authentique sur tous les objets qui se prêtent à une représentation spatiale, elle la perd définitivement sur tous ceux qui se constituent dans une expérience temporelle, à commencer par nous-mêmes. Dans les œuvres suivantes de Bergson on retrouvera approfondies et diversifiées, à la fois cette critique générale de la science (qui en est aussi une fondation, appuyée sur une théorie formelle de l'espace), et cette fondation non moins générale d'une connaissance philosophique (appuyée cependant sur une démarche critique bien plus que sur une intuition ou une description positives).

Mais cette première conséquence, aussitôt discutée par les premiers interprètes, ne doit pas en masquer une deuxième : la « découverte » de la « durée » conduit en effet Bergson, non seulement à une opposition générale de la science et d'une métaphysique renouvelée, mais à une série de problèmes particuliers où cette distinction doit être mise en œuvre à travers des concepts opératoires. Plus précisément encore, c'est à une double série d'études, c'est à un double partage, que Bergson

semble conduit, par lequel il rejoint les débats théoriques de son temps, et donne son deuxième aspect essentiel au débat sur « le bergsonisme ». Il lui faut en effet vérifier la distinction entre l'espace et le temps de l'intérieur de deux disciplines où ils semblent en quelque sorte se mêler : la « psychologie » scientifique en train de se constituer, qui mesure ce qui ne se réduit plus, du même coup, à des « faits de conscience » ; mais aussi la mécanique classique, qui fonde sa mesure du temps lui-même sur le phénomène physique apparemment fondamental du mouvement. Le bergsonisme n'aurait eu aucune prise sur les débats de son temps, s'il n'était pas passé de sa critique générale à ces études particulières, et même de ces études particulières à l'unification ou à la constitution de deux champs épistémologiques particuliers, celui de la psychologie elle-même, et celui de la mécanique, tous deux remis en cause de divers côtés par ses contemporains.

Le domaine premier à cet égard est celui de la psychologie, au point que son étude interne, critique et unifiée précède dans le livre l'analyse théorique de la durée elle-même. Dans le premier chapitre, en effet (« de l'intensité des faits psychologiques »), Bergson ne se contente pas de critiquer la « psychophysique » de Fechner, au moyen d'arguments restés célèbres, mais beaucoup moins originaux qu'on a voulu le dire, puisqu'on les trouve déjà discutés chez des contemporains comme Tannoy et Ribot. Il cherche à dissocier de manière différenciée, sur chaque sorte de « fait psychologique », les éléments qui relèvent de la mesure objective, et ceux qui relèvent de l'appréciation subjective d'une intensité irréductible à une grandeur. Le concept de « grandeur intensive » apparaît comme le « mixte inpur » qui traverse tous les domaines de la psychologie, à travers des mécanismes à chaque fois distincts : ainsi du rôle du langage et de la « suggestion » (étudiée au même moment par Bernheim) dans les « sentiments profonds », du corps et de la force musculaire (au cœur d'une controverse entre James, Wundt, et Ribot) dans le sentiment de l'effort ou les états affectifs, et enfin de la cause extérieure de la sensation dans la sensation qualitative elle-même, qui échappe comme telle au « psychophysicien ». Bergson manifeste ainsi l'unité et la diversité d'un champ qui devait sa scientificité même à la distinction de questions et de méthodes précises, effort ou sensation, suggestion ou mesure.

Bergson reviendra plus tard, au moment de discuter la théorie d'Einstein, sur la discussion des « considérations de temps, de mouvement et de vitesse en astronomie et en mécanique » (p. 86/77) que lui permet déjà ici son analyse du temps et de l'espace, et sa critique des « paradoxes » de Zénon.

Quoi qu'il en soit, de telles analyses ouvrent d'un coup les deux débats qui entoureront ensuite le bergsonisme. Les premiers lecteurs, tels Lévy-Bruhl ou Belot, s'interrogent sur la légitimité d'une critique de la science au nom de la « conscience » (qui conduit en outre à opposer une « liberté » temporelle et subjective au déterminisme spatial et scientifique, dans le dernier

chapitre du livre), objections bientôt prolongées par un soupçon sur la pertinence scientifique des analyses internes de Bergson elles-mêmes : Julien Benda ne cessera ainsi (anticipant sur certaines critiques récentes adressées à Deleuze par Sokal) de reprocher à Bergson son double jeu, utilisant fallacieusement le prestige de la science pour mieux la critiquer au nom d'un irrationalisme douteux. Au contraire, les premiers disciples exalteront la minutie des analyses scientifiques de Bergson, qui confirmeraient la pertinence de sa critique générale de la science, tout en délivrant les hommes de son « carcan » rationnel ! Tous les traits du débat sur le bergsonisme sont déjà là, voués à s'intensifier à travers la théorie pragmatique des sciences et la réflexion sur le cerveau qu'on trouvera dans *Matière et mémoire* (1896) ainsi que la « philosophie de la vie » et la critique de « l'intelligence » qui s'exprimeront dans *L'Évolution créatrice* (en 1907).

Mais avant d'en venir à ces deux ouvrages qui marqueront l'apogée théorique et publique du « bergsonisme », il faut faire une dernière remarque sur ce qui caractérise ce dernier dès 1889. En effet, on voit comment se combinent en lui une « critique » et une « pratique » des sciences. D'un côté, la critique ne saurait suffire, puisqu'elle doit rendre compte d'une « expérience » où les dimensions distinguées par le philosophe semblent se mélanger. D'un autre côté, ce n'est jamais à une « pratique » directement scientifique que se livre Bergson, mais à une étude gouvernée par une distinction « philosophique ». Ce qui fait l'unité de ces deux démarches, c'est un problème déterminé (ici celui du temps), qui impose l'étude d'un champ théorique précis. C'est à travers ce problème et ce champ particuliers que Bergson entre dans les débats de ses contemporains : il en sera de même quand, à partir de la mémoire, Bergson rejoint le cerveau, ou quand, à partir de la vie, il rejoint la théorie de la connaissance. Ce n'est donc pas seulement la réception, mais aussi la constitution du bergsonisme qui se poursuivra de livre en livre.

Matière et mémoire (1896) et la constitution du bergsonisme

« Le point de départ de notre travail a été l'analyse qu'on trouvera dans le troisième chapitre de notre livre » : ainsi commençait l'avant-propos de la première édition de *Matière et mémoire* (*Œuvres*, apparat critique, p. 1490). Or, l'analyse évoquée ici par Bergson était d'ordre scientifique, très précisément psychologique. C'était même une psychologie générale, fondée sur la distinction de « plans de conscience » (voir notre article in « Bergson et les neurosciences », 1997).

Cependant, comme le souligne aussitôt Bergson, cette théorie l'a conduit devant « de très nombreuses difficultés, les unes scientifiques, les autres métaphysiques », d'où « le reste du livre est sorti » (*ibid.*), d'où devaient sortir aussi les traits constitutifs du « bergsonisme », dans sa structure théorique autant que dans sa

réception historique. C'est donc sur ces deux aspects qu'il faut insister d'abord, avant de revenir sur la portée méconnue d'une théorie psychologique qui reste l'un des apports majeurs de Bergson à l'histoire et à la philosophie des sciences.

Tout vient cette fois d'un aspect central de l'hypothèse initiale du livre, qui sera aussi sa conclusion, à savoir que le corps n'intervient que dans le dernier des plans de conscience, celui de l'action, ou encore que « notre corps est un instrument d'action et d'action seulement » (p. 253/356, il s'agit de la première phrase du « résumé et conclusion »). Cette hypothèse ou ce résultat entraîne deux et même trois conséquences : puisque le « rôle du corps » et notamment du cerveau se limite à l'action, et que nous constatons l'existence de représentations, il faut expliquer celles-ci autrement, en excluant la possibilité d'une production, d'une reproduction, ou même d'une localisation cérébrale de toute la pensée. Bergson s'oblige ainsi à une confrontation avec les théories scientifiques de son temps, menée de fait sur les aphasies dans le deuxième chapitre (sous-titré « la mémoire et le cerveau ») : c'est elle qui a fait la plus grande réputation, positive ou négative, de ce livre. De plus, Bergson est conduit à relier une dualité d'abord fonctionnelle et psychologique, avec un dualisme substantiel et métaphysique, qui ne trouvera son aboutissement qu'à travers une métaphysique de la matière, constituée en son fond d'un rythme temporel, analogue quoiqu'irréductible à celui de notre conscience ; ce fut le point le moins compris et discuté du livre, même si on a tenté ensuite de le rapprocher des théories modernes de la matérialité (voir Capek, de Broglie). Enfin, et surtout, la restriction théorique du rôle du corps à l'action n'empêche pas, et fonde même sa priorité pratique et psychologique. *Primum vivere* : il faut d'abord vivre. Plus encore, ce rôle pratique ne fonde pas seulement une psychologie utilitaire, mais une véritable théorie de la connaissance et de la science, tout entières rapportées à leur fonction biologique. L'espace lui-même (ainsi que le « temps homogène »), tout en gardant sa structure formelle autonome, devient désormais un « schème de notre action sur les choses » : un instrument à travers lequel nous découpons la matière continue de l'univers en objets pour notre action.

Ce dernier point, tout à fait fondamental, fit entrer la théorie de Bergson, servie à partir de 1899 par des disciples tels que Édouard Le Roy, dans les grands débats sur le « pragmatisme » ou le « conventionnalisme » qui entourent alors la théorie des sciences, que ce soit à partir des travaux de William James (qui rencontreront l'opposition farouche de Russell en Angleterre, mais aussi de Brunschvicg en France), ou de ceux de Poincaré (dans une controverse fameuse avec Couturat).

La place de Bergson lui-même dans un tel débat est marquée de son côté par la convergence de trois éléments : une critique des localisations cérébrales, qui divise à la fois les philosophes et les savants ; une métaphysique de la matière bientôt forcée de s'opposer

radicalement à la science en général (ce sera fait en 1903 dans l'introduction à la métaphysique) ; enfin une théorie pragmatique et utilitaire, qui ne méconnaît pas cependant l'exigence d'une fondation autonome de la connaissance scientifique. Aucun de ces points n'est certes à interpréter de façon simpliste : ainsi, la « critique des localisations » se fait au nom d'une théorie dynamique et globaliste du cerveau héritée de Spencer et Jackson, bientôt reprise par Pierre Marie. De même, la métaphysique de la matière se veut fondée sur les physiques les plus modernes (Bergson cite Maxwell et Faraday). Enfin, il faut répéter que la fonction utilitaire et technique de la science l'assure selon Bergson à la fois d'une prise sur son objet, la matière réelle de l'univers extérieur, et d'un fondement subjectif, l'espace et le temps homogènes.

Cependant, rien n'y fait : perçu comme une « philosophie nouvelle », bientôt traité de « romantisme utilitaire » par ses adversaires, ou élevé au rang d'alternative à la philosophie « universitaire », « matérialiste » et « rationaliste » par ses disciples, le « bergsonisme » rencontre donc les enjeux les plus brûlants et ambigus du débat sur la science, au tournant du siècle. En publiant l'*Introduction à la métaphysique*, en 1903, Bergson lui-même (qui enseigne au Collège de France depuis 1900) radicalise son opposition entre science et philosophie et met déjà le feu aux poudres : elle sera le premier texte de Bergson traduit dans toutes les langues, influent sous toutes les latitudes, utilisé aussi bien dans des directions politiques (par Georges Sorel notamment) que religieuses, littéraires (autour du symbolisme, mais aussi de la première NRF) que scientifiques (voire « parascientifiques », la querelle sur l'occultisme recoupant largement celle sur le bergsonisme, quoiqu'il ne faille pas les confondre comme le fait à tort Groggin). On pressent ce qu'ajoutera à ce débat la publication de *L'Évolution créatrice*, en 1907, avec la théorie de « l'élan vital » et la genèse biologique d'un pur *Homo faber*.

On ne s'étonnera donc pas du peu de réaction autour de la théorie initiale, proprement psychologique et scientifique, développée par Bergson non seulement au centre de *Matière et mémoire*, mais dans une remarquable série d'essais qui rejoignent les problèmes les plus disputés du temps : *Le Rire*, livre publié en 1900, mais aussi les conférences sur « Le Rêve », « Le Souvenir du présent et la fausse reconnaissance », ainsi que « l'Effort intellectuel ». Pourtant, comme l'a montré notamment Meletti-Bertolini, ces textes sont au cœur des débats de la *Revue psychologique*, dirigée par Ribot, où ils sont lus dans une perspective intellectualiste, notamment par Alfred Binet. Le propre de la théorie de Bergson est en effet de refuser de réduire la « vie mentale » à une combinaison linéaire de représentations atomiques : sa distinction purement psychologique entre deux mémoires l'amène à les relier par un véritable travail intellectuel d'interprétation, allant de haut en bas, c'est-à-dire de représentations complexes vers des perceptions élémentaires. De même, l'ancrage de ce travail dans l'action et dans le

corps, à travers « l'attention à la vie », lui permet d'esquisser une psychopathologie proche, malgré bien des différences, de celle de Pierre Janet et de son « sens du réel ». Mais ce n'est pas le lieu ici de tenter une confrontation précise entre la théorie de Bergson et les psychologies de Ribot, James, Binet, Janet, ou Freud, et surtout l'esquisse du champ épistémologique partagé par toutes ces doctrines (où l'on retrouverait bien des problèmes de la « philosophie de l'esprit » d'aujourd'hui). Un chapitre méconnu de Jankélévitch (1930), l'œuvre d'Eugène Minkowski, les critiques mêmes de Politzer et de Merleau-Ponty, avec la compréhension profonde des problèmes communs qu'elles supposent l'une et l'autre, tels seraient les jalons d'un travail qui demande encore à être fait.

On peut donc distinguer deux aspects dans la constitution du « bergsonisme », à travers son œuvre comme à travers sa réception publique. Mais cela sera-t-il encore possible après *L'Évolution créatrice* ? Y a-t-il encore un rapport interne au savoir scientifique dans ce livre immédiatement contesté par les savants, et tout aussi immédiatement placé au cœur du débat sur la science, qui semble définir le « bergsonisme » ?

L'Évolution créatrice (1907) et la querelle du bergsonisme

Après la publication de *L'Évolution créatrice*, le débat sur le « bergsonisme » change en quelque sorte d'échelle, pour devenir un phénomène historique et sociologique (ou encore idéologique) qui mériterait à ce titre une étude spécifique. Il faut bien pourtant en trouver la raison dans le livre lui-même.

Il faut aller pour cela au-delà de son titre, même si celui-ci sonne déjà comme un manifeste. La théorie de Bergson n'est pas seulement une « philosophie de la vie » ou encore une théorie « vitaliste », récupérant à la fois les théories scientifiques de « l'évolution » et le thème métaphysique de la « création », ou cherchant à surmonter leur contradiction apparente. Certes, Bergson veut montrer que l'on doit penser le processus de l'évolution comme une véritable création. Mais la démarche qui l'y conduit l'entraîne en quelque sorte plus loin encore, et c'est cette conjonction du problème de la vie avec les autres questions abordées dans le livre, qui lui assureront un retentissement plus vaste et ambigu que jamais.

L'étude de la vie amène Bergson à progresser, au long des quatre chapitres du livre, dans une critique complexe de la connaissance et de la science : 1) D'emblée, les cadres de notre entendement (« mécanisme » et « finalité ») lui paraissent insuffisants pour penser l'évolution imprévisible et pourtant unifiée de la vie dans la matière : la notion d'élan vital est précisément introduite pour renvoyer à une origine unique de « la vie », au-delà de mécanismes aléatoires ou d'une fin nécessaire ; d'où une critique des sciences de la vie. 2) Mais si notre entendement est insuffisant, c'est parce qu'il n'est lui-même, comme « intelligence » humaine, que l'un des produits de la vie, le

plus élevé, comme faculté d'action sur la matière capable de fabrication indéfinie de mécanismes et d'outils, mais justement le moins capable de penser la vie, sa propre origine, opposée à la matière comme telle : d'où une théorie à la fois purement biologique et rationaliste de notre connaissance scientifique. 3) Il faut donc mettre en œuvre une autre faculté pour saisir l'essence de la vie : ce sera l'intuition, frange obscure de notre connaissance, appliquée d'abord à notre durée ou dans notre durée, comme acte de volonté, permettant de penser la vie, par analogie, comme création, et l'homme, au-delà même de son intelligence, comme « fin » de cette création, capable à la fois de la penser et de la continuer : d'où une théorie intuitionniste de la création en général, y compris de l'univers, de l'action humaine, voire « surhumaine », et de la « signification » de la vie. 4) Le livre se conclut enfin sur une critique des « illusions » de notre entendement et des systèmes philosophiques, qui rejoint les plus grands problèmes de la métaphysique et se conclut sur un appel à un « évolutionnisme vrai ».

Tels sont donc les enjeux : non seulement une théorie de la vie elle-même, autour de la notion ou de l'image de l'élan vital, si vite devenu un slogan, mais une critique générale de la connaissance et de la science, appuyée sur un appel à l'intuition et à l'action. Indiquons pourtant ce qui continue à fonder tout cela : une théorie de la « durée », un lien strict entre « théorie de la vie » et « théorie de la connaissance » (comme le dit fortement l'Introduction du livre), enfin une critique de problèmes théoriques précis, le « désordre » et le « néant » en premier lieu, obstacles principaux à une pensée de la création. Là encore, avec le deuxième point surtout, on tenait le fondement philosophique et scientifique de l'entreprise de Bergson, capable d'unifier les enjeux de la biologie et de la psychologie de ses contemporains, autour de problèmes communs, et cela qu'on accepte ou non ses solutions singulières.

Mais on ne peut s'étonner de ce que cela passe au second plan. Le livre croise trop d'enjeux théoriques, voire politiques, pour ne pas donner lieu à un retentissement et à des poèmes qui définissent ce qu'on pourrait appeler la querelle du bergsonisme, entre 1907 et 1914, et même un peu au-delà. Bergson lui-même ayant engagé sa doctrine dans la propagande militaire de la Première Guerre mondiale.

La querelle se développe d'abord en France, et sur des enjeux philosophiques : ainsi entre Le Roy et Benda, qui publient chacun un livre en 1912 ; puis sur des enjeux scientifiques, les biologistes ayant marqué d'abord, comme le note ironiquement Canguilhem, un certain embarras ; et sur des enjeux théoriques plus généraux, avec la réaction d'Émile Borel sur « l'intelligence géométrique » par exemple. Elle s'étend bien vite dans le monde anglo-saxon où *L'Évolution créatrice* et *Matière et mémoire* sont traduits simultanément en 1911 (le livre de 1896 profitant de l'engouement pour celui de 1907). Il ne faut pas s'y tromper : la polémique de Russell avec les disciples anglais de Bergson, Karin Stephen ou H. Wildon Carr, prolongeant sa

controverse avec William James, coupe pour longtemps la « philosophie analytique » d'une certaine philosophie « continentale ». En Allemagne, Bergson est enrôlé parmi les « philosophes de la vie » : Husserl se tient pourtant informé de sa doctrine par Richard Kröner qui publie un article important dans le numéro même de *Logos* où paraît *La Philosophie comme science rigoureuse*, et par Roman Ingarden, à qui il confie une thèse sur l'intuition bergsonienne ; mais Heidegger pourra ramener la doctrine bergsonienne de la durée à un réalisme biologique, dans deux notes d'*Être et temps*, sans se demander si la démarche inverse n'aurait pas été plus légitime. En Russie, Bergson rencontre un écho immense, à travers l'intuitionnisme qu'on oppose au rationalisme kantien et « occidental ». En Italie, Georges Sorel et Papini le rattachent à un courant pragmatique radical et politique qui perd rapidement ses liens avec la doctrine de James ou de Peirce. Encore une fois, le tableau d'ensemble de la querelle, dans laquelle Bergson lui-même se garde d'entrer, mériterait d'être tracé de façon précise et différenciée.

La guerre de 1914 y mettra un terme : non pas tant d'ailleurs du fait d'un « Bergson politique », que par le repli qu'elle impose aux philosophies « nationales » sur leurs débats internes. La querelle du bergsonisme manifestait au moins des enjeux communs, qui passent ensuite dans l'ombre, l'après-guerre voyant un bergsonisme officiel de plus en plus sclérosé, malgré les efforts de Thibaudet et Jankélévitch, opposé à des objections de plus en plus politiques et radicales, malgré les enjeux philosophiques communs que recèlent encore les analyses de Politzer, de Sartre (1936), ou du premier Merleau-Ponty. La querelle du bergsonisme aura ainsi masqué le débat entre deux philosophies de la conscience (celle de Bergson et de Husserl) et entre deux philosophies de la science (celle de Bergson et de Russell), et peut-être entre cette philosophie de la conscience et cette philosophie de la science elle-même. C'est seulement en la replaçant dans ces cadres beaucoup plus généraux qu'on pourrait d'ailleurs redonner sens à la théorie bergsonienne de la vie, dont la portée scientifique ne saurait en aucun cas être directe (et qui a eu bien peu d'influence historique).

Il faut faire encore une remarque, avant d'examiner si le dernier livre de Bergson, *Les Deux Sources de la morale et de la religion*, garde une place dans le débat sur le « bergsonisme », du point de vue de l'histoire et de la philosophie des sciences.

En effet, comme *Matière et mémoire*, *L'Évolution créatrice* sera suivie de plusieurs essais, par lesquels Bergson en revendique la fécondité théorique et scientifique. Les plus importants sont *Durée et simultanéité*, à propos de la théorie d'Einstein, paru en 1922, ainsi que certains articles de *L'Énergie spirituelle* (1919) ou de *La Pensée et le mouvant* (1934). Il faut en dire un mot.

La controverse qui a entouré *Durée et simultanéité*, paru peu après la rencontre de Bergson et d'Einstein lui-même (le 6 avril 1922 à Paris), a incontestablement

creusé l'écart entre le bergsonisme et la pensée scientifique de son temps. Même si Bergson ne contestait aucunement la théorie de la relativité elle-même, et ne prétendait qu'en interpréter en quelque sorte la teneur de réalité, d'un point de vue philosophique, il concluait en faveur d'un Temps unique et absolu de l'univers, qui ne pouvait plus correspondre avec les faits et les théories objectives elles-mêmes, et paraissait reposer sur un contresens de sa part. Pourtant, la philosophie de *L'Évolution créatrice* permet à Bergson de justifier le traitement du temps comme une variable spatiale, pour rendre compte de l'essence même de l'univers physique. C'est la réalité de ce dernier qui ne lui paraît pas concevable sans l'introduction d'un observateur qui ne se réduit pas à un point de vue, et dont la temporalité propre confère une unité et une simultanéité absolue à l'univers. Ce qui fait passer des temps multiples au temps unique (et inversement), c'est la perception, non pas en tant que contenu « psychologique », mais précisément en tant qu'intersection entre l'univers et la conscience. Il reviendra à Merleau-Ponty (1961), sur ce point, de montrer combien l'écart entre le bergsonisme et la science, justement parce qu'il paraissait irréductible, en appelait à une conciliation interne.

Il est vrai que les essais sur « la conscience et la vie » (1911), « l'âme et le corps » (1912) et peut-être surtout « fantômes de vivants » et « recherche psychique » (1913), sur lesquels s'ouvrait *L'Énergie spirituelle* en 1919, pouvaient paraître éloigner encore le bergsonisme de la science, vers une métaphysique purement et simplement opposée à elle. La synthèse méthodologique et autobiographique, qui ouvrira *La Pensée et le mouvant*, en 1934, tentera pourtant de revenir sur le lien profond que les unissent dans la démarche concrète de l'œuvre, tentant aussi de répondre aux objections, en traitant pour la première et dernière fois de la science en général. On y renverra le lecteur.

Mais, de l'aveu même de Bergson, c'est dans ses livres et dans l'accueil que leur fait la communauté scientifique et philosophique que doit se trouver la validité du bergsonisme. Or, de ce point de vue, tout semble joué. Pourtant *Les Deux Sources de la morale et de la religion*, qui ont paru figer encore l'image du bergsonisme, auraient pu renouveler aussi, une dernière fois, les données réelles du problème.

Les Deux Sources de la morale et de la religion (1932) et le destin du bergsonisme

Ce n'est pas seulement parce que Bergson a mis l'expérience « mystique » au centre de son dernier livre, *Les Deux Sources de la morale et de la religion*, que celui-ci a échappé à tout débat réel avec les sciences de son temps, psychologie, sociologie ou histoire des religions. Au contraire, c'est par là qu'il aurait pu y entrer, sa théorie d'ensemble ayant de nombreux rapports avec celle de William James ou de Freud, de Durkheim ou de Lévy-Bruhl, de Loisy ou de Baruzi. Mais la place centrale de l'expérience mystique apparaîtrait moins aux premiers lecteurs de ce livre comme une

hypothèse scientifique, susceptible de prolonger le débat sur le « bergsonisme », que comme un choix presque arbitraire de l'auteur, recoupant ses préoccupations personnelles : bien plus, pour certains disciples (et encore tout récemment, comme le montre la thèse extrême de Hude) comme pour certains adversaires (Politzer l'avait annoncé dès 1929), il achèverait le « bergsonisme » en en révélant la véritable nature (religieuse en un sens dogmatique), bien loin de le continuer sur un problème philosophique nouveau et irréductible aux précédents.

Replié de force sur des enjeux extérieurs, coupé de la science aussi bien que de la philosophie contemporaine, de la psychanalyse aussi bien que de la phénoménologie, de la sociologie aussi bien que de la philosophie de l'histoire, en plein essor à l'approche d'une guerre qui dramatisera encore les enjeux, le « bergsonisme » semble prendre alors sa figure « historique », par une projection rétrospective qui s'étendra du dernier livre jusqu'aux précédents.

Pourtant, le débat du bergsonisme avec les « sciences humaines » est loin d'être anodin. L'enjeu est double, comme le titre et le contenu du livre : remonter d'abord des phénomènes de la morale et de la religion, au-delà même de leurs fonctions et de leurs formes sociales constitutives, vers une origine psychologique et biologique tenant à la structure même de l'espèce humaine ; montrer ensuite que « l'histoire » ne s'explique pas seulement par le déploiement de cette nature, dans des « sociétés closes », ou selon les figures logiques d'une religion qui reste « statique », mais aussi par les actes de certains individus, qui dépassent la structure même de l'espèce en remontant à son origine. Autrement dit, quelle que soit la façon dont une telle théorie se rattache à celle de *L'Évolution créatrice*, quelles que soient même les conclusions auxquelles elle conduit Bergson, sa force est une fois encore d'unifier un ensemble de faits et de perspectives théoriques, dont le découpage paraît trop facilement définitif, à travers des distinctions conceptuelles précises et opératoires. Si le débat n'a été qu'entamé avec les psychologues (à travers une recension de Nabert), avec les anthropologues (à travers un texte important et ironique de Lévi-Strauss, 1962), avec les historiens, c'est parce qu'il aurait dû l'être avec tous à la fois.

La nature du débat ou du malentendu entre le « bergsonisme » et « l'histoire et la philosophie des sciences » reste donc le même, au fond, de 1889 à 1932, seulement accentué ou aggravé entre-temps par l'ampleur historique et polémique qui a été la sienne. On retrouvera toujours son double aspect, de critique métaphysique et de pratique épistémologique, qui se déploie aussi pour finir, dans le dernier livre, en une perspective morale et politique.

Ainsi, ce n'est pas Bergson qui écrirait que « la science ne pense pas » (sur cette phrase de Heidegger, voir Salanski, 1997). Cependant, c'est bien lui qui a écrit qu'« on ne se passe pas de philosophie ». La science aurait même un triple besoin de philosophie :

comme épistémologie, pour se voir fondée à partir de la connaissance commune ; comme métaphysique, qui évalue sa prétention à atteindre le réel en sa totalité ; comme éthique et philosophie de l'histoire enfin, qui mesure sa place dans l'histoire de l'humanité. Bergson rejoint par ce biais (pour mieux s'en éloigner peut-être) l'autre débat fondamental ouvert par Heidegger sur la science et la technique au XX^e s.

Revenons donc une dernière fois au point de départ : « Ces deux éléments, étendue et durée, la science les dissocie quand elle entreprend l'étude approfondie des choses extérieures. [...] La dissociation s'opère ici très nettement, et au profit de l'espace. Il faudra donc l'opérer encore, mais au profit de la durée, quand on étudiera les phénomènes internes » (*Essai...*, p. 172/149). La position exprimée par Bergson dès son premier livre ne variera pas. Ce qu'elle suppose, c'est que science et philosophie partent d'un même point de départ, la connaissance commune, qui est en tant que telle un « mixte impur », constituée de deux formes radicalement incompatibles, l'espace pur que dégage la science par un effort hérité de la géométrie des Grecs ; et la durée pure, que la philosophie doit atteindre, par un effort symétrique et inverse de réflexion et d'intuition, dont Bergson revendique la théorie. De livre en livre, sur des problèmes et des domaines particuliers qui dessinent la carte des points critiques de l'époque, elle définit ainsi la tâche d'une épistémologie critique qui a eu une influence parfois inattendue (ainsi chez Bachelard ou Deleuze), mais aussi d'une métaphysique toujours génétique et partielle, elle aussi plus importante qu'elle n'en a eu l'air (ainsi chez le dernier Merleau-Ponty).

En se séparant de l'expérience commune, science et métaphysique ouvrent aussi à l'humanité une double histoire : histoire de l'intelligence et de ses inventions théoriques et techniques d'un côté ; histoire de l'intuition et de ses actes philosophiques et éthiques, de l'autre. Dans *Les Deux Sources de la morale et de la religion*, Bergson montre que le progrès scientifique, neutre moralement, peut être tiré dans deux directions : utilisé par la morale et la société « closes », il ne fait qu'aggraver la barbarie guerrière qui les caractérise ; utilisé dans le sens de la libération de l'homme de ses besoins matériels, au service de la moralité « ouverte » et de la religion « dynamique », qui lui apportent un « supplément d'âme », il peut permettre à l'homme d'accomplir sa destination métaphysique. Chaque moment de l'histoire est à cette croisée des chemins. Bergson est donc plus proche de Freud et Husserl que de Heidegger : il s'agit moins de critiquer le progrès technique en lui-même, que de le remettre devant son fondement intellectuel et éthique. Seulement, il ne faut pas chercher celui-ci dans le refoulement des pulsions par la civilisation, ou dans un ressourcement phénoménologique, mais dans le refus de son utilisation guerrière, et dans sa mobilisation au service d'une mystique. À défaut de celle-ci, dont on peut bien douter, c'est dans l'institution internationale de contrôle intellectuel, à laquelle il a participé comme

Einstein, sans illusion et sans résignation, qu'il faut chercher un contrepoids scientifique et philosophique à la science et à la philosophie elles-mêmes.

● Pour les œuvres de Bergson lui-même, nous renvoyons au volume des *Œuvres*, éd. A. Robinet, introd. H. Gouhier, Paris, PUF, 1959, qui comprend en marge la pagination de chaque livre en édition séparée, également aux PUF « Quadrige », ainsi qu'aux *Mélanges*, Paris, PUF, 1972.

► BENDA J., *Le Bergsonisme ou une philosophie de la mobilité*, Paris, Mercure de France, 1912. — BERTHELOT R., *Un romantisme utilitaire*, Paris, Alcan, 1913. — CANGUILHEM G., *Commentaire au troisième chapitre de l'Évolution créatrice*, Bulletin de la faculté des lettres de Strasbourg, 1943. — CAPEK M., *Bergson and modern physics*, Dordrecht, Reidel, 1971. — DELEUZE H., *Le Bergsonisme*, Paris, PUF, 1966. — GALLOIS Ph. & FORZY G. éd., *Bergson et les neurosciences*, Paris, Les Empêcheurs de penser en rond, 1997. — GOUHIER H., *Bergson et le Christ des Évangiles*, Paris, Fayard, 1961. — GROGIN R., *The bergsonian controversy*, Calgary, 1995. — GUNTER P.A.Y. éd. et trad., *Bergson and the evolution of physics*, Univ. of Tennessee, 1969. — GUNTER P.A.Y. & PAPANICOLAOU G., *Bergson and modern thought, towards a unified science*, Harwood, 1987. — MELETTI-BERTOLINI M., *Il pensiero e la memoria, filosofia e psicologia nelle revue philosophique di Théodule Ribot (1870-1916) ?*, Milan, Franco Angeli, 1991. — MERLEAU PONTY M., *Signes*, Paris, NRF, 1961 ; *Le Visible et l'invisible*, Paris, NRF, 1964. — MINKOWSKI E., *Le Temps vécu (1936)*, Paris, PUF « Quadrige », 1995. — MISSA J.-N., *L'Esprit-cerveau*, Paris, Vrin, 1994. — POLITZER G., *La fin d'une parade philosophique, le bergsonisme*, Paris, Les revues, 1929 (Pauvert, 1968). — RUSSELL B., *The philosophy of Bergson*, Mind, 1912. — SALANSKI J.-M., *Le Temps du sens*, Orléans, 1997. — SOULEZ Ph. & WORMS F., *Bergson, biographie*, Paris, Flammarion, 1997. — THIBAUDET A., *Le Bergsonisme*, Paris, NRF, 1923. — WORMS F., *Introduction à Matière et mémoire de Bergson*, Paris, PUF, 1997.

Frédéric WORMS

→ Localisations cérébrales ; Temps.

BERKELEY George, 1685-1753

Philosophe irlandais qui s'est principalement rendu célèbre pour son « immatérialisme », c'est-à-dire la démonstration originale de l'inexistence de la substance matérielle. Berkeley s'était donné pour tâche — et, en tant qu'homme d'Église, pour mission — de venir à bout du langage des savants de son temps : une toile d'araignée de termes inintelligibles, dangereux et le plus souvent superflus, dont la notion de matière était le foyer central. Le réquisitoire était cependant multiforme. Berkeley critiquait également l'optique géométrique de Descartes, le calcul des fluxions, l'espace, le temps et le mouvement absolus de Newton, les infini-simaux de Leibniz, la conception réaliste de la causalité de la plupart des physiiciens de son temps. De fait, tous les présupposés de la philosophie de la nature se trouvaient mis en cause par le principe « exister c'est être perçu ou percevoir », par lequel Berkeley inaugurerait un phénoménisme dont certaines postures de la physique contemporaine portent trace.

● *The Works of George Berkeley*, éd. Luce & Jessop, Edimbourg/Londres, 9 vol., 1948. — *Œuvres*, éd. Brykman, Paris, PUF « Épiméthée », 4 vol., 1985-1996. — *Principes de la connaissance humaine*, trad. D. Berlioz, GF-Flammarion, 1991. — *Trois dialogues entre Hylas et Philonous*, trad. G. Brykman-R. Dégremont, GF-Flammarion, 1998.

► M. ATHERTON, *Berkeley's Revolution in Vision*, Cornell Univ. Press, 1990. — BROOK R.J., *Berkeley's Philosophy of Science*, La Haye, 1973. — BRYKMAN G., *Berkeley et le voile des mots*, Paris, Vrin, 1992. — DÉGREMONT R., *Berkeley, l'idée de nature*, Paris, PUF « Philosophies », 1995. — HAMOU Ph., *Le vocabulaire de Berkeley*, Paris, éd. Ellipses, 2000. — MOKED G., *Particles and Ideas, Bishop's Berkeley's Corpuscularian Philosophy*, Oxford, Clarendon Press, 1988. — PETERSCHMITT L., « Berkeley et les hypothèses mathématiques », in *Archives internationales d'histoire des sciences*, vol. 53, 2004. — WILSON M. D., « Berkeley and the Corpuscularians », in *Essays on Berkeley*, coll. éd. par J. Foster et H. Robinson, OUP, Oxford, 1985 ; *Berkeley*, coordonné par R. Bouveresse, *Cahiers d'histoire de la philosophie de l'Université de Bourgogne*, n° 1, 2000 ; *Berkeley : Langage de la perception et art de voir*, collectif coordonné par D. Berlioz, PUF, coll. « Débats », 2003.

Geneviève BRYKMAN

→ Idéalisme ; Immatérialisme ; Matière ; Phénoménisme.

BERNARD Claude, 1813-1878

Fils d'un vigneron de Villefranche-sur-Saône, Claude Bernard entre, pour gagner sa vie, comme employé d'officine chez un pharmacien de Lyon. Il a des ambitions littéraires. Mais lorsqu'il « monte » à Paris, il commence des études de médecine. Externe, puis interne, il entre comme préparateur dans le service de Magendie au Collège de France. Docteur en médecine en 1843, sa thèse s'intitule : *Du suc gastrique et de son rôle dans la nutrition*. Ayant échoué à l'agrégation de médecine en 1844, il se consacre au laboratoire. En 1847, il est nommé suppléant de Magendie. Il lui succédera en 1855. Georges Canguilhem l'a désigné comme un « physiologiste philosophe ». Son œuvre témoigne de cette unité dans une même pensée d'une réflexion épistémologique et méthodologique sur les sciences et d'une pratique scientifique qui lui permet d'ouvrir le champ de la physiologie expérimentale.

Son œuvre scientifique est considérable. Il découvre les fonctions des glandes digestives, la fonction glycolémo-génique du foie, les nerfs vasomoteurs, les lois de la fermentation. Il fait la théorie de la chaleur animale et de l'action des poisons sur l'organisme.

Claude Bernard contribue de façon décisive à l'élaboration de la notion de milieu intérieur. Dans *l'Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), outre une présentation des méthodes appropriées à la médecine et à la physiologie, il développe des conceptions générales de philosophie des sciences. Il introduit dans le vocabulaire de l'épistémologie le mot de « déterminisme » dans son sens moderne.

● *Rapport sur les progrès et la marche de la physiologie générale en France*, Imprimerie Impériale, 1867. — *Philosophie*, Paris, Boivin, 1913. — *Principes de médecine expérimentale*, Paris, PUF, 1947. — *Cahier de notes 1850-1860*, Paris, Gallimard, 1965. — *Introduction à la médecine expérimentale*, Paris, Flammarion, 1966. — *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux végétaux et aux animaux*, Paris, Vrin, 1960. — *Dictionnaire de la pensée médicale*, sous la direction de D. Lecourt, 2^e rééd., Paris, Quadrige/PUF, 2006.

► BRILLOUIN L., *Vie, matière et observation*, Paris, Albin Michel, 1959. — CANGUILHEM G., *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1975 ; *La connaissance de la vie*, Paris, Vrin, 1975 ; *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, Paris, Vrin, 1977. — CANGUILHEM G., LAPASSADE G., PIQUEMANN J. & ULMANN J., *Du développement à l'évolution au XIX^e s.*, Paris, PUF, 1985. — GRIBEK M.D., *Raisonnement expérimental et recherches toxicologiques chez Claude Bernard*, Paris, Droz, 1973. — JACOB F., *La logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970. — MICHEL J. dir., *La nécessité de Claude Bernard*, Paris, Méridiens-Klincksieck, 1991. — PROCHANTZ A., *Claude Bernard. L'évolution physiologique*, Paris, PUF, 1990. — SCHILLER J., *Claude Bernard et les problèmes scientifiques de son temps*, Paris, Le Cèdre, 1967.

Dominique LECOURT

→ Cellule ; Déterminisme ; Régulation moléculaire ; Système ; Test ; Vitalisme et mécanisme.

BERTHELOT Marcelin, 1827-1907

Ce chimiste, fils de médecin relativement modeste, est né à Paris en 1827. Dès 1850, il présente ses premières notes à l'Académie des sciences. Docteur ès sciences en 1854, il est nommé professeur à l'École de pharmacie en 1859. En 1865, sera le premier professeur de chimie organique au Collège de France. Dès lors les honneurs ne lui font pas défaut : membre du Conseil supérieur de l'Instruction publique en 1880, sénateur inamovible en 1881, ministre de l'Instruction publique en 1886 et des Affaires étrangères en 1895, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences (1889), membre de l'Académie française (1900), il finira au Panthéon (1907).

Amplifié par son pouvoir et son influence, son acharnement à refuser la théorie atomique a certainement contribué à retarder le développement de la chimie en France. Il n'en reste pas moins que ses « synthèses organiques » ont eu un écho philosophique indéniable : figure emblématique du scientisme républicain, ses positions scientifiques réactionnaires ne l'empêchaient pas de croire et de faire croire à l'avenir radieux que la Science promet à l'humanité. Son probable suicide, le jour de la mort de sa femme (1907), ajoute une grandeur antique au mythe d'un personnage complexe, important et discuté.

● D'une extraordinaire fécondité, Berthelot a signé plus de 600 articles concernant la chimie organique ou agricole, la thermochimie, etc. dans les *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, les *Annales de chimie*, etc. Ces travaux ont été repris ou développés dans plusieurs livres et traités : dans le domaine

de l'histoire de l'alchimie et de la chimie on lui doit : *Les Origines de l'Alchimie*.

On suivra son œuvre « philosophique », au travers de ses livres comme *Science et Philosophie* (1886), *Science et Morale* (1891), *Science et Éducation* (1901), *Science et Libre Pensée* (1905) et sa *Correspondance* avec E. Renan.

► JACQUES J., *Berthollet Autopsie d'un mythe*, Paris, Belin, 1986. — JUNGLEISCH E., *Notice sur la vie et les travaux de Marcelin Berthollet*, Bulletin de la Société chimique de France, 1913. — VELLUZ L., *Vie de Berthollet*, Paris, Pion, 1964. — VIRTANEN R., *Marcelin Berthollet, A Study of a Scientist's Public Role*, Univ. of Nebraska Studies, 1965.

Jean JACQUES

→ Synthèse.

BERTHOLLET Claude-Louis, 1748-1822

Chimiste, Berthollet participa efficacement à la diffusion de la nouvelle chimie fondée par Lavoisier (*Méthode de nomenclature chimique*, 1787). Ses travaux dans le domaine de la chimie appliquée, comme la mise au point d'un nouveau procédé de blanchiment des tissus (*Éléments de l'art de la teinture*, 1791) le rendirent célèbre parmi les industriels. Sa méthodologie scientifique, fondée sur une objectivité rigoureuse et sur la nécessité des hypothèses pour contrôler les expériences, le guida dans la construction de sa théorie générale de l'action chimique (*Recherches sur les lois de l'affinité*, 1801 ; *Essai de statique chimique*, 1803). Cette théorie, opposée à la théorie des affinités électives, ne fut jamais totalement acceptée. Une controverse célèbre opposa Berthollet et J.L. Proust à l'égard des proportions de combinaison des substances chimiques (1799-1806). Berthollet était en totale opposition envers l'hypothèse des proportions fixes que Proust estimait avoir prouvée. Le point de vue de Proust succéda et fut universellement adopté par tous les chimistes. À partir de 1801, Berthollet et son ami le physicien P.S. Laplace réunirent un petit groupe de jeunes savants chimistes et physiciens qui fut bientôt connu sous le nom de Société d'Arcueil, société qui joua un rôle important dans le monde scientifique français jusqu'à la fin de l'Empire.

► GOUPIE M., *Le Chimiste Claude-Louis Berthollet (1748-1822). Sa Vie - Son Œuvre*, Paris, Vrin, 1977.

Percé GRAPÉ

→ Affinité : Lavoisier.

BICHAT Xavier, 1771-1802

Médecin, anatomiste et physiologiste français. Les idées publiées par Bichat dans ses *Recherches physiologiques sur la vie et la mort* débutant par la fameuse définition de la vie comme « ensemble des fonctions qui résistent à la mort », exercèrent une profonde

influence, non seulement en médecine, sur les travaux de l'École de Paris, mais aussi chez les philosophes. Ainsi, Hegel fit-il de fréquentes allusions à l'œuvre de Bichat, et Schopenhauer se voulut son disciple, tout comme Cabanis. Hostile à la médecine iatromécanicienne (Boerhaave), Bichat n'admet cependant pas complètement l'existence du principe vital de Barthez (le refus du vitalisme métaphysique), bien que les propriétés vitales demeurent à ses yeux irréductibles aux lois physiques. Ainsi fait-il du vitalisme une application toute nouvelle, en attribuant à chaque organe, à chaque tissu, une sensibilité et une contractilité propres, qui lui permet de conserver une assez large autonomie. D'où l'idée d'une « décentralisation » du principe vital (O. Keel) et de son incarnation dans les tissus de l'organisme, elle-même empruntée à l'œuvre de John Hunter (1728-1793). Claude Bernard ne manquera pas à cet égard d'évoquer la dette contractée par « les opinions modernes concernant les phénomènes vitaux » envers la pensée de Bichat, dans ses *Leçons sur les phénomènes de la vie*. De même Auguste Comte reconnaîtra à Bichat (dont le nom figure dans le calendrier positiviste) le mérite d'avoir contribué à établir la spécificité d'une science générale de la vie, au moment où Lamarck et Treviranus inventent simultanément le concept de « biologie » (1802). Aussi, Bichat devint-il la figure moderne du médecin matérialiste du XIX^e s., à la charnière de la pratique médicale et de la pratique anatomique (J.F. Braunstein).

► *Œuvres chirurgicales de Desault*, Paris, 3 vol., 1798-1799. — *Recherches physiologiques sur la vie et la mort*, 1800, Paris, Gauthier-Villars, 1955. — *Traité des membranes en général et de diverses membranes en particulier*, 1800. — *Anatomie générale, appliquée à la physiologie et à la médecine*, 4 vol., 1801. — *Traité d'anatomie descriptive*, 1801-1803.

► BRAUNSTEIN J.F., *Broussais et le matérialisme. Médecine et philosophie au XIX^e siècle*, Paris, Klincksieck, 1986. — CANGUILHEM G., « Bichat », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1970, t. II, p. 122-123. — FOUCAULT M., *Naissance de la clinique*, Paris, PUF, 1963. — KEEL O., « Les conditions de la décomposition "analytique" de l'organisme : Haller, Hunter, Bichat », *Les Études philosophiques*, janv.-mars 1982. — LAIGNEL-LAVASTINE M., « Sources, principes, sillage et critique de l'œuvre de Bichat », *Bulletin de la Société française de philosophie*, 46, 1952. — LAIN E.P., « Sensualism and Vitalism in Bichat's Anatomie générale », *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, 3, 1948, p. 47-64. — PICHOT A., *Histoire de la notion de vie*, Paris, Gallimard, 1993.

ÉRIC HAMRAOUI

→ Vitalisme et mécanisme.

BIG BANG

La cosmologie du XX^e s. se fonde sur un pilier observationnel, la prise en compte de l'expansion de l'univers que nous dévoilent les observations et sur un pilier théorique constitué de l'application de la théorie de la relativité générale. Sa nouveauté fondamentale

consiste dans l'énoncé que l'univers évolue, la tâche essentielle des cosmologues consistant à retracer son histoire au moyen de modèles cosmologiques. Parmi les modèles qu'ils ont imaginés, les seuls à rendre compte des observations, et à le faire d'une manière étonnamment précise, sont les modèles de big bang.

L'expansion de l'univers

Aujourd'hui, nous avons mesuré les décalages vers le rouge de plusieurs dizaines de milliers de galaxies, qui confirment le vaste mouvement universel d'expansion. Celle-ci fut comprise, et admise au début des années 1930, essentiellement grâce aux travaux du physicien belge Georges Lemaître. Ce fut lui, également, qui en comprit le premier les implications : si l'univers est en expansion, il doit nécessairement évoluer, il doit avoir une histoire. Le raisonnement de départ est simple : selon nos lois physiques, la matière ne peut apparaître ou disparaître. Il doit donc exister toujours la même quantité de matière mais dans un volume qui, selon la loi d'expansion, augmente sans arrêt : la matière se dilue, sa densité diminue. Il en découle immédiatement que l'univers devait être de plus en plus dense dans le passé. Tel est le raisonnement à la base des modèles de big bang. Mais Lemaître n'emploie pas ce terme et propose, dans les années 1930, une théorie « de l'atome primitif » qui, curieusement, éveilla bien peu d'intérêt chez ses collègues. Véritable précurseur de la cosmologie moderne, Lemaître tente même d'intégrer dans sa reconstitution du passé de l'univers les idées de la physique quantique en train de naître. Ainsi il pense que, en remontant dans le passé, l'univers devait ressembler de plus en plus à un « quantum » unique, sans qu'il précise très en détail cette notion, faute d'outils pour le faire.

À vrai dire, les collègues de Lemaître avaient une bonne raison de rester réticents. Les modèles cosmologiques fondés sur l'idée d'expansion conduisaient alors, en effet, à l'idée d'un âge de l'univers de l'ordre de 1 ou 2 milliards d'années, alors que la Terre est elle-même âgée de plus de 4 milliards d'années. Cette contradiction empêcha longtemps la communauté scientifique d'adhérer aux modèles de big bang. Jusqu'à ce que l'on comprenne que ces estimations de l'âge de l'univers reposaient sur une mesure erronée de la « constante de Hubble ». De nouvelles estimations permettront à toutes les pièces du puzzle cosmique de se mettre en place, rendant l'idée de big bang presque aveuglante.

Mais nous n'en sommes pas encore là. Dans les années 1930, les idées de Lemaître ne rencontrent que très peu d'écho. Elles seront reprises dans les années 1940, à la suite du développement de la physique nucléaire. Le physicien russe Georges Gamow, exilé aux États-Unis, pense à la suite de Lemaître que des conditions très particulières ont dû caractériser l'univers primordial : fortes densités, fortes énergies auraient permis le développement de réactions nucléaires. Ces dernières n'auraient-elles pu fabriquer

les éléments chimiques qui se répartissent aujourd'hui dans l'univers ? En 1948, Gamow publie avec ses collègues Hans Bethe et Ralph Alpher un article que l'histoire a retenu sous le nom alpha-bêta-gamma (Bethe n'avait à vrai dire pas participé à ce travail, son nom n'ayant été rajouté que pour permettre cette facétie patronymique). Les auteurs y développent l'idée que les éléments auraient pu avoir été fabriqués au sein de l'univers primordial, dont Gamow baptise le contenu du nom de « yleim ». De fait tout ne marche pas encore très bien et d'autres calculs montreront que seuls quelques-uns des noyaux — les plus légers — ont pu être fabriqués lors de cette phase de « nucléosynthèse primordiale ». Toujours est-il qu'il y avait là l'ébauche de ce qui allait devenir l'un des plus grands succès des modèles de big bang. Par ailleurs, Alpher et Hermann font en 1948 une prédiction d'importance absolument fondamentale. Selon leurs calculs, de grandes quantités de rayonnement électromagnétique doivent être présentes aujourd'hui dans l'univers, subsistant de cette époque primordiale. Ils en calculent même la température. Mais il est encore trop tôt.

La théorie de « l'univers chaud » de Gamow est loin d'être acceptée. Elle sera bientôt baptisée théorie de « big bang », par l'un de ses principaux opposants, l'astrophysicien Fred Hoyle. N'acceptant pas le big bang, il proposait une théorie concurrente, dite de « l'état stationnaire ». Cette théorie était très séduisante car elle réussissait à concilier l'expansion, un fait observationnel avéré, avec l'exigence plutôt métaphysique que l'univers demeure toujours dans un état semblable. Elle présentait néanmoins un point délicat, qui l'opposait au big bang. Supposer que l'univers puisse rester semblable à lui-même, malgré la dilution due à l'expansion, exigeait d'admettre un mystérieux processus de création spontanée de matière. Mais cette théorie s'est de toute manière finalement vue contredite par les observations, qui devaient au contraire confirmer les modèles de big bang.

Dans les années 1960, un groupe de physiciens de Princeton, s'intéressant aux modèles de big bang, avaient réitéré la prédiction de l'existence d'un rayonnement électromagnétique remplissant l'univers. La radioastronomie ayant progressé, ils avaient entrepris la construction d'un détecteur pour le mettre en évidence. Malheureusement pour eux, ils furent dépassés par deux collègues radioastronomes, Arno Penzias et Robert Wilson, qui découvrirent avant eux ce « rayonnement de fond diffus cosmologique ». Cela valut un prix Nobel à ces deux observateurs, et entraîna l'adhésion de la communauté scientifique aux modèles de big bang.

La relativité générale

La relativité générale est une théorie de la gravitation, ainsi que de l'espace et du temps. Dès sa publication en 1917, son inventeur Albert Einstein et ses collègues furent convaincus qu'elle offrait un cadre adapté à l'étude de la cosmologie. En effet, selon nos

conceptions du XX^e s. l'univers se définit comme l'espace et le temps, réunis dans un cadre commun appelé espace-temps, indissociable de son contenu constitué de matière, rayonnements et énergie. La cosmologie scientifique a pu se donner comme tâche de préciser, quantifier, les propriétés de l'espace et du temps ; et, par conséquence, du contenu de l'univers.

À cette fin, la relativité permet de construire des modèles d'univers relativistes, consacrés à la description des propriétés de l'espace-temps et de son contenu. Les modèles initiaux, notamment le premier proposé par Einstein lui-même, étaient antérieurs à la découverte de l'expansion cosmique. Pour cette raison, c'étaient des modèles statiques, selon lesquels les propriétés de l'espace et de son contenu restaient les mêmes au cours du temps. Les modèles suivants, à partir des années 1930 et jusqu'à aujourd'hui, prenant en compte l'expansion de l'univers, rendaient compte des propriétés et de l'évolution temporelle des propriétés de l'espace, ainsi que du contenu énergétique et matériel de l'univers. Tous ces modèles sont baptisés « modèles de Friedmann-Lemaître ». Le physicien soviétique Alexander Friedmann fut en effet le premier à découvrir ces solutions théoriques, tandis que Lemaître, les ayant redécouvertes indépendamment, comprit leur intérêt pour la cosmologie physique.

À ce propos, la relativité générale offre pour particularité que les propriétés de l'espace et du temps se déterminent à partir du contenu énergétique de l'univers d'une part, et d'une constante additionnelle λ baptisée constante cosmologique d'autre part. C'est l'équation d'Einstein, l'équation fondamentale de la relativité, qui exprime comment le contenu de l'univers et la constante cosmologique λ déterminent les propriétés de l'espace-temps.

Matière et rayonnements

Le cosmologue considère l'univers dans sa globalité. Peu importe la présence, ici ou là, d'une galaxie ou de tout autre objet cosmique. Seule l'intérêt de la répartition globale de matière et, au moins dans un premier niveau d'analyse, il ne considère que des grandeurs moyennées dans tout l'espace : densités, pressions et températures, de la matière et des rayonnements, les mêmes d'un point à l'autre de l'espace, mais variant dans le temps à cause de l'expansion. Ce parti pris repose sur l'adoption du Principe cosmologique, qui énonce également qu'il n'existe aucune direction privilégiée dans l'univers : que ce dernier est isotrope. Ce principe absolument fondamental fonde et justifie la cosmologie. Comme la plupart des principes à la base de la physique, il est de nature théorique, ne reposant ni sur l'expérience ni sur l'observation. Une fois posé, il permet néanmoins de construire des modèles cosmologiques, et d'effectuer par ce biais des prédictions que confirment les observations. Il est ainsi validé aux yeux des cosmologues, bien qu'il reste possible de le remettre en cause pour proposer, par exemple, d'autres modèles plus complexes.

Les observations astronomiques révèlent un contenu de l'univers très diversifié : étoiles, gaz, molécules, poussières, etc., le plus souvent regroupés au sein de galaxies. La cosmologie, dans son approche globale, en néglige les détails et le décrit comme un « fluide cosmique » omniprésent, que sa densité ρ , sa pression p et sa température T moyennes suffisent à caractériser. Moyennant ces hypothèses, les équations d'Einstein se simplifient et deviennent les équations de Friedmann. Ces dernières permettent de calculer les propriétés globales de l'espace-temps, en fonction de ρ et p , ainsi que de la constante cosmologique λ .

Lorsque l'on inventorie le contenu de l'univers, matière et rayonnements, les observations nous indiquent deux résultats très importants : d'une part l'énergie contenue aujourd'hui dans l'univers est essentiellement sous forme de matière (et non pas de rayonnements) ; et d'autre part la pression de la matière joue aujourd'hui un rôle tout à fait négligeable. Alors, la seule connaissance de λ et la densité actuelle de la matière permet de déterminer les propriétés de l'univers. Malheureusement nous n'avons pas de moyen direct de mesurer λ . En revanche, on peut espérer pouvoir estimer la densité moyenne de matière dans l'univers. La plupart du temps, les cosmologues expriment cette dernière dans une unité particulière à la cosmologie, la densité critique $\rho_{\text{critique}} = 3H_0^2/8\pi G = 1.96 [H_0/(100 \text{ km/sec/Mpc})]^2 \cdot 10^{-29} \text{ g.cm}^{-3}$. Cette valeur particulière dépend de la constante de Hubble H_0 car elle est définie comme la valeur particulière de la densité capable de contrebalancer les effets de l'expansion, mesurés par H_0 précisément. On exprime alors la densité moyenne de matière dans l'univers, dans cette unité, par $\Omega = \rho/\rho_{\text{crit}}$.

La question de la valeur de Ω préoccupe les cosmologues depuis maintenant plus d'un demi-siècle. Elle est en effet déterminante pour estimer toutes les propriétés cosmiques. Si la communauté est convaincue qu'elle se situe entre 0.1 et 1, nous n'en savons pour le moment pas davantage.

Densité moyenne et modèles de big bang

Si l'on inventorie la matière, les galaxies, les étoiles, le gaz, les poussières, et tout ce que nous sommes capables d'observer, la contribution correspondante atteint une valeur de Ω voisine de 0.01. Mais les choses ne sont pas aussi simples car différentes analyses suggèrent que galaxies et amas de galaxies contiennent au moins 10 fois plus de masse que celle des objets que nous voyons. Ce problème de la masse cachée suggère que la valeur de Ω pourrait être entre 0.1 et 0.3, domaine de valeurs aujourd'hui le plus probable, bien que non certain. Nous ne connaissons pas la valeur de λ ; il convient de remarquer que certains auteurs notent parfois Ω_λ ce que j'appelle ici λ , et Ω ce que j'appelle ici $\Omega + \lambda$.

À partir de l'ensemble des résultats observationnels, les « équations de Friedmann » conduisent à une variété de modèles cosmologiques, au sein de la famille

des modèles de Friedmann-Lemaître. Ils diffèrent entre eux par les caractéristiques géométriques de l'espace, exprimées essentiellement par sa courbure, et par leur évolution, selon la loi d'expansion $R(t)$.

Les propriétés de l'espace

Au sein de l'univers, assimilé à l'espace-temps, la relativité permet de dissocier l'espace et le temps, d'une manière particulière qui autorise à parler des propriétés de l'espace. On peut les définir à un instant donné, et suivre leur évolution dans le temps.

La structure géométrique de l'espace se définit par sa courbure et par sa topologie. La notion de courbure de l'espace, qui généralise celle de courbure d'une surface, se définit par son signe d'une part, positif ($k = 1$), négatif ($k = -1$) ou nul ($k = 0$) ; et par la valeur du « rayon de courbure » d'autre part.

Il existe trois familles d'espaces possibles. Ceux pour lesquels $k = 0$ correspondent à un espace « plat » ou euclidien, celui dont nous apprenons les propriétés à l'école. Le rayon de courbure est alors infini. Mais les deux autres cas sont plus complexes. Il s'agit des « espaces non euclidiens » découverts par les mathématiciens du XIX^e s., des variétés à 3 dimensions dans le langage des mathématiques modernes : les modèles sphériques, de courbure positive ($k = 1$), généralisent à trois dimensions la surface d'une sphère (à 2 dimensions). La courbure peut être également négative ($k = -1$), et les modèles sont alors dits hyperboliques. La relativité prédit que le signe de k est celui de $\Omega + \lambda - 1$. Mais, connaissant mal ces quantités, nous ne savons pas de quelle famille relève l'espace physique. L'espace plat ($k = 0$) représente une sorte de cas limite, intermédiaire entre courbures positive et négative. Pour cette raison, certains le considèrent avec une faveur particulière, parce que « plus simple » ou « plus naturel ». D'autres ont au contraire tendance à le rejeter comme très « improbable » parmi toutes les possibilités. Ces notions sont de toute façon mal définies, et seules les observations permettront de trancher.

Le signe k de la courbure est lié à la question ancestrale du caractère fini ou infini de l'espace. Néanmoins celui-ci dépend également d'une autre propriété de l'espace, sa topologie. Sans rentrer dans les détails, je me bornerai à indiquer que pour toute valeur de k , l'espace peut être fini (bien que sans frontières). Si la courbure est nulle ou négative, il peut également être infini.

La courbure ne se définit pas seulement par son signe mais aussi, comme pour une surface, par la valeur R_c d'un « rayon de courbure de l'espace », quantité qui généralise le rayon d'une sphère (pour l'espace normal, « plat », ce rayon est infini). Les effets de courbure sont d'autant plus prononcés que R_c est élevé. Mesurer sa valeur est en principe possible, mais encore hors de notre portée dans la pratique. Les effets de courbure étant faibles, les observations imposent néanmoins que R_c soit nécessairement très grand, plusieurs milliards d'années-lumière au moins. Il s'agit de la

valeur actuelle car R_c suit la loi d'expansion cosmique et augmente avec le temps.

La loi d'expansion

La grande inconnue de la cosmologie, c'est la loi de l'expansion cosmique, qui exprime la variation temporelle des propriétés de l'espace, et qui gouverne le comportement de l'univers. Cette loi exprime comment une longueur cosmique augmente dans le temps : toute longueur augmente proportionnellement à une quantité $R(t)$, choisie comme étalon de longueur cosmique pour représenter la loi d'expansion. Ce « rayon d'échelle » est en général identifié, par commodité, au rayon de courbure de l'univers R_c (sauf si celui-ci est infini). Une des tâches principales de la cosmologie consiste à connaître la loi $R(t)$.

La seule information que nous livrent de manière directe les observations, c'est la valeur actuelle du taux d'expansion, donnée par la constante de Hubble H_0 . Nous ne connaissons d'ailleurs encore H_0 qu'avec une précision limitée. Par ailleurs, nous avons toutes les raisons de penser que l'expansion ne peut que se ralentir. Cette conviction résulte du caractère attractif de la gravitation. Cette interaction, qui gouverne l'évolution de l'univers, tend en effet à rassembler les choses, et non pas à les disperser. S'opposant à l'expansion, elle la ralentit, même si nous ignorons avec quelle efficacité (voir plus bas). Alors, un raisonnement très simple montre que si l'expansion se ralentit elle ne peut durer que depuis un temps fini. Cette conclusion extrêmement importante caractérise les modèles de big bang. En jouant sur les différents paramètres, on pourrait imaginer des modèles où le taux d'expansion reste constant, ou même accélère. Selon ces modèles, l'expansion pourrait durer depuis toujours (depuis un temps infini). Mais pour cela, il faudrait que la dynamique de l'univers soit dominée par autre chose que de la matière ou du rayonnement ordinaire, ou bien que de la matière puisse être créée *ex nihilo*. Ce n'est pas ce que nous laissons supposer les lois de la physique connue. Cette dernière nous conduit à la conclusion que la phase d'expansion, dans laquelle se trouve l'univers, ne date que d'une durée finie, que l'on nomme âge de l'univers.

La signification de cette notion est discutée dans la section expansion. Du point de vue des modèles, cette quantité possède un sens bien concret, mesurant le temps écoulé depuis le début de la phase d'expansion. La relativité permet de le chiffrer en fonction des trois paramètres H_0 , Ω et λ . Les calculs prédisent qu'il doit être de l'ordre de $1/H_0$, la valeur exacte dépendant des valeurs (inconnues) de ces trois paramètres. Compte tenu des contraintes actuelles, les modèles de big bang prédisent une valeur comprise entre 5 et 25 milliards d'années. Or, les âges des étoiles les plus anciennes observées sont estimés autour de 10 à 15 milliards d'années, précisément au milieu de cette fourchette ! Cet accord remarquable constitue le premier argument en faveur des modèles de big bang.

Diverses erreurs avaient conduit les astronomes, il y a quelques décennies, à une mauvaise estimation de H_0 . L'âge estimé de l'univers avoisinait alors le milliard d'années, moins que l'âge de la Terre ! Cette erreur a sans doute retardé de plus d'une décennie l'acceptation des modèles de big bang. Aujourd'hui, les astronomes s'accordent autour d'une valeur bien inférieure pour H_0 , et tout va très bien pour les modèles de big bang. Les contraintes issues de l'âge de l'univers semblent impliquer que Ω soit de l'ordre de quelques dixièmes de l'unité, et que λ ne soit pas nul.

Les modèles de big bang

Du fait de l'expansion, la même quantité de matière occupe, dans l'espace en expansion, un volume de plus en plus grand qui augmente comme $R(t)^3$: sa densité moyenne $\rho_m(t)$ diminue donc comme $1/R(t)^3$. Elle était donc plus élevée dans le passé, d'autant plus que l'on remonte loin. Cette dilution de la matière implique l'existence d'une phase passée très dense et très condensée, caractéristique essentielle des modèles de big bang. Lemaître fut le premier à le comprendre et à en tenir compte, dans les années 1930.

L'univers évolue donc. Il est différent aujourd'hui de ce qu'il était quelques milliards d'années auparavant. En particulier, la dilution s'accompagne d'un refroidissement graduel depuis la phase dense et chaude : la température moyenne de l'univers diminue. Par ailleurs, nous avons évoqué la matière mais pas le rayonnement. Or, si son rôle est aujourd'hui négligeable, son importance est d'autant plus grande que l'on remonte loin dans le passé. Les cosmologues définissent une première phase, dite primordiale dans l'histoire de l'univers. La densité d'énergie y était des milliards de fois plus élevée qu'aujourd'hui, la température moyenne dépassait le milliard de degrés (nulle part dans l'univers la température ne descendait en dessous de cette valeur !). Et la dynamique de l'univers était dominée non pas par la matière, comme aujourd'hui, mais par le rayonnement électromagnétique. Dans la chronologie des modèles de big bang, cette phase s'est déroulée pendant environ le premier million d'années, comparé aux 15 milliards de la phase qui a suivi. Enfin, l'histoire des modèles de big bang peut être vue comme celle d'une structuration progressive : dans l'univers primordial, n'existait encore aucun objet, ni à l'échelle microscopique ni à l'échelle astronomique, ni d'ailleurs aux échelles intermédiaires. Les objets les plus élaborés étaient les noyaux des atomes les plus simples (voir ci-dessous). La structuration de la matière s'est faite de manière progressive et caractérise le déroulement de l'histoire cosmique selon ces modèles.

Recombinaison et rayonnement fossile

Un phénomène d'importance fondamentale, la recombinaison, marque la coupure entre l'univers pri-

mordial et l'ère de la matière. L'univers primordial était tellement chaud ($T > 3000^\circ$) que toute la matière présente était ionisée. Il était de ce fait rempli d'électrons libres qui, barrant le chemin aux photons, les empêchaient de se propager : l'univers primordial était opaque ! En outre ces électrons, interagissant aussi bien avec la matière qu'avec le rayonnement, couplaient étroitement ces deux espèces. La matière, empêchée de se déplacer librement, ne pouvait alors se concentrer pour former des étoiles ou des galaxies, interdisant la présence de tout objet dans l'univers primordial.

La recombinaison est définie comme le moment où l'ionisation cesse. Les électrons libres disparaissent alors car ils se recombinaient avec les protons présents pour former des atomes neutres. Grâce à ce découplage entre rayonnement et matière, cette dernière devient transparente. De plus, elle peut entamer le long processus de structuration qui, bien plus tard, aboutira à l'apparition des étoiles, planètes et galaxies.

À la recombinaison, le rayonnement électromagnétique devient libre lui aussi. Il s'est propagé sans entrave jusqu'à nos jours. Toujours présent, il constitue un véritable fossile de cette époque, sous la forme du fameux rayonnement diffus cosmologique. Son existence fut prédite dès les années 1940. Il fut découvert en 1965. Depuis, de très nombreuses observations – jusqu'à celles du satellite COBE – ont confirmé de mieux en mieux la parfaite conformité de ses caractéristiques avec les prédictions des modèles de big bang. En l'absence d'aucun autre moyen de rendre compte de sa présence, cette dernière constitue l'un des plus solides arguments en faveur du big bang.

L'univers primordial

La phase récente de l'univers (les derniers milliards d'années) est gouvernée par une physique relativement ordinaire et connue. Les galaxies, les objets astronomiques que nous observons naissent et vivent durant cette période. En revanche, l'univers primordial présentait un aspect très différent. Ce n'était qu'une immense mer (une « soupe ») de particules, chaude et uniforme, dont la physique était gouvernée essentiellement par les propriétés du rayonnement électromagnétique. En remontant dans le passé aux périodes de plus en plus lointaines, donc à des températures et énergies de plus en plus élevées, interviennent la physique nucléaire et la physique des particules. Encore plus loin dans le passé, nous ne disposons d'aucune théorie ! Nous nous heurtons à la barrière de Planck.

La synthèse des atomes

Dans l'univers primordial, aux températures dépassant le milliard de degrés, densité et énergie étaient si élevées que les noyaux atomiques eux-mêmes ne pouvaient exister. Vers 1940, Gamow et ses collaborateurs eurent l'idée que les noyaux constituant la matière

actuelle auraient pu être fabriqués vers cette époque, par des réactions nucléaires se déroulant dans ces conditions de fortes densité et température. En fait la majorité d'entre eux ont été formés beaucoup plus récemment, au cœur des étoiles. Mais certains ont bien été fabriqués lors du big bang. Il s'agit des noyaux les plus « légers », ceux de deutérium, d'hélium et de lithium. Les calculs de nucléosynthèse primordiale prédisent, pour ces éléments, des abondances en accord avec les observations, s'échelonnant sur 10 ordres de grandeur. Encore une fois, seul le big bang explique un tel accord !

De fait, les abondances ainsi établies dépendent des conditions qui régnaient alors dans l'univers primordial. L'accord avec les observations implique certaines contraintes sur les grandeurs cosmiques. En particulier la densité de la matière sous forme d'atomes ordinaires ne peut dépasser une certaine contribution à Ω , de l'ordre de 0.1. En outre, les mêmes calculs avaient permis aux cosmologues de prédire qu'il ne doit exister dans la nature que 3 familles de particules (familles de neutrinos) et pas davantage. Cette prédiction fut vérifiée en 1983, autre succès pour le big bang.

Nous n'avons pas une chronologie très précise de tous ces phénomènes, à cause de notre mauvaise connaissance des paramètres cosmologiques. La durée totale de la phase d'expansion est de l'ordre de 15 milliards d'années, celle de l'univers primordial de l'ordre du million d'années. La nucléosynthèse primordiale s'est déroulée environ 3 minutes seulement après le début de l'ère d'expansion. Cette période est la plus lointaine dans le passé que nous sachions décrire avec une relative confiance. Au-delà, les conditions physiques deviennent démesurément éloignées de ce qu'elles sont aujourd'hui : densités dépassant celles de la matière nucléaire, températures dépassant les milliards de degrés ! Ni atomes, ni même noyaux d'atome, seulement une mer de particules libres, régie par une physique que nous ignorons en grande partie. Les cosmologues sont donc réduits aux spéculations pour décrire les premières secondes de l'univers, ce que l'on pourrait appeler « l'univers très primordial ». Ce sujet suscite néanmoins un grand intérêt chez les cosmologues et les physiciens, depuis les années 1970. De nombreuses idées originales et fécondes ont été proposées. Bien qu'elles ne soient pas encore validées, certaines d'entre elles au moins se révéleront très probablement fructueuses.

De nombreux physiciens pensent par exemple que les différentes interactions de la physique doivent plus ou moins se fondre, « s'unifier » dans les conditions de l'univers très primordial. En liaison ou non avec cette idée, il est possible que l'univers dans son ensemble ait pu subir une « transition de phase cosmique », analogue à la prise en glace de l'eau d'un lac. Une telle « brisure de symétrie cosmique » aurait pu modifier le déroulement de l'histoire cosmique. Certaines versions, selon l'idée d'inflation, suggèrent que l'univers aurait pu subir une expansion non pas ralentie mais démesurément accélérée. Ce phénomène, malgré sa

durée très brève, aurait pu entraîner des conséquences très particulières. Il aurait pu être causé par des effets quantiques, selon lesquels une forme d'énergie très particulière, baptisée « énergie du vide », aurait dominé l'univers. C'est lors d'une telle phase qu'aurait pu être engendrées les premières fluctuations microscopiques qui, des milliards d'années plus tard, auraient conduit à la formation des galaxies. Personne, néanmoins, n'a réussi à construire une théorie d'inflation convaincante et certains physiciens ne reconnaissent aucune validité à cette approche.

D'autres versions de l'histoire suggèrent que l'univers aurait pu voir apparaître à ces époques très reculées des objets très étranges, « monopoles magnétiques », « cordes cosmiques » (les plus en faveur) ou « murs domainaux ». Tout ceci reste encore du domaine de la spéculation.

Le but de ces tentatives est de compléter les modèles de big bang, mais certainement pas de les remettre en cause. Faute de théorie adéquate, la physique est actuellement inapte à rendre compte de ce qui s'est passé durant les instants les plus reculés. Par ailleurs, si les modèles de big bang décrivent extrêmement bien notre univers, ils n'expliquent pas tout. En particulier, ils n'expliquent pas... leur propre succès ! C'est pourquoi il convient de rechercher une physique encore plus fondamentale, qui viendrait compléter les modèles, et les justifier d'un point de vue épistémologique. L'idée d'inflation représente un balbutiement dans cette direction. Pour aller plus loin, des explorations d'une grande difficulté sont actuellement menées vers la recherche d'une possible cosmologie quantique. Cosmologie physique et modèles de big bang sont en tout cas plus que jamais vivants en cette fin de XX^e s. Peut-être leur exploration conduira-t-elle à la physique du troisième millénaire.

► BERTOTTI B. et al. éd., *Modern cosmology in retrospect*, Cambridge Univ. Press, 1990. – DEMARET J., *Univers*, Le Mail, 1991. – GRIBBIN J., *À la poursuite du Big Bang*, Monaco, Le Rocher, 1991. – HAKIM R., *La science et l'univers*, Paris, Syros/Alternatives, 1992. – KLEIN E. & LACHÛZE-REY M., *Propos sur l'unité : la physique en marche*, Paris, Albin Michel, 1996. – LACHÛZE-REY M., *Initiation à la Cosmologie*, Paris, Masson, 1996. – LACHÛZE-REY M., *a first course*, Cambridge Univ. Press, 1995. – LACHÛZE-REY M. & GUNZIG E., *Le fond diffus cosmologique*, Paris, Masson, 1995. – MAZURE A., MATHEZ G. & MELLIER Y., *Chronique de l'espace-temps*, Paris, Masson, 1994. – NOTTALÉ L., *L'univers et la lumière*, Paris, Flammarion, 1994. – WEINBERG S., *Gravitation and cosmology*, New York, John Wiley & Sons, 1980. – ZEL DOVICH Y.B. & NOVIKOV I.D., *Relativistic Astrophysics*, Univ. of Chicago Press, 1983. – « Le big bang en questions », *Science et Vie*, hors-série n° 189, déc. 1994. – *Les particules et l'univers*, Paris, PUF, 1990. – *Aux confins de l'univers*, Paris, Fayard/Fondation Diderot, 1987.

Marc LACHÛZE-REY

→ Antimatière ; Constante de Hubble ; Expansion de l'univers ; Invariance de jauge ; Principe anthropique ; Symétrie ; Univers.

BIODIVERSITÉ

Le concept de biodiversité est l'un de ceux qui permettent le mieux d'aborder la question de la place de la recherche scientifique dans la société, tout en se prêtant à une analyse d'histoire récente des sciences. Les scientifiques exprimèrent à partir des années 1960 leur inquiétude sur la dégradation des milieux naturels et des êtres vivants qui les constituent (Dorst, 1965). Les questions de conservation de la nature culminèrent dans les années 1980 (l'article de 1985 du zoologiste Edward O. Wilson sur la crise de la diversité biologique en est un exemple marquant). La décennie suivante vit cristalliser dans la société tout entière la problématique de la gestion de cette crise, jetant un coup de projecteur sur la notion de recherche sur la biodiversité. Le terme même de « biodiversité » a été forgé, semble-t-il, par Walter G. Rosen en 1985 pour une réunion tenue à Washington, intitulée National Forum to Biodiversity, dont les actes furent publiés l'année suivante (Wilson & Peters, 1986). Auparavant les scientifiques parlaient de diversité biologique mais avec le terme de « biodiversité » était formalisée une conception non seulement de la biologie mais, surtout, de la relation entre la société humaine et le monde vivant. Dès le départ, la biodiversité est conçue vis-à-vis de l'activité humaine. Les sociétés humaines utilisent une vaste gamme de ressources biologiques et s'appuient sur leur diversité pour produire biens de consommation et services. Si l'on oppose société des hommes et biodiversité c'est pour mieux reconnaître l'interaction : les effets humains altèrent la biodiversité et celle-ci fournit des valeurs essentielles à l'activité humaine. On comprend aisément, de la sorte, combien le concept de biodiversité est nourri de politique et non seulement de science. Les problèmes liés à la crise de la biodiversité furent intégrés par les responsables politiques de la planète à l'occasion du désormais célèbre sommet de la Terre à Rio de Janeiro en juin 1992. Sur le plan politique, les notions de réorientation économique vers le développement durable, de principe de précaution, de fiscalisation du système pollueur-payeur, sont notamment héritées du sommet de Rio. Derrière ces notions demeure celle dont tout dépend : la biodiversité. Une convention sur la diversité biologique fut adoptée par 101 gouvernements à Nairobi en mai 1992 puis signée par 159 pays et par l'Union européenne à Rio le mois suivant. Ce n'est pas le lieu ici de détailler le cadre – fort contraignant eu égard aux habitudes humaines en la matière – de cette convention et de ses dispositions afin de préserver la richesse de la diversité biologique, ni d'en tirer un quelconque bilan treize ans plus tard. Il suffit de rappeler ce que déclara dès 1997, le secrétaire général du sommet de la Terre de Rio, Maurice Strong, en préambule à l'assemblée générale extraordinaire des Nations Unies à New York, visant à tirer le bilan des engagements internationaux : « Les gouvernements ont pris quelques mesures positives, mais les performances sont décevantes et ne sont pas à la hauteur des défis à

relever » (cité par Besset, 1997). Il reste que tout un chacun s'empara de la biodiversité devenue un sujet de prédilection des médias. En écho, les ouvrages de vulgarisation dépassèrent la sphère des colloques et tables rondes spécialisées qui se tenaient sur le thème de la biodiversité biologique dans les années 1980 (par exemple Wilson, 1993 ; Chauvet & Olivier, 1993 ; Barbault, 1994). Cependant, quand bien même voudrait-on réfléchir sur ces notions, qu'il serait nécessaire de préciser, au préalable, ce qu'est le concept de biodiversité au plan scientifique.

On définira la biodiversité comme « la diversité et la variabilité totale des êtres vivants et des systèmes dont ils font partie ». Cette définition est celle que l'on trouve dans *Global Biodiversity Assessment* de Heywood & Watson (1995). Héritée de Lovejoy (1980 : « variabilité totale de la vie sur terre »), elle nuance quelque peu celle de diversité biologique telle qu'on la concevait jusqu'alors (par exemple Norse & McManus (1980) où le terme de variabilité renvoie généralement plus aux notions de diversité génétique et de diversité écologique qu'à celle de diversité des organismes. C'est qu'entre-temps, entre 1980 et la conférence de Rio de 1992, s'est imposé le constat de crise de la biodiversité, où les organismes subissent une vague d'extinctions dont le tempo est sans précédent.

Global Biodiversity Assessment est un ouvrage commandité par le Programme des Nations unies pour l'environnement qui avait initié un Biodiversity Country Studies Project en 1991. Les résultats des travaux de près de quatre cents chercheurs et trente directeurs de thèmes sont à l'origine de la Convention sur la diversité biologique. Deux ans après Rio, ils furent présentés lors d'une réunion des experts de la Convention à Mexico en avril 1994. Il en fut tiré *Global Biodiversity Assessment* (Étude mondiale de la biodiversité), un livre de 1 140 pages, véritable *opus magnum* de la biodiversité.

De façon plus technique, la Convention sur la diversité biologique définit la biodiversité comme la « variabilité des organismes vivants de tout niveau, y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes ». Ce que nous appelons biodiversité est donc l'ensemble formé par les organismes vivants, incluant leur patrimoine génétique et les communautés qu'ils forment. La biodiversité synthétise le vivant en respectant trois niveaux naturellement connectés : celui des gènes, celui des organismes et celui des écosystèmes.

Après la diffusion de la Théorie synthétique de l'évolution formalisée dans les années 1930-1940 (Huxley, 1940), la biologie de l'après-guerre se focalisa sur les niveaux génétique et écologique. La base de la diversité entre espèces est constituée par les différences génétiques entre les individus appartenant à une même espèce. La richesse de cette diversité génétique est très variable selon les espèces. L'étude de la variabilité au sein des populations et entre elles a été au

XX^e s. l'un des canons de la recherche en biologie évolutive. Les processus responsables des variations de la richesse de la diversité génétique selon les espèces ne sont toujours pas complètement connus et les études sur la diversité moléculaire et la vitesse d'évolution des protéines, de l'ADN et de l'ARN appartiennent à ce niveau d'investigation.

La diversité écologique, quoique plus immédiate, est plus difficile à cerner puisqu'elle ne se résout pas en unités distinctes. Les systèmes écologiques dépendent du point de vue de l'observateur. Ainsi le biome est une vaste région à l'échelle des continents fondamentalement caractérisé par une végétation et un climat distincts : la toundra arctique, la forêt tropicale humide, les prairies tempérées, le désert, sont des biomes terrestres. L'« écosystème » est l'ensemble des individus, des populations et des espèces présentes dans une région donnée, y compris les interactions mutuelles et avec leur milieu. L'habitat est l'environnement biologique et physique d'une espèce particulière. Les travaux sur ces différents niveaux écologiques ont permis la cartographie des régions biogéographiques du monde (Udvardy, 1975).

Le troisième niveau est celui des organismes. Jusqu'au seuil des années 1980 il était admis que la connaissance de la diversité des organismes, formalisée depuis des siècles en termes de classifications et depuis le XIX^e s. en termes de phylogénies (arbres évolutifs), était arrivée à une sorte d'optimum. De fait, les principes de la nomenclature zoologique moderne (les noms des animaux) remontent à l'édition de 1758 (la 10^e) du *Systema Naturae* de Linné et le terme de « taxinomie » (la théorie des classifications) fut conçu par le botaniste et biogéographe Candolle dès 1813. Si tout était dit en la matière, ce qu'il convenait d'explorer était d'une part la source de la diversité génétique et, d'une part, les relations infiniment complexes entre les organismes et leur milieu. On comprend donc l'essor dans la deuxième moitié du XX^e s. des recherches sur les niveaux génétique et écologique de la biodiversité. Dans ce contexte il était entendu que l'espèce était l'unité sur laquelle s'appuyait aussi bien la génétique des populations (variabilité intraspécifique) que l'écologie (interactions entre espèces). Quoique dans les hiérarchies écologique et taxinomique les unités clés sont les populations, les espèces demeurent le point de référence pour comprendre l'ampleur des systèmes écologiques. Les espèces, comme les gènes, sont vues comme des unités identifiables qui se définissent elles-mêmes par la reproduction et la réplication. Même s'il y a quelque optimisme dans cette affirmation de l'évidence des notions d'espèce et de gène, il est manifeste que les systèmes écologiques sont des entités conceptuelles, représentant des parties d'un continuum variable, reposant elles-mêmes sur les notions de base que sont les espèces et les gènes.

C'est dans ce contexte que l'on s'est aperçu dans les années 1980 de la mauvaise connaissance de la diversité des espèces à la surface de la planète. Mauvaise connaissance sous deux aspects majeurs : la connaissance brute

des espèces (la question de la magnitude et de la distribution de la biodiversité au niveau des organismes) et l'accès à la connaissance des espèces déjà décrites. En simplifiant un peu, on pourrait dire qu'en matière d'espèces, au cours des années 1980, le paradigme de la biologie est passé du « tout est connu » à « rien n'est connu ». Aujourd'hui on estime que le nombre total d'espèces décrites est d'environ 1,75 million, alors que le nombre total d'espèces peuplant la Terre devrait se situer entre 13 et 14 millions. Un tel écart est impressionnant. D'une certaine manière l'entomologiste américain Terry L. Erwin (1982, 1991) fut à l'origine de cette remise en cause spectaculaire. Utilisant un nouveau protocole d'étude de la couronne des arbres de la forêt tropicale humide (la canopée), fondé sur l'utilisation de « bombe insecticide » tirée depuis le sol jusqu'à la cime des arbres, il récolta un nombre d'arthropodes nouveaux extrêmement élevé dans ses recherches en Amérique centrale. Il dénombra par exemple jusqu'à 163 espèces de coléoptères vivant sur la seule canopée d'un même arbre, une légumineuse (*Lutea seemanii*). Si ce cas est exemplaire, étant donné qu'il existe 150 000 espèces d'arbres tropicaux, le nombre de coléoptères tropicaux de la cime des arbres dépasserait les 8 millions. Comme les coléoptères représentent 40 % des arthropodes, ces derniers devraient atteindre le chiffre de 30 millions. Même si certains ont revu cette estimation à la baisse (entre 5 et 10 millions), le chiffre reste sûrement élevé, largement supérieur au nombre total d'espèces vivantes (et pas seulement des arthropodes) actuellement recensées. S'ajoute à ce constat la méconnaissance profonde de la composition exacte des écosystèmes. Par exemple, une récente analyse de la totalité de la faune vivant dans la canopée dans l'île de Bornéo (Eliwood & Foster, 2004) fait pour la première fois la part de la vie sur les arbres et sur les épiphytes qui prospèrent sur les arbres eux-mêmes. Or les épiphytes, en l'occurrence une fougère arborescente (*Asplenium nidus*), possèdent une biomasse animale (arthropodes, gastéropodes, annélides, amphibiens, reptiles et mammifères) considérable, plus riche que celle de la canopée proprement dite. Ainsi, cette seule espèce d'épiphyte abrite la moitié de la biomasse d'invertébrés s'étendant sur un hectare de canopée de forêt humide. La conclusion actuelle est que, dans ces écosystèmes, faute de connaître leur composition, nous ne savons pas estimer convenablement les flux d'énergie, le cycle du carbone, les cycles de nutrition en général.

On pourrait penser que la connaissance de la diversité des arthropodes, notamment des insectes, est mauvaise mais qu'il s'agit là d'un cas particulier. Il n'en est rien. Au contraire, au seuil du XXI^e s., force est de constater, que celui des trois niveaux formant la trame de la biodiversité réputé le mieux maîtrisé, la diversité des organismes, est extraordinairement mal connu (May, 1998).

Quelques exemples permettront de fixer les idées.

On admet volontiers que les groupes charismatiques, vertébrés et angiospermes (plantes à fleurs) sont les mieux connus. Cela ne signifie pas qu'ils sont

parfaitement connus. Les plantes à fleurs forment 85 % des plantes terrestres connues, soit environ 250 000 espèces, et plus de deux tiers appartiennent aux flores tropicales. Or l'inventaire des espèces végétales des forêts denses humides est à ce point incomplet (Campbell & Hammon, 1989) que Poncey & Labat (1995) résumait la question en ces termes : « La mauvaise connaissance des flores des forêts tropicales est difficile à imaginer pour quiconque est habitué à la flore tempérée, surtout celle d'Europe du Nord. »

Les champignons sont des organismes qui assurent la décomposition des matériaux d'origine organique et contribuent de ce fait à la formation des sols. Les relations symbiotiques qu'ils entretiennent avec les plantes vasculaires et les insectes ont joué, et jouent toujours, un rôle considérable dans leurs diversifications. Or le nombre total estimé d'espèces de champignons est de l'ordre du million, soit quinze fois plus que le nombre d'espèces décrites, d'où le sobre commentaire de May (1998) que l'on pourrait tirer à propos de beaucoup de grands groupes d'êtres vivants : « ces organismes essentiels à la vie méritent davantage d'attention ». Restons-en aux petits organismes, unicellulaires et bactéries. La structure de la biodiversité marine reste, pour une part non négligeable, à explorer. Par exemple, en matière de phytoplancton et de zooplancton quelques surprises récentes sont à noter : à l'inverse des forêts tropicales humides où les pics de biodiversité végétale et animale coïncident, ce n'est pas le cas du plancton où une forte diversité du phytoplancton n'implique pas une diversité comparable de zooplancton herbivore (Frigoien *et al.*, 2004). Dans une tribune véhémente, Nee (2004) fait remarquer que les discours sur la biodiversité font la part trop belle à nos émotions vis-à-vis du visible. Mais, affirme-t-il, nous entrons dans l'âge d'or de l'étude de la biodiversité de l'invisible, celles des êtres microscopiques, notamment des bactéries. Pensons qu'en termes de biomasse, la forme de vie la plus abondante sur Terre est constituée par les bactéries habitant les sédiments océaniques et que le contenu de l'oxygène de l'atmosphère dépend du phytoplancton. Quant aux milieux extrêmes, ils ne sont pas extrêmes au point d'empêcher la vie des archées et des bactéries, sachant que les archées (ou archéobactéries) n'ont été reconnues comme groupe majeur qu'en 1977. Du visible à l'invisible, tout est à apprendre de la diversité des organismes peuplant notre planète.

Bref, l'état des connaissances sur la diversité des organismes de notre planète n'est pas satisfaisant : alors que la notion d'inventaire taxinomique était quasi obsolète dans les années 1970, on constate aujourd'hui qu'elle est primordiale (Hammond, 1992, 1995). Peu de biologistes auraient imaginé à l'époque du prix Nobel de L.woff, Monod et Jacob qu'au début du XXI^e s. allait se poser de façon cruciale la question de l'inventaire de la biodiversité.

Pourtant, en 1994, fut lancée une initiative internationale pour découvrir, décrire et classer les espèces de la planète : *Charting the Biosphere* (Le relevé de la

biosphère), proposé par Systematics Agenda 2000, un consortium international né des efforts conjoints de plusieurs associations et sociétés savantes (27 comités permanents et 300 scientifiques). Ce programme a pour but de relever les enjeux majeurs de la recherche en systématique : découvrir et comprendre la diversité biologique, gérer les connaissances en systématique. Au XVIII^e s. Linné n'avait pas d'autre ambition ! Le projet de Systematics Agenda 2000 fut présenté aux États-Unis et en Europe (en France notamment, à l'Académie des Sciences). Le programme prévoit au niveau planétaire une recherche en systématique d'inventaire et de classification phylogénétique sur vingt-cinq ans nécessitant un investissement annuel équivalent à 3 milliards de dollars. Une telle somme n'est toujours pas mise à disposition des systématistes mais, à petite vitesse, les recherches sont menées, surtout aux États-Unis. On est donc loin d'avoir une vue satisfaisante (et *a fortiori* exhaustive) de la diversité biologique en termes de connaissance des organismes.

Il est un autre point important qu'il convient d'aborder. L'accès à ce qui est connu, à ce qui a été déjà décrit, est souvent extrêmement difficile. Selon Hammond (1995) en dehors des groupes bien connus comme les vertébrés et les plantes, il est raisonnable d'estimer que peut-être 90 % des espèces décrites n'ont jamais été incluses dans les faunes régionales, dans les floristiques, ni dans des manuels d'identification, ou bien encore dans des monographies modernes. Sur le constat de l'imperfection de la connaissance des espèces vivant sur notre planète se greffe le problème du contrôle des données : comment juger de la qualité de l'organisation des connaissances tirées des catalogues et monographies secondaires ? Quelle valeur accorder aux hypothèses taxinomiques (définition des espèces) qui sont à la base des inventaires partiels existants ? C'est là un travail de recherche de systématique pure réservé aux systématistes. Or ces derniers sont en nombre notablement insuffisant. Quand bien même les espèces décrites dans les inventaires partiels seraient toutes adéquates, se poserait la question de ce qu'on appelle généralement dans les cercles spécialisés la « dissémination de l'information taxinomique ». Archiver ce qui est connu a longtemps été l'apanage des monographies. Comment se frayer un chemin dans les milliers de monographies qui ont été publiées sur tels et tels groupes dans telles et telles régions du globe ? La réponse est désormais d'ordre informatique. Cependant l'informatisation de connaissance en matière de biodiversité est en soi un enjeu. C'est pourquoi la plupart des programmes internationaux qui sont nés au lendemain de la Conférence de Rio et de sa Convention sur la diversité biologique ont impliqué la réalisation de ce que l'on appelle d'une part les bases de données en systématique, en biogéographie et en écologie (on peut consulter en ligne un bel exemple sur les espèces de poissons, Fishbase, à l'adresse www.fishbase.net) et, d'autre part, les systèmes de gestion de bases de données. C'est un enjeu

de recherche si l'on pense que les utilisateurs des connaissances en matière de biodiversité ne sont la plupart du temps pas les systématistes eux-mêmes. Ces derniers sont les seuls, en tant qu'experts, à se promener sans risque dans l'entrelacs des monographies mais chacun ne connaissant que le groupe dont il est le spécialiste, il est facile de comprendre que l'accès à l'information pose quasiment le même problème que l'on soit taxinomiste ou non. Si l'on veut restituer à la société en général les résultats des recherches en biodiversité, il convient de rendre efficaces les moyens d'accès au niveau international, développer les connexions entre banques de données et bases de connaissance et, bien entendu, assurer la maintenance. Ce n'est pas si simple et cela implique une recherche propre en informatique qui n'implique nullement les seuls biologistes (Lebbe, 1995).

Enfin, il est sans doute opportun ici de rappeler que la structure de la biodiversité est le produit de la diversification évolutive qui interagit avec des processus écologiques locaux, eux-mêmes influencés par les traits intrinsèques des organismes et la façon dont le paysage est composé et change au cours du temps. Autrement dit, la diversité biologique et sa distribution sont le produit d'une longue histoire, celle de l'évolution - la phylogénie, associant diversification et extinctions - dans la double dimension chronologique et géographico-écologique, cette dernière en perpétuels changements. On comprend alors que le concept de paléobiodiversité a surgi dans les cercles paléontologiques. La structure de parenté des organismes actuels est indissolublement liée à celle des espèces éteintes. Ici le champ des découvertes paléontologiques est infini. Même si les archives paléontologiques se sont sérieusement densifiées depuis que Darwin déplorait que les fossiles ne lui permettaient pas d'illustrer autant qu'il l'aurait souhaité ses théories sur l'origine des espèces, il reste toujours largement plus d'espèces à découvrir que d'espèces décrites. La succession des compositions des paléofaunes et des paléoenvironnements est un sujet de recherche récemment dynamisé, notamment par la reconnaissance de ses liens avec la connaissance des fluctuations climatiques tout au long de l'histoire de la planète.

À côté des niveaux d'organisation biorégional (paysages, écosystèmes, habitat) et génétique, celui des organismes n'est donc pas aussi maîtrisé qu'on aurait pu l'imaginer. La recherche sur les relations structurales et fonctionnelles à l'intérieur de ces niveaux et entre ces niveaux, incluant l'activité humaine, apparaît donc comme un immense défi. Par voie de conséquence, si maintenir la diversité dans des écosystèmes naturels ou domestiqués dépend de notre compréhension des processus écologiques locaux, développer des mesures de priorités dans la biologie de la conservation dépend de la compréhension des mécanismes évolutifs qui produisent la diversité au cours du temps.

Il convient de ne pas oublier que le concept de biodiversité issu de la Conférence de Rio est orienté vers l'homme, vers la société humaine. La Convention sur

la diversité biologique dont l'esprit anime les recherches en biodiversité n'est pas une déclaration relevant d'une écologie angélique où serait prôné un retour à une nature pré-industrielle. Cependant, aujourd'hui, un développement économique et social durable n'est concevable qu'au travers d'une utilisation rationnelle de la biodiversité. Si l'on souhaite continuer à s'approvisionner à partir des écosystèmes de la planète il convient d'acquérir une connaissance fondamentale de ces écosystèmes, de leurs constituants et des pressions sociales et économiques qui pèsent sur eux. Aussi la biodiversité est-elle vue comme un capital biologique naturel qui éventuellement fournit des biens et des services essentiels au bien-être et aux aspirations de l'humanité. Tout ce qui précède a pour but d'assurer un mieux vivre à l'espèce humaine sachant dans quels contextes précis elle étend son activité.

Une meilleure connaissance de la biodiversité devrait permettre à l'humanité d'en faire un meilleur usage. Par exemple, si les écosystèmes forestiers fournissent des combustibles, des médicaments, des matériaux de construction, ils constituent aussi des habitats pour les animaux et les végétaux qui n'apparaissent pas à première vue utiles à l'activité humaine. Mais de tels écosystèmes ont aussi une action déterminante sur la production, le stockage et le cycle du carbone et des nutriments ; en cela ils agissent sur le climat de la Terre et la composition atmosphérique. Or l'impact de l'homme sur la biosphère a pris des proportions inquiétantes. La perte de biodiversité n'est plus niée. Certains changements sont irréversibles comme la perte des espèces dont le rythme s'accélère pour diverses raisons dont le changement climatique d'origine anthropique. D'autres ne le sont pas, comme la transformation et la dégradation des communautés écologiques, mais sont particulièrement préoccupants. Si la crise de la biodiversité est le plus souvent assimilée à la perte des espèces sauvages, l'appauvrissement de la variabilité des espèces domestiquées - variétés de plantes cultivées et races de bétail - est également inquiétant. Après que l'homme ait multiplié les variétés, l'industrialisation les a raréfiées, ce qui a pour conséquence leur fragilisation face aux agents pathogènes et aux risques d'épidémie. Les écosystèmes, notamment ceux impliquant des plantes cultivées, sont perturbés par les invasions et introductions anthropiques d'espèces exogènes. Deux exemples ayant une valeur universelle. Depuis des années les agents de l'Office national des forêts luttent sans succès contre l'invasion des forêts primaires de l'île de la Réunion par la vigne marronne venue de Sumatra. Une expérience de lutte biologique (l'introduction d'un insecte ravageur de la vigne marronne) est en cours ; une opération délicate comme en témoigne l'exemple suivant. L'introduction de la crevette dans le lac Flathead (Montana) afin d'accroître, pour la pêche, les ressources alimentaires du saumon, a abouti à l'inverse du résultat espéré. Le saumon se nourrit de zooplancton qui lui-même se nourrit de phytoplancton (« algues »).

La crevette introduite a dévoré le zooplancton, de telle sorte que la population de saumon a baissé de même que ses prédateurs, grizzly et aigle à tête blanche.

La recherche sur la biodiversité engendre donc une dimension sociologique puisque le but poursuivi est de réussir à maintenir le développement des sociétés humaines dans un environnement protégé. Les causes de la dégradation de la biodiversité, alors même qu'elle est si mal connue, sont toutes liées à des agissements sociopolitiques assez élémentaires (Watson *et al.*, 1995) :

- demandes accrues de ressources biologiques, stimulées par l'accroissement de la population et le développement de l'économie ;
- l'incapacité de la population à considérer les conséquences à long terme de ses actions ;
- l'incapacité de la population à apprécier les conséquences de l'utilisation d'une technologie inadaptée ;
- l'incapacité des marchés économiques à reconnaître la véritable valeur de la biodiversité ;
- l'incapacité des marchés économiques à appliquer les valeurs de la biodiversité au niveau local (aussi bien du point de vue de l'agriculture, de l'exploitation des forêts, la pêche, l'utilisation de l'énergie et les transports) ;
- l'incapacité des responsables institutionnels à régler l'utilisation des ressources biologiques en fonction des changements des valeurs humaines liées à l'urbanisation des sociétés, des institutions, des droits fonciers et des attitudes culturelles ;
- l'incapacité des politiques gouvernementales à freiner la surexploitation des ressources biologiques ;
- le développement des migrations humaines, des voyages et du commerce international.

On comprend dès lors pourquoi les recherches fondées sur la science – très complexe – des interactions à l'intérieur des grands niveaux de biodiversité et entre eux, soient d'une certaine manière parasitées par la dimension extrascientifique que revêtent ses applications.

Il est tellement difficile de connaître et gérer les différentes composantes structurales de la diversité biologique que les meilleures intentions peuvent engendrer des effets pervers. Prenons à ce titre deux exemples fort distincts. Les coraux « froids » des eaux profondes de l'Atlantique Nord sont étudiés intensément depuis une dizaine d'années seulement, afin de mieux comprendre leur structuration, leur extension et saisir la place qu'ils tiennent dans les écosystèmes. Ces coraux sont organisés en formations récifales (gorgones et des scléractiniaires) qui permettent à quantités d'animaux de se développer. Or ils sont extrêmement fragiles ; à peine découverts, ces écosystèmes sont victimes des recherches pétrolières et de la pêche. L'amplitude des dommages causés par les bateaux de pêche en eau profonde est mal estimée. Le contrôle des bateaux se fait grâce à leur localisation par GPS. Les comportements des bateaux de pêche ont donné lieu à des analyses

statistiques controversées. Une première étude a mis en cause les pratiques globales de pêche, ce qui n'est pas sans impact économique. Ultérieurement il est apparu que quelques comportements atypiques de bateaux étaient à l'origine des dépradations les plus marquées (Meinard, 2004). La nécessité d'inventaires de biodiversité se fait de plus en plus ressentir dans les pays en voie de développement et dans les pays qui connaissent les mutations les plus rapides, comme l'Inde. Dans ce pays la biodiversité est effectivement considérée comme un patrimoine à protéger y compris comme réservoir de ressources industrielles futures, notamment pharmaceutiques. L'accès à l'information taxinomique est lui-même protégé par un « Biological Diversity Act » de 2002. Celui-ci aboutit indirectement à « criminaliser les taxinomistes » (Pethiyagoda, 2004) en imposant des taxes élevées pour toute demande d'accès aux ressources biologiques (c'est-à-dire aux organismes) et aux connaissances associées !

Au-delà de ces anecdotes, les choix scientifiques en matière de biologie sont particulièrement révélateurs. Au moment où l'on mesure le besoin d'experts en systématique on découvre qu'ils ont eux-mêmes presque disparu (Schram & Los, 1996 ; Deleporte, 1998 ; Dubois, 2003). Les pays réagissent différemment. Aux États-Unis, par exemple, la « National Science Foundation » dresse un bilan positif des recherches en systématique qui ont suivi la reconnaissance de la crise de la biodiversité (Rodman & Cody, 2003). La France s'est dotée d'un Institut de la Biodiversité dont l'appel d'offre sur « biodiversité et changement global », en 2003, est plutôt orienté vers les interactions entre changement global et biodiversité avec un poids fort donné aux systèmes modèles. À l'inverse, une institution comme le Muséum national d'histoire naturelle a les plus grandes difficultés à mener le travail de « relevé de la biosphère », pour reprendre les termes de Systematics Agenda 2000, alors qu'il est conçu pour cela ; et en même temps l'Académie des Sciences souhaite un renouveau de la systématique (Gros & Dercourt, coords. 2000). Ces contradictions reflètent les difficultés rencontrées lorsqu'il s'agit d'harmoniser les programmes internationaux et la politique nationale de recherche scientifique au centralisme bien connu.

Globalement, douze ans après, les espoirs nés de la Conférence de Rio ont été fortement tempérés. La crise décelée dans les années 1980 s'accroît. Le concept de biodiversité pose un gigantesque problème de société. Il est difficile à l'homme d'admettre qu'il n'est qu'un élément d'un immense écosystème planétaire que, dans une large mesure, il ne comprend pas encore. Les pays en développement revendiquent le droit de commettre les mêmes erreurs que les pays occidentaux depuis un siècle, car ces erreurs sont facteurs de progrès économique et d'enrichissement à court terme : le long terme est renvoyé à plus tard. Quant à l'Occident, il joue ce jeu double : il a sa large part dans cette crise mais s'attache à connaître les moyens d'y faire face en prenant conscience du long terme. Le dilemme est difficile à résoudre. Il plonge ses racines dans l'émergence

même d'une civilisation fortement influencée par le judéo-christianisme qui a toujours considéré que la planète était au service de l'homme : « Il créa un homme et une femme. Dieu les bénit, et leur dit : croissez et multipliez, et remplissez la terre, soumettez-la. Règnez sur les poissons de la mer et sur les oiseaux des cieux, et sur tout animal qui se meut sur la Terre » (Genèse, 1). Osons un contraste brutal : à l'inverse, l'une des plus célèbres affiches de l'Association Greenpeace proclame « La Terre n'appartient pas à l'Homme ».

► BARBAULT R., *Des baleines, des bactéries et des hommes*. Paris, Odile Jacob, 1994. – BESSET J.-P., « L'état de la planète cinq ans après Rio ». in *Le Monde*, 24 juin 1997. – CAMPBELL D. G. & HAMMOND H. D. (éd.), *Floristic Inventory of Tropical Countries*, New York, New York Botanical Garden, 1989. – CHAUVET M. & OLIVIER L., *La biodiversité, enjeu planétaire – Préserver notre patrimoine génétique*, Paris, Éditions Sang de la Terre, 1993. – DELEPORTE P. (coord.), *Profession : systématique*, Biosystema 16, Publication de la Société française de systématique, Paris, 1998. – DORST J., *Avant que nature meure*, Neuchâtel, Paris, Delachaux & Niestlé, 1965. – DUBOIS A., « The relationships between taxonomy and conservation biology in the century of extinctions », *Comptes Rendus Biologies*, 326 : S9-S21, 2003. – ELIWOOD M. D. F. & FOSTER W. A., « Doubling the estimate of invertebrate biomass in a rainforest canopy », *Nature*, 429 : 549-551, 2004. – ERWIN T. L., « Tropical forest : their richness in Coleoptera and other arthropods species », *Coleopterists Bulletin*, 36 : 74-75, 1982 ; « How many are there ? Revisited », *Conservation Biology*, 5 : 330-333, 1991. – GROS F. & DERCOURT J. (coords.), *Systématique. Ordonner la diversité du Vivant*, Rapport sur la science et la technologie n° 11, Académie des Sciences, Paris, Londres, New York, Éditions Tec & Doc, 2000. – HAMMOND P. M., « Species Inventory », in B. Groombridge (éd.), *Global Biodiversity, status of the Earth's resources*, 17-39. Londres, Chapman and Hall, 1992 ; « Described and estimated species numbers : an objective assessment of current knowledge », in D. Allsopp, R. R. Colwell & D. L. Hawksworth (éd.), *Microbial Diversity and Ecosystem Function*, 29-71. CAB International, Wellingford, 1995. – HEYWOOD V. H. & WATSON R. T. (éd.), *Global Biodiversity Assessment*, United Nations Environment Programme, Cambridge, New York, Melbourne, Cambridge Univ. Press, 1995. – HUXLEY J., *Evolution. The Modern Synthesis*, Londres, George Allen & Unwin, 1940. – IRIGOIEN X., HUISMAN J. & HARRIS R. P., « Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton », *Nature*, 429 : 863-867, 2004. – LEBBE J., « Systématique et informatique », in T. Bourgoïn (coord.), *Systématique et Biodiversité*, Biosystema 13, Publication de la Société française de systématique, 71-79, Paris, 1995. – LOVEJOY T. E., « Foreword », in M. E. SOULÉ & A. WILCOX (éd.), *Conservation Biology : an evolutionary ecological perspective*, vix, Sinauer Associates, Sunderland, Mass., 1980. – MAY R., « L'inventaire des espèces vivantes », in H. Le Guyader (dir.), *L'évolution*, 60-69, Paris, Bibliothèque pour la Science, 1998. – MEINARD Y., *La localisation par GPS des bateaux de pêche : un outil pour la biologie de la conservation des coraux d'eaux profondes de l'Atlantique Nord ?*, mémoire de maîtrise de Biologie des populations et des écosystèmes, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris, 2004. – NEE S., More than meets the eye, *Nature*, 429 : 804-805, 2004. – NORSE E. A. & MCMANUS R. E., « Ecology and living resources », in *Environmental quality 1980 : the 11th annual report of the Council on Environment Quality*, 31-80, Council on Environmental Quality, Washington DC, 1980. – PETHIYAGODA R., « Biodiversity law has had some unintended effects », *Nature*, 429 : 129, 2004. – PONCY O. & LABAT J.-N.,

« État actuel de l'inventaire des flores tropicales », in T. Bourgoïn (coord.), *Systématique et Biodiversité*, Biosystema 13, Publication de la Société française de systématique, 23-49, Paris, 1995. – RODMAN J. E. & CODY J. H., « The taxonomic impediment overcome : NSF's partnerships for Enhancing Expertise in Taxonomy (PEET) as a model », *Systematic Biology* 52 : 428-435, 2003. – SCHRAM F. R. & LOS W., « Training systematists for the 21st century », in S. Blackmore & D. Cutler (éd.), *Systematics Agenda 2000 : a Challenge for Europe*, Linnean Society Occasional Publications n° 1, Linnean Society of London, Samaras Publishing Ltd : 89-105, 1996. – Systematics Agenda 2000 *Charting the Biosphere*, Technical Report, SA 2000, New York, 1994. (Trad. fr. : *Systématique Agenda 2000 Relevé de la Biosphère*, Société française de systématique, Paris, 1994.) – UDVARDY M. D. F., *A Classification of the biogeographical provinces of the world*, IUCN, Morges, 1975. – WATSON R. T., HEYWOOD V. H., BASTE I., DIAS B. *et al.*, *Étude mondiale de la biodiversité. Résumé à l'intention des décideurs*, Publié par le Programme des Nations Unies pour l'environnement, Cambridge Univ. Press, 1995. – WILSON E. O., « The biological diversity crisis », *BioSciences*, 35 : 700-706, 1985 ; WILSON E. O., *La diversité de la vie*, Paris, Odile Jacob, 1993. – WILSON E. O. & PETERS F. M. (éd.), *Biodiversity*, National Academy Press, Washington DC, 1986.

Pascal TASSY

→ Écologie ; Environnement.

BIOÉTHIQUE

Ce vocable est un néologisme apparu aux États-Unis en 1971 sous la plume du cancérologue Van Rensselaer Potter dans son ouvrage *Bioethics : bridge to the future*. À première vue, on serait tenté d'évoquer la parole de l'Écclésiaste : « Il n'y a rien de nouveau sous le soleil. » Si les problèmes d'ordre multiple que pose le développement des technologies biomédicales sont d'une brûlante actualité dans leurs aspects pratiques, il n'en demeure pas moins que les questions théoriques soulevées sont parmi les plus anciennes interrogations de l'esprit humain. Débordant largement le cadre de la traditionnelle éthique médicale, qui n'est plus prise comme cadre explicite de référence, ce nouveau terme se propose de rendre compte de l'interaction de tous les secteurs d'activité technoscientifiques qui ont pour objet l'être humain en tant que tel.

Les champs d'investigation recouverts par la bioéthique dépassent le cadre strict de la médecine pour englober un ensemble plus vaste appelé « sciences de la vie ». Cependant, c'est à partir de la médecine que la bioéthique a émergé ; c'est pourquoi il paraît opportun d'accorder une attention particulière aux rapports historiques qu'entretient la médecine et, dans son sillage, la biologie, avec l'éthique. Néanmoins, comme le souligne Dominique Lecourt, la conjonction au sein du même terme, du préfixe « bio » avec le terme « éthique » n'est pas sans ambiguïtés et pourrait être la source de malentendus lourds de conséquences en médecine, laquelle exerce un monopole incontesté sur cet objet particulier qu'est l'homme dans son existence

biologique. La fortune exceptionnelle de cette nouvelle expression, à peine née, est un indicateur de cette même équivoque.

Contexte d'apparition

Ce nouveau champ d'interrogation a bénéficié dans sa genèse de développements historiques spécifiques ainsi que d'une évolution culturelle qui ont marqué l'humanité depuis le milieu du ^{xx}e s. Les horreurs commises durant la Seconde Guerre mondiale au nom d'une science, dénaturée par des hommes au service d'une idéologie politique, ont constitué un sursaut et sont à l'origine de la nouvelle réflexion sur l'éthique scientifique en général mais, plus particulièrement, en matière des sciences de la vie. C'est même cela qui a amené l'ex-République fédérale d'Allemagne, au sortir de la guerre, à proclamer à l'article premier de sa loi fondamentale l'inviolabilité de la dignité humaine. Le respect et la protection de la vie, même si le document estime devoir garantir au chercheur sa liberté d'action. La bioéthique, en cette deuxième moitié du ^{xx}e s., se développe sur fond d'inquiétude, largement fondée et justifiée car les atteintes, ou les possibilités d'atteinte, à la personne humaine ne furent pas une des manifestations du nazisme historique mais sont inscrites au cœur même de la pratique scientifique et de l'exercice de la médecine car, après tout, ces secteurs d'activité sont le fait des hommes. La nouveauté, voire l'originalité, de notre époque c'est qu'aujourd'hui nous sommes en mesure d'agir et de changer les règles du jeu, soit en altérant le programme génétique soit en modifiant les conditions de son exécution.

Dans les années 1960, plusieurs affaires retentissantes sont venues rappeler, à l'opinion publique et à la communauté scientifique, le danger d'un certain pouvoir des hommes de science, de ce « biopouvoir » dont M. Foucault a analysé la montée et les caractéristiques. On se souviendra, entre autres, du scandale de la thalidomide et des milliers d'enfants phocomèles qui naquirent suite à la prescription de cette substance durant la grossesse. De même, on garde le souvenir de plusieurs affaires où des hommes de science ont fait fi de toute considération éthique : injection de cellules cancéreuses à des vieillards sans défense (affaire Brooklyn) ; inoculation du virus de l'hépatite B à des enfants retardés mentaux (affaire de Willowbrook), sans oublier l'affaire Tuskegee où des études comparatives, en double aveugle, ont été réalisées sur des populations syphilitiques, traitées ou non traitées, mais à leur insu.

À partir des années 1970, suite au développement de la génétique, de nouvelles possibilités sont apparues aux mains du « biopouvoir ». Si elles ne portent pas atteinte, de manière explicite, à l'intégrité physique de la personne humaine, elles n'en soulèvent pas moins des problèmes d'ordre éthique et juridique tout à la fois puisqu'elles autorisent, pour la première fois dans l'histoire, la dissociation de la filiation de son déterminant biologique ainsi que de son contexte familial classique. Grâce à cela, de nouvelles figures de définition

même de la famille, voire de la personne, apparaissent. Cette remise en question n'est pas seulement d'ordre conceptuel et philosophique quand on pense que beaucoup d'outils juridiques ont, comme prédicat, la figure classique de la famille ; c'est le cas notamment de la Déclaration universelle des droits de l'homme de 1948. À la lumière des nouvelles prouesses technologiques, ces textes fondamentaux du droit international apparaissent, dans la meilleure des hypothèses, neutres ou ambigus et, dans la pire, semblent être quotidiennement violés et bafoués.

Parallèlement, suite aux bouleversements sociaux des années 1960 marquées par les revendications sociales, l'affirmation de droits individuels et la contestation des sources de l'autorité, on a assisté à l'explosion de nouveaux champs d'interrogation éthique. La crise de l'autorité médicale est un corollaire de cette évolution des mentalités. Aux États-Unis, l'expression « éthique appliquée » sera progressivement consacrée, rendant ainsi compte du dynamisme de la réflexion en philosophie morale, dans le monde anglo-américain du moins. Dans les années 1970, de véritables secteurs se sont individualisés au sein de cette mouvance et se sont polarisés en « bioéthique », « éthique des affaires », « éthique environnementale » et « éthique professionnelle », qui ont pénétré progressivement tant les entreprises que les institutions éducatives, hospitalières, ou les instances politiques nationales et internationales. Ce mouvement marque l'intérêt croissant porté à l'éthique substantielle, c'est-à-dire aux théories morales qui définissent, à la fois, le système éthique et la procédure de décision rationnelle. Les débats en philosophie morale se sont, de plus en plus, portés sur des situations précises, souvent conflictuelles, dans une société où les repères éthiques ne sont plus nécessairement partagés mais, de plus, peuvent se trouver subjectivement irréductibles. L'expression « éthique appliquée », englobant la bioéthique, fait donc référence à l'analyse de situations particulières en mettant l'accent sur l'issue pratique. Pour cela, on fera progressivement appel à des philosophes en vue d'aider à la réflexion, de clarifier certains enjeux ou de participer à des enseignements.

C'est dans ce climat qu'il y a lieu de situer, en 1969, l'initiative du psychiatre Willard Gayling et du philosophe Daniel Callaghan qui réunirent, autour d'eux, un groupe pluridisciplinaire, formé de chercheurs et de philosophes préoccupés de nouer, entre spécialistes de disciplines diverses, une réflexion dans le domaine biomédical. Ce noyau sera à l'origine de la création du célèbre Hastings Center. En 1972, André Hellegers fondera, à Washington, le Kennedy Institute of Ethics rattaché à l'université de Georgetown et relayé, de nos jours, par plus de 130 institutions analogues de par le monde. Par ailleurs, dans ce même contexte, on assiste, à partir du milieu des années 1960, à la mise en place de « comités d'éthique » à l'image de la formule officiellement lancée en 1966 par les National Institutes of Health. La création de comités du même type dans les hôpitaux est plus récente puisqu'elle remonte à 1976,

suite à une décision de la cour suprême du New Jersey à propos de l'arrêt des mesures de réanimation chronique d'une malade en état de coma profond.

Ainsi, la structuration de l'approche bioéthique vient de la rencontre, ou plutôt des retrouvailles de la médecine et de la philosophie rendues possibles par la pression des événements et des développements techniques qui se sont succédé à grande vitesse depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. Déjà, le tribunal de Nuremberg, qui avait jugé les criminels nazis, avait rédigé un ensemble de dix prescriptions réglementant l'expérimentation sur l'homme, inaugurant ainsi une série impressionnante de mesures protectrices à l'égard du « biopouvoir ». À cette déclaration firent suite plusieurs autres : Helsinki, Helsinki-Tokyo, Madrid, Paris, etc., qui, aujourd'hui, ont été adoptées par toutes les organisations médicales internationales et qui constituent un cadre juridique appréciable, quoiqu'insuffisant, pour traiter des relations de l'homme et des technologies biomédicales.

Médecine et Éthique

Les questions d'éthique dans la pratique médicale ne sont pas nées de la bioéthique. On serait même tenté de dire que l'Éthique précède la Médecine car on ne voit pas ce qui, *a priori*, devrait pousser l'homme à vouloir soulager son semblable. Cette situation est particulièrement illustrée par la figure d'Asclépios, dieu de la médecine. Ce dernier, quand il n'était que simple mortel, fut le premier à manier, avec une exceptionnelle maîtrise, toutes les facettes de son art. Ayant accepté de ressusciter des morts contre un salaire magnifique, Zeus le fit périr par la foudre. Il est remarquable qu'Asclépios fut puni non pour sa cupidité mais pour avoir, par avidité et orgueil, voulu dépasser sa condition au lieu de faire ce qui était humainement possible. Néanmoins, et parce qu'il avait tant aimé les hommes, les dieux de l'Olympe lui accorderont l'immortalité et le coopteront comme un des leurs. Le récit mythique situe assez clairement les préoccupations et les enjeux que la médecine entretient avec une échelle de valeurs qui appartient au dialogue de l'homme et de la nature.

Depuis la nuit des temps, divers témoignages existent montrant le souci normatif des sociétés humaines dans la réglementation de l'exercice de la médecine, bien que ce souci soit, la plupart du temps, plus motivé par la volonté de maintenir l'ordre social que par la réflexion éthique. Par ailleurs, l'éthique médicale, à de rares exceptions historiques, entretient des rapports avec l'ordre établi qui ne sont pas sans risques ; notamment celui de voir la médecine, tant dans son exercice que son apprentissage, devenir un facteur privilégié de conformisme entre les mains de l'éthos culturel dominant. C'est le cas, notamment, du serment indien que devait prêter tout apprenti médecin et que l'on trouve consigné dans un manuscrit du ¹^r s. de notre ère, le *Charaka Samhita*. Par ce serment, l'apprenti s'oblige à mener une vie ascétique et à être l'esclave virtuel de

son maître en médecine. Par ailleurs, il s'engage à mettre l'intérêt de son malade au-dessus de toute autre considération et à respecter scrupuleusement le secret professionnel. Cependant, le même serment astreint le prestataire à refuser ses services aux ennemis du pouvoir en place, aux mourants, aux criminels et, en général, à quiconque se trouve exclu du système en vigueur. Ici, les valeurs éthiques et l'ordre établi vont de pair et la médecine est un reflet de l'éthos de la pensée indienne antique qui refuse toute aide apportée aux personnes taxées d'immoralité ainsi que toute ingérence dans le phénomène de la mort.

Contrairement au serment indien, le serment d'Hippocrate implique une réserve ou, tout au moins, une distanciation vis-à-vis de l'éthos de la cité grecque de l'époque. Il est légitime de rapprocher l'image du médecin reflétée par le Serment avec la figure de l'Antigone de Sophocle. Le cadre de pensée général du Serment est celui de l'idéalisme naturaliste. Le médecin y a conscience d'être au service de l'Art perçu comme un don des dieux ainsi qu'un reflet de l'ordre surnaturel, et non de l'ordre établi, qui se manifeste par l'harmonie des phénomènes naturels. Dans cette conception, particulièrement holiste, l'acte médical est l'outil par lequel le praticien établit un dialogue privilégié avec la nature, d'une part, et impose, à cette dernière, une intervention *manu humana* afin de rétablir l'harmonie naturelle rompue par les phénomènes morbides, d'autre part. On comprend dès lors, au nom de l'unité de la nature, que, pour la médecine coaque (hippocratique), tous les hommes soient égaux sans distinction d'ethnie ou de condition sociale, ce qui est loin de refléter les conceptions en la matière de la cité grecque. Le code éthique proclamé impose des restrictions sévères à l'acte médical. Privilégiant les mesures diététiques, il dresse un véritable interdit contre certains gestes. En d'autres termes, l'acte médical, tout en constituant une intrusion violente dans l'ordre naturel, se veut d'emblée le moins agressif possible, ce qui se trouve explicité par l'adage antique : *Primum non nocere*. Cependant, la version originale du Serment contient un important présupposé, lourd de conséquences ultérieures, à savoir le paternalisme qu'implique la conception du secret professionnel. Le médecin est, implicitement il est vrai, autorisé à juger seul de l'opportunité et du contenu de l'information à divulguer, le cas échéant, même à son patient.

Durant des siècles après Hippocrate, le Serment était loin de constituer le code éthique de base de la profession. À la période hellénistique, l'exercice de la médecine était organisé au sein de véritables sectes plus préoccupées par la spéculation intellectuelle que par la réflexion éthique. Il n'était pas rare de voir les médecins faciliter le suicide ou l'infanticide. Une place à part devrait être réservée, cependant, au sein de l'hellénisme tardif, à Claude Galien (129-200/210). Se refusant à spéculer sur le concept même de santé, il en fit une catégorie métaphysique. Dès lors, la notion de santé devient un état d'équilibre particulier à tout un chacun, une qualité personnelle. Ainsi, l'éthique

hippocratique subit une mutation vers une approche plus personnaliste ou, en tout état de cause, moins naturaliste. Cependant, Galien ne fera pas école ; il faudra attendre le IV^e s. de notre ère pour voir ses idées se généraliser grâce à Oribase et aux institutions de l'Empire d'Orient. Mais ceci demeurerait inintelligible en dehors du christianisme.

À la faveur de la nouvelle religion et de son alliance organique avec l'empire, une véritable révolution s'est opérée en médecine, non sur le terrain théorique ou fondamental mais sur celui de la pratique et de l'éthique. La médecine, dans ce contexte, n'aura aucune peine à adopter les idées de Galien, dont le monothéisme sera salué, et d'Hippocrate vu par Galien. Le galénisme régnera, dès lors, sans partage jusqu'à l'aube de la médecine moderne. Le Serment subit un habillage chrétien par élimination de la référence aux dieux de l'Olympe. Cependant, le médecin n'y est plus un praticien au service d'un idéal mais à celui de la personne même du malade, conçu comme l'image vivante de Jésus-Christ. Ainsi s'opère une importante mutation paradigmatique qui exprime maintenant un nouvel idéalisme personnaliste propre à la vision chrétienne du monde. L'éthique médicale devient, dès lors, indissociable de la charité chrétienne et du sens ecclésial du christianisme. C'est à cela que nous devons, semble-t-il, les institutions sociomédicales qui nous sont familières : hôpitaux, hospices, crèches, asiles, auxiliaires paramédicaux ; ces structures et ces instances furent mises en place, à des degrés divers, entre le IV^e et le VI^e s. dans le cadre de la société byzantine. L'éthique médicale reflétera, nécessairement, les fruits de la réflexion théologique. Ce sera particulièrement le cas en Occident où la théologie, sous l'influence du dolorisme médiéval, accordera parfois une place particulière au phénomène de la douleur physique dans la conception du salut. Ceci ne sera pas sans conséquences, perceptibles encore aujourd'hui, sur l'attitude de certains praticiens ou de certains moralistes face à la gestion de la souffrance du patient.

Aujourd'hui révisé, le Serment est adopté depuis 1948 par l'Association médicale internationale dans le cadre de la déclaration de Genève. Il constitue, de nos jours, la base de la réflexion éthique en médecine ainsi que celle de la plupart des codes de déontologie. Dans notre culture, le texte qui eut le plus d'influence en la matière est un code, publié en 1803 par un médecin de Manchester, Thomas Percival, intitulé : *Medical Ethics ; Or, A Code of Institutes and Precepts Adapted to the Professional Conduct of Physicians and Surgeons*. Ce texte, rédigé à une époque où le corps médical britannique pratiquait dans la plus totale anarchie querelleuse, se veut d'abord un code de bonne conduite régissant la relation du médecin avec ses confrères. Il reprend à son compte le serment d'Hippocrate en matière de respect du malade, de la vie en général, ainsi que du secret professionnel. Cependant, il reflète, dans ses choix éthiques, la vision du monde de la société de son époque, lancée dans l'aventure industrielle et le capitalisme naissant. Un souci

scrupuleux se révèle dans la réglementation d'une véritable étiquette au sein du corps médical. Dans la plupart de ses dispositions, le code de Percival reflète une philosophie utilitaire, même remaniée, les médecins étant invités à ne rien entreprendre et à se conduire de manière à ne pas entraîner la critique et jeter l'opprobre sur la profession. Le paternalisme, déjà implicite dans le serment d'Hippocrate, se double ici d'un conformisme corporatiste. Le praticien est une figure de proue de la nouvelle société bourgeoise et son éthique professionnelle se trouve en adéquation avec l'ordre établi.

En 1847, l'American Medical Association élabore un code d'éthique largement inspiré du précédent. Vu la crise de confiance qui frappait le corps médical américain à l'époque, ce code va jusqu'à proclamer certaines dispositions réglementant les devoirs du malade et du public vis-à-vis des praticiens américains. En contrepartie, le même code impose des conditions sévères de sélection pour l'accès à la profession.

En 1949, l'Association médicale internationale a adopté un code d'éthique, connu sous le nom de Code international, résumant les grands principes d'exercice de la profession. À l'encontre de ses prédécesseurs du XIX^e s. et de la première moitié du XX^e, le Code international centre sa réflexion sur le malade lui-même et non sur l'étiquette professionnelle. Il place le bien-être du malade au-dessus de toute autre considération. Il rappelle l'obligation au respect du secret professionnel même après la mort du malade, suite à un amendement introduit en 1968. Il impose au médecin le respect absolu de la vie, et c'est par ce biais qu'il aborde les problèmes éthiques que posent l'avortement et l'euthanasie. D'autres dispositions rappellent le devoir du respect de la liberté du malade, le danger de l'acharnement thérapeutique, etc.

Bioéthique et pluridisciplinarité

Depuis son apparition, la bioéthique se présente comme un lieu de rencontre et de dialogue entre diverses disciplines telles que la médecine, la biologie, les sciences infirmières, l'éthique philosophique, l'anthropologie, le droit, voire la métaphysique et la théologie. De plus, le champ d'application et les problèmes que recouvre la bioéthique sont l'objet et l'enjeu de controverses idéologiques et philosophiques qui présentent, certes, une importante dimension spéculative, mais qui ont, surtout, des prolongements pratiques associés à des choix politiques et des choix de société qui, inéluctablement, ont une répercussion évidente sur les générations futures. Comment définir cette approche ? Qu'elle soit décrite comme « champ de questions », « discipline nouvelle » ou « science des interfaces », la bioéthique suscite encore maintes controverses sur son statut, ses méthodes et ses buts. Elle crée incontestablement un champ d'interaction et de communication dans l'espace public, où différentes communautés de pensée peuvent s'exprimer et discuter de leurs valeurs qui sont mises en question par le

développement biomédical. Il est difficile d'imaginer, dans ce contexte, l'existence d'un « bioéthicien » représentant une discipline au sens conventionnel du terme. En outre, la bioéthique se présente également sous la forme de discours et de pratiques qui ont, très souvent, une visée normative pour orienter l'action sans toutefois exclure des perspectives spéculatives et théoriques. La bioéthique se dévoile donc sous une forte interaction langagière et symbolique, ce qui fait dire à G. Hottos que la bioéthique est « pratique discursive et discours pratique ».

Cependant, une importante question se pose aujourd'hui. Quel est le fruit de cette rencontre entre les sciences biomédicales et les sciences humaines ? Quel est le statut épistémologique de cette interaction pluridisciplinaire ? Il est vrai que la question n'a pas encore été pleinement explorée. Les grands centres américains ont, tout au plus, formalisé le principe d'autonomie. Certaines voix se font même critiques, d'autres expriment leur crainte face à l'institutionnalisation de l'éthique appliquée. Il est indéniable qu'un certain malaise existe dû aux mouvances internes de cette approche, notamment en Amérique du Nord. À l'heure actuelle, c'est surtout aux États-Unis que la bioéthique est conceptualisée sous l'influence de la philosophie morale. Trois grands courants semblent se dégager.

Le *principlisme* de T. Beauchamp et J. Childress fonde la réflexion et l'action sur quatre principes fondamentaux : autonomie, bienfaisance, non-malfaisance et justice, qui s'appliquent tous aux problèmes spécifiques suscités par le développement biomédical. De ces principes dérivent des règles : règle du consentement, règle de la confidentialité, qui, appliquées à des cas précis scrupuleusement documentés, permettent de dégager des solutions. La bioéthique, se fondant ainsi sur la philosophie morale, se propose d'être une éthique appliquée pouvant donner des réponses normatives à des problèmes moraux liés au développement biomédical.

Cet ancrage au sein de la philosophie morale est encore plus marqué chez H.T. Engelhardt et son école qui voudraient apporter une réponse au nihilisme moral en tentant de trouver un fondement à la bioéthique dans le cadre d'une éthique pluraliste et séculière. Aucun critère ne fait l'unanimité : ni l'intuition, ni la raison, ni des considérations d'ordre religieux. Différentes visions du Bien sont également défendables. Les conflits éthiques trouvent leur solution dans l'accord ou le consensus, librement consentis, nécessitant seulement la bonne volonté des différents acteurs à titre individuel. Sur le plan pratique, l'action qui en découle obéit, en premier, au principe d'autonomie ainsi qu'à celui de bienfaisance. Ce dernier est défini en médecine sous forme positive : faire aux autres leur propre bien. Ainsi, le personnel soignant doit aller dans le sens du bien tel qu'il est défini par le patient. Par le principe d'autonomie, le patient peut refuser le bien qui lui est proposé même si ce refus paraît irrationnel. L'intérêt principal du patient est celui de sa liberté de décision en

tant qu'individu, indépendamment de son état actuel de personne malade.

Un troisième courant important est plus contextuaire ou casuistique. Il est représenté par A. Jonsen et S. Toulmin. Telle une jurisprudence, cette école centre le raisonnement moral sur le cas particulier. Le jugement qui en découle est une forme de prudence, au sens aristotélicien de la *phronésis*. Il s'exprime en termes de règles et de maximes qui ne sont tenues pour bonnes que dans les conditions spécifiques de l'agent moral et des circonstances de l'action. Elles peuvent être générales mais ne sont ni universelles ni invariables. Cette approche implique la construction de cas paradigmatiques, à partir desquels une comparaison analogique pourra s'établir avec un autre cas afin de pouvoir dégager un jugement qui, par essence, se doit d'être prudent. Au sein de ce même courant, d'autres tendances ont vu le jour, notamment l'approche herméneutique qui se développe dans le champ particulier de l'éthique clinique et qui privilégie l'interprétation de l'analyse des circonstances de la relation médecin-malade. À cela on pourrait ajouter l'approche féministe en bioéthique qui se présenterait plus comme une pluralité de discours critiques que comme un véritable courant théorique.

En dehors de la sphère culturelle anglo-américaine, en Europe occidentale notamment, la bioéthique reste relativement peu théorisée, certains auteurs n'hésitent pas à parler de « misère » de la bioéthique. Il est indéniable que le cadre pluridisciplinaire de la bioéthique est, en lui-même, source de conflits et de tensions entre domaines de compétences divers. Sur le vieux continent, il semble que le terrain du dialogue pluridisciplinaire soit plus largement occupé par des forces normatives traditionnelles. Ainsi, les discours religieux ne peuvent qu'exprimer, par la voie bioéthique, les contenus de l'une ou l'autre confession. De même, le discours médical a tendance à ramener la bioéthique aux problèmes spécifiques de l'éthique médicale et de la déontologie professionnelle. Sans parler du discours juridique qui, fondé sur les Droits de l'homme, se présente, dans le cadre de ce dialogue, comme la source consensuelle normative ultime, de même que le seul outil efficace pour contrôler et limiter les excès technologiques.

Biomédecine et Droits de l'homme

En cette fin de siècle déchiré par la débâcle des valeurs, la médecine et sa technologie apparaissent comme le gardien exclusif de cette valeur refuge qu'est la « santé ». Cette dernière est définie, depuis 1945 par l'OMS, comme « non seulement l'absence de maladie, mais l'état de complet bien-être physique et moral ». Cet idéal, à la subjectivité irréductible, semble échapper à une définition objective que pourrait lui apporter une biomédecine perçue comme « scientifique ». Si la technique médicale est capable de relever audacieusement bon nombre de défis, il n'en demeure pas moins que la médecine connaît une grave crise

comportant deux volets. D'une part, sur le plan conceptuel, la médecine ne dispose pas d'une théorie fondamentale suffisamment explicative de tous les phénomènes morbides observés. D'autre part, du point de vue éthique, nul n'est en mesure de répondre objectivement à la question : qu'est-ce que soigner ?

En tant que science, la médecine moderne appartient au cadre culturel de l'humanisme progressiste apparu au siècle des Lumières imprégné de rationalisme, d'égalité et de fraternité, où la notion de progrès implique que celui de la science et de l'humanité sont interdépendants et vont de pair. La philosophie des Droits de l'homme place les sciences et les techniques aux côtés de ce dernier qu'elles aident dans sa lutte contre l'obscurantisme, l'absolutisme ainsi que dans sa conquête du mieux-être. L'esprit fondamental de cette forme d'humanisme exige la vigilance vis-à-vis du politique et de l'économique mais non vis-à-vis des sciences et des techniques qui, en revanche, sont à protéger. Si la déclaration de 1789 fonde les droits en question en se référant à l'être suprême et à la raison universelle, celle de 1948, en revanche, apparaît comme un consensus du moment entre des cultures très diverses. L'ordre des valeurs qui constitue la référence en matière d'éthique trouverait sa justification dans l'homme lui-même. C'est pourquoi, si on excepte la référence à la dignité inaliénable de toute personne humaine, elle ne fonde plus absolument et universellement les droits qu'elle proclame. Le dialogue bioéthique actuel, souvent fondé sur un consensus toujours renégociable, ne fait que refléter cet enjeu de taille où paraissent s'opposer la singularité de la personne et l'uniformité de l'individu : où la santé de ce dernier risque d'être tributaire de celle du corps social et où l'éthique serait affaire politique.

- ANDORNO R., *La bioéthique et la dignité de la personne*, Paris, PUF, 1998. — BEAUCHAMP T. & CHILDRRESS J., *Principles of biomedical ethics*, New York, Oxford Univ. Press, 3^e éd., 1989. — CANTO SPERBER M. et al., *Dictionnaire d'éthique et de philosophie morale*, Paris, PUF, 1997. — COURBAN A., « Bioéthique : science nouvelle ou éthique de toujours ? », *Travaux et Jours*, n° 59, Bayrouth, USJ, 1997, p. 115-141. — DURAND G., *La bioéthique*, Paris/Montréal, Le Cerf/Fides, 1989. — ENGELARDT et al., *The foundation of bioethics*, New York, Oxford Univ. Press, 1986. — GRMEK M.D. et al., *Storia del pensiero medico occidentale*, vol. 1 : *Antichità e medioevo*, Laterza, 1993, vol. II : *Dal rinascimento all'inizio dell'ottocento*, 1996 ; *Histoire de la pensée médicale en occident*, vol. I : *Antiquité et Moyen Âge*, Paris, Le Seuil, 1996, vol. II : *De la renaissance aux lumières*, 1997. — HARE R.M., *Essays on bioethics*, Oxford, Clarendon Press, 1993. — HOTTOIS G., *Le paradigme bioéthique*, Bruxelles, De Boeck, 1990. — HOTTOIS G. & PARIZEAU M.-H., *Les mots de la bioéthique*, Bruxelles, De Boeck, 1995. — JOUANA J., *Hippocrate*, Paris, Fayard, 1992. — LECOURT D., *À quoi sert donc la philosophie ?*, Paris, PUF, 1993 ; *Contre la peur, de la science à l'éthique une aventure infinie*, Paris, Hachette « Pluriel », 2^e éd., 1993. — LICHTENHAELER C., *Geschichte der medizin*, Cologne-Löwenich, Deutsche Ärzte Verlag, 1973 ; *Histoire de la Médecine*, Paris, Fayard, 1978. — REICH W.T. et al., *Encyclopedia of bioethics*, New York, Macmillan, 2^e éd., 1995. — SIGALÉA R., *La médecine traditionnelle de l'Inde*, Genève,

Olizane, 1995. — THOMAS J.-P., *Misère de la bioéthique. Pour une morale contre les apprentis sorciers*, Paris, Albin Michel, 1990.

Antoine COURBAN

→ Clonage.

BIOGÉOGRAPHIE

Étude de la répartition (actuelle et passée) des organismes à la surface du globe en relation avec les facteurs biotiques et abiotiques des environnements. C'est une discipline-carrefour longtemps dépourvue d'enseignement spécifique mais très présente dans différents cantons de la biologie qui y associe des savoirs physico-chimiques et prend en compte l'activité humaine. Si le mot biogéographie fut forgé à la fin du XIX^e s. par le géographe allemand F. Ratzel, l'interrogation sur la distribution des espèces remonte aux débuts de l'histoire naturelle.

En répertoriant les différences séparant les animaux, Aristote remarquait que certains vivent dans les plaines et d'autres sur les montagnes. Le finalisme expliquait cette répartition différentielle des êtres vivants, avec des mœurs distinctes, selon les types de région (*Histoire des animaux*). Le mythe assyro-judaïque de l'Arche de Noé permit de déployer cette assignation dans une séquence pseudo-temporelle. À propos des végétaux poussant « dans le sol qui leur est propre », Linné parle de « station » entendu comme « lieu destiné » ; la localisation relève d'un plan divin de dispersion de toutes les espèces à partir d'une île-berceau : il en résulte une économie de la nature ou « sage disposition » des organismes qui « tendent à des fins communes et ont des fonctions réciproques » ; dans ce cadre providentialiste les empiètements mutuels entraînent une guerre entre espèces rétablissant l'équilibre harmonieux (*La Police de la nature*, 1760). Pour sa part Buffon préférerait, à la classification linnéenne comme à la chaîne des êtres, l'image du réseau de « rapports » où « la Nature marche par des gradations inconnues », des nuances imperceptibles, d'une forme à une autre ; sur cette cartographie des contiguités, chaque espèce a sa « patrie d'origine », c'est-à-dire un climat, un sol, un relief et une nourriture propres. En établissant des listes de faunes, Buffon montre que les « quadrupèdes » d'Amérique sont tous distincts des quadrupèdes européens. À côté d'espèces à répartition mondiale, des faunes différentes occupent des régions éloignées mais situées sous les mêmes latitudes et dotées de conditions similaires. La distribution devient un problème plutôt qu'une preuve de la bienveillance divine.

Les grands voyages de découverte révèlent la diversité inouïe des formes organiques et la pluralité de leurs habitations ainsi que l'ampleur des phénomènes de peuplement et de migration : le naturaliste change d'échelle, identifie la composition faunique ou floristique de chaque région et inversement la distribution

mondiale de chaque espèce. La géographie botanique se développe la première en raison de la moindre mobilité des végétaux et de leur dépendance supposée à l'égard du sol et du climat. Dans l'*Essai sur la géographie des plantes* (1807), A. de Humboldt répertorie les espèces qui diffèrent dans les régions équatoriales respectives des deux mondes. Il met en rapport les physiologies végétales avec les variations climatiques en fonction de l'altitude, précise la répartition sur les flancs des montagnes en étagements successifs et détermine les espèces dominantes d'un paysage (les naturalistes reporteront la stratification montagneuse en répartition horizontale du pôle à l'équateur). Humboldt note pourtant que les cryptogames peuplent les hauts sommets et les cavernes. Cette phytogéographie descriptive associe les formes de croissance végétale, les réactions chimiques aux composants du sol ou à la lumière, et une vision romantique découpant la nature en « tableaux » séparés.

De son côté, dans l'article « Géographie botanique » (1820), A.-P. de Candolle suggère que si des régions similaires possèdent des flores divergentes, c'est que celles-ci sont autant le produit d'une histoire que d'un milieu donné. Il distingue ainsi l'« habitation » d'une plante (le lieu géographique où elles croissent) et sa « station » (le type d'environnement favorable) ; en comparant des stations semblables on peut faire émerger les espèces caractéristiques d'un groupe végétal donné. Il cherche à déterminer le nombre des grandes régions botaniques du globe, conçues comme des aires peuplées de plantes aborigènes, des univers floristiques distincts. Mais certains genres apparaissent dans des régions éloignées (150 plantes européennes présentes en Australie) et, en plus des centres de création, il existe des espèces introduites et des « espèces sporadiques » (disjointes).

Dans la première moitié du XIX^e s., les observations biogéographiques prolifèrent ainsi à plusieurs points de vue, certains auteurs opérant l'inventaire floristique d'une contrée, d'autres définissant les espèces caractéristiques. August Grisebach approfondit la notion de « formation » comme ensemble végétal possédant une unité physiologique (1838). On espère trouver dans la biogéographie la clef du mystère de la formation des espèces mais en aménageant les divers modèles créationnistes. Le philosophe-ministre Victor Cousin installe l'histoire naturelle en classe de philosophie car elle est « une théodicée naturelle qui montre aux élèves la main de la divine Providence, partout empreinte dans le plan de ce monde et dans l'organisation des êtres qui l'habitent » (1840). Or ce cours initiait à « l'influence des circonstances extérieures sur la distribution géographique des animaux à la surface du globe (température, végétation, configuration du sol, etc.) et à la tendance de la nature à représenter, par des espèces distinctes, les mêmes types organiques dans des régions zoologiques éloignées, mais ayant entre elles certains points de ressemblance ». Avant de se convertir à l'évolution, le plus proche ami de Darwin, Joseph Hooker, justifiait « la permanence des espèces » à

l'aide d'arguments biogéographiques tels que la conservation des caractères au travers des dispersions ou du changement des stations (*Flora Novae-Zelandae*, 1853).

La paléontologie part des relations constatées entre les organismes actuels et leur « milieu » pour déduire les conditions d'existence des espèces disparues selon leur degré de ressemblance avec les espèces vivantes. En outre, la distribution géographique des végétaux fossiles prend une dimension historique car certains paléobotanistes pensent que la répartition actuelle pourrait s'expliquer plus par l'histoire du règne végétal que par les données climatiques ou la composition chimique des sols. Comme la majorité des géologues admet une histoire directionnelle du globe, une progression séquentielle des archives fossiles et un refroidissement continu de la terre, on croit en une diversification de la topographie terrestre accompagnée par un processus d'ajustement des organismes (par création des formes successivement adaptées ou par mise en correspondance réussie avec les nouvelles conditions de vie). Même un adversaire du progressisme comme Lyell convient que la possibilité d'existence d'une espèce est déterminée par les circonstances extérieures et « par l'existence ou l'absence, l'abondance ou la rareté de l'assemblage particulier d'autres plantes et animaux dans la même région » (*Principles of geology*, II, 1832).

L'expansion coloniale contribue fortement à l'essor du savoir sur la distribution des organismes tout en lui fournissant un vocabulaire métaphorique (colonisation, naturalisation, espèces indigènes, communautés végétales...). Parallèlement les métropoles impériales voient naître des sociétés d'acclimatation qui transfèrent des espèces et tentent de modifier des flores ou des faunes. Si on souligne d'un côté la singularité des ensembles de vivants affectés à une région, on étudie de l'autre les liens entre histoire de la terre et nature des faunes (avec notamment l'hypothèse des ponts terrestres entre archipels ou continents) ; on affine ainsi des notions telles que centre de création, aire de distribution et de dispersion, barrière géographique, genre caractéristique, compétition entre espèces coexistantes, etc. Sous la biogéographie statique pointe une approche dynamique imaginant comment se sont constituées au cours du temps les aires actuelles de répartition. Dans une vaste synthèse Alphonse de Candolle entreprend l'étude systématique des facteurs démontrant que les faits de distribution tiennent d'abord à la série des événements géophysiques éprouvés par les organismes. De tous les livres retrouvés dans la bibliothèque de Darwin, la *Géographie botanique raisonnée* (1855) est celui qu'il a le plus annoté.

Darwin rapporta de son voyage de circumnavigation sur le *Beagle* (1832-1836) des données singulières de distribution géographique qui, complétées par des avis d'experts en taxonomie, le conduisirent à envisager la transmutation. Mais c'est l'invention postérieure de la sélection naturelle, à partir d'autres savoirs (variation,

domestication, démographie), qui explique la radiation adaptative, sur un archipel, d'espèces endémiques venues du continent ainsi que la parenté « d'espèces représentatives » qui se succèdent et se remplacent l'une l'autre sur une même aire continentale. Entre 1837 et 1859, Darwin abandonne la nécessité, pour la spéciation, de l'isolement géographique, adopte le concept d'adaptation relative, élabore le principe de divergence (qui valorise les facteurs biotiques) et reformule la notion de « place » (habitat ou ensemble des conditions de vie). Deux chapitres de *L'Origine des espèces* (1859) font de la biogéographie un domaine de validation de la théorie de la descendance, à côté de la systématique, de la paléontologie et de l'embryologie. Darwin y reprend d'anciennes questions : pourquoi des pays à climat comparable possèdent-ils des faunes distinctes, comment les obstacles naturels à la dispersion séparent-ils les formes vivantes, pourquoi les types organiques qui se remplacent mutuellement dans une même région sont-ils apparentés ? Ces données s'expliquent « par la théorie de la migration combinée avec les modifications ultérieures et la multiplication des formes nouvelles ». Darwin réoriente ainsi les objectifs de la biogéographie : l'étude expérimentale des capacités de dispersion propres aux différents genres ; l'analyse des barrières géographiques ou géologiques ; la compétition subie par une espèce migrante dans sa nouvelle aire de répartition (présence de formes concurrentes) ; le peuplement des îles océaniques ; la compréhension des frontières interspécifiques et des spéciations sympatriques ou allopatriques, etc.

Les darwinistes disposaient donc d'un programme de recherches. Huxley incorpore « les divisions ontologiques primaires de la surface terrestre » définies par l'ornithologue Sclater à la taxonomie des oiseaux qu'il redivise en trois grands groupes à partir de certains caractères ostéologiques (1868). Le codécouvreur de la sélection naturelle et grand voyageur-naturaliste A.R. Wallace affirmait dès 1853 que la biogéographie formait « la partie la plus intéressante de l'histoire naturelle ». Il rédige ensuite plusieurs synthèses sur la répartition insulaire ou continentale des faunes en insistant plus que Darwin sur les obstacles naturels : description des grandes subdivisions fauniques et floristiques du globe, explication historique de leur constitution et de leur différenciation en relation avec les changements géologiques et climatiques. Il reprend dans une perspective évolutionniste la définition des aires d'endémisme à partir desquelles une dispersion limitée est possible.

Lorsqu'il forge le mot écologie, Ernst Haeckel l'assimile à la biogéographie : « L'écologie ou distribution géographique des organismes [...] science de l'ensemble des rapports des organismes avec le monde extérieur ambiant » (*Histoire de la création*, trad. 1874, p. 637). Darwin avait défini la lutte pour l'existence comme l'ensemble des relations de dépendance entre des organismes et donnait des exemples de chaîne alimentaire ou de cycles d'équilibre populationnel. Toutefois, l'élaboration successive des concepts de

biocénose (1877), de climax (1886), de biome (1916), de niche (1927), de facteurs abiotiques et de biotope, puis d'écosystème (1935) conduit à voir la biogéographie à la fois comme une discipline ancêtre et une discipline dépendante. Car on passe d'une étude de la répartition de la diversité biologique à une analyse du système complexe des régulations au sein d'une « communauté ». Eugenius Warming sépare en 1895 la géobotanique chorologique qui étudie les faits de distribution entre taxons, et la géobotanique écologique qui cherche à expliquer comment « les communautés végétales ajustent leurs formes et leurs comportements aux facteurs actifs tels que la quantité de chaleur, de lumière, de nourriture et d'eau ». Lamarckien, Warming étudie les capacités physiologiques des plantes à s'adapter à tel type d'environnement. En revanche, l'école d'écologie de Chicago incorpore la sélection naturelle dans l'analyse causale des communautés végétales, en structurant les phénomènes d'association, d'invasion, de succession et d'équilibration au stade climatique.

À la suite de F.E. Clements (1905), on considérait chaque communauté végétale ou animale comme une « entité organique » à succession unique, sur le modèle de l'organisme individuel en développement. L'histoire ultérieure de l'écologie abandonne cet organicisme en délaissant les éléments en relation au profit de l'écosystème dans lequel l'état d'équilibre correspond à une productivité biologique maximale susceptible de formalisation ; à une mise en rapports d'entités concrètes succède une étude des transferts d'énergie, des flux et des cycles de matière. Mais alors que le darwinisme avait anéanti l'idée d'économie de la nature, l'écologie manipulait un concept ambigu d'équilibration frisant l'idée d'harmonie spontanée. En outre, bien que les notions de cycle et de réseau trophiques interprètent des processus dynamiques, beaucoup d'écologues croyaient travailler à l'échelle d'un temps trop court pour prendre en compte l'évolution. Or, il existe des exemples de modification génotypique très rapide et les systèmes de peuplement ou de coadaptations sont conditionnés par des contraintes issues de l'évolution.

Le rapport entre écologie et biogéographie oscille toujours, selon les auteurs contemporains, de l'identité à la complémentarité, de l'inclusion à la subsidiarité. On distingue à nouveau une biogéographie historique (déterminer où et quand sont apparus les taxons et comment ils se sont répandus) et une biogéographie écologique (comprendre les modes d'interaction et d'équilibration dynamique au sein de chaque biotope). Ainsi se reconstitue l'autonomie d'un objet : expliquer la diversité biologique et ses mécanismes de régulation provisoire dans le temps et l'espace, c'est-à-dire croiser l'étude des relations des organismes avec un environnement donné et l'histoire des peuplements de chaque aire de répartition, en fonction de la phylogénie et des changements géologiques. À ce titre, la biogéographie embrasse des spécialités aussi diverses que la tectonique des plaques, la cladistique, la paléontologie, l'anatomie comparée, la biochimie, la géochimie et la

génétique des populations. Voir les revues *Biogeography and climatology* (depuis 1972) et *Biogeographica* (publiée depuis 1993 par la Société biogéographique de France).

- ACOT P., *Histoire de l'écologie*, Paris, PUF, 1988.
 - BLONDEL J., *Biogéographie évolutive*, Paris, Masson, 1986.
 - BROWNE J., *The Secular Ark*, New Haven, Yale Univ. Press, 1983.
 - DELEAGE J.-P., *Histoire de l'écologie*, Paris, La Découverte, 1991.
 - HUMPHRIES C.J. & PARENTI L.R., *Cladistic biogeography*, Oxford, Clarendon Press, 1986.
 - LIMOGES C., « De l'économie de la nature aux écosystèmes », *Spectre*, déc. 1980, p. 9-14.
 - MYERS A.A. & GILLER P.S., *Analytical biogeography*, Londres, Chapman & Hall, 1988.
 - NELSON G.J. & PLATNICK N., *Systematics and biogeography*, New York, Columbia Univ. Press, 1981.
 - REY R. dir., *Revue d'histoire des sciences*, Paris, PUF, 1992, 45/4.

Gérard MOLINA

→ Darwinisme ; Écologie ; Environnement ; Espèce ; Sélection ; Taxinomie.

BIOTECHNOLOGIES

Considérées comme une activité destinée à modifier la matière vivante, les biotechnologies naissent avec les premières grandes civilisations. L'agriculture et l'élevage ont conduit l'homme à réaliser l'hybridation d'espèces végétales ou la sélection empirique des espèces animales, de même l'usage de la levure en boulangerie et pour la préparation des boissons ou celui de la fermentation lactique à l'origine du yaourt sont attestés dès l'Antiquité. Mais au sens moderne du terme, les biotechnologies sont filles de la « révolution pasteurienne », c'est-à-dire de la naissance de la microbiologie et de la connaissance des mécanismes de la fermentation (Salomon Bayet, 1986). Louis Pasteur démontre que cette dernière est un processus qui relève du vivant et non de la chimie pure et plus précisément de l'activité de corps que l'on qualifiera d'enzymes. Les pasteuriens tentèrent vainement de libérer les catalyseurs responsables de la fermentation de la levure et c'est le biochimiste allemand Eduard Buchner qui parvint à isoler la première enzyme, la zymase en 1897.

Un siècle plus tard, les biotechnologies entrent dans l'âge de la biologie moléculaire, c'est-à-dire qu'elles bénéficient des connaissances acquises dans les mécanismes de la vie, notamment sur la manière dont une cellule vivante fabrique des protéines (des enzymes, des anticorps ou des hormones). Au début des années 1950, lorsque l'Américain Jim Watson et l'Anglais Francis Crick publient leur célèbre article sur la structure générale de la macromolécule d'acide désoxyribonucléique (ADN), leur description de la structure en double hélice de ses chaînes de quatre nucléotides « illumine le mécanisme de la transmission héréditaire » (Douzou *et al.*, 1995). En fait l'ADN n'exécute pas directement les fonctions qu'il détermine, il forme une « matrice » d'acide ribonucléique (ARN) qui, selon l'arrangement spécifique de ses nucléotides « exprime » à son tour des protéines

(des macromolécules constituées de chaînes de vingt acides aminés dont l'ordre d'enchaînement est déterminé par l'arrangement des quatre nucléotides de l'ADN). La morphologie spécifique de chaque protéine fait qu'elle s'associe à d'autres protéines, attrape des sucres pour les casser en morceaux ou encore capte l'oxygène pour le transporter dans l'organisme, etc., bref, sa structure déterminée par le code nucléique lui permet de réaliser des « associations » antigènes-anticorps, hormones-récepteurs, enzyme-substrat, etc. On sait le rôle de Jacques Monod et de François Jacob à l'Institut Pasteur de Paris pour mettre en lumière le rôle de l'ARN messager dans la synthèse des protéines et expliquer le phénomène de l'induction enzymatique. C'est Monod qui proposera un jour de remplacer le terme de « manipulations génétiques » consacré par la biologie moléculaire par celui de « génie génétique » (Lwoff, 1980).

Ingénierie des protéines

La possibilité de produire artificiellement des enzymes, des hormones ou des anticorps dépend donc de la capacité à manipuler les morceaux d'ADN qui les expriment. Un progrès méthodologique majeur résulte du développement des techniques de recombinaison génétique dans les années 1970, particulièrement le clonage des gènes ou de morceaux de gènes pour fabriquer des hybridomes. Un clone est la reproduction (asexuée) du même patrimoine génétique entre géniteur et descendance, tel que cela existe à l'état naturel chez les bactéries et chez certains animaux ; le clonage artificiel consiste à séparer un gène des autres gènes de la chaîne d'ADN pour le reproduire par le biais d'un vecteur génétique, l'ADN d'une cellule hôte qui peut être une bactérie par exemple, ce qui permet de fabriquer à volonté des gènes mutants (hybridomes), codant pour telle ou telle protéine productrice d'anticorps, d'enzymes ou d'hormones.

En 1984, le prix Nobel de médecine et de physiologie été décerné aux immunologistes Niels Jerne, Georges Köhler et Cesar Milstein pour leurs théories sur « la spécificité des réponses du système immunitaire » et « la découverte du principe de production des anticorps monoclonaux ». Jerne, l'un des plus grands immunologistes du XX^e s., avait théorisé le fonctionnement du système immunitaire : chaque individu dispose d'anticorps naturels qui s'opposent à des antigènes et ces anticorps se développent dès la vie embryonnaire en l'absence d'antigènes externes et c'est l'accouplement antigène-anticorps qui stimule la production d'anticorps spécifiques par les lymphocytes du sang (la mise en place du système immunologique dans un organisme vivant est donc la conséquence d'un processus qui relève de la sélection naturelle). C'est à partir de la théorie de Jerne que Köhler et Milstein ont mis au point une technique de fabrication des anticorps. L'ADN d'un lymphocyte humain est accolé à l'ADN de cellules de rate de souris pour donner une culture *in vitro* - « immortelle » puisque d'origine

tumorale -, un hybridome capable de produire des anticorps monoclonaux.

Ces anticorps représentent un nouvel outil d'investigation en biologie fondamentale comme en médecine. Ils constituent des bioréactifs pratiquement purs qui permettent de lire le code de l'hémoglobine (Rougeon, 1975 ; Hozumi, 1976). Le premier usage clinique de la recombinaison de l'ADN concerne la mise au point du diagnostic prénatal d'une anémie liée à un défaut héréditaire de l'hémoglobine (Kan, 1976). Les anticorps monoclonaux permettent de caractériser des maladies par l'identification des antigènes associés, c'est le cas de l'hépatite B dont l'agent infectieux n'est pas directement isolé mais dont l'antigène est séquencé (1979). De même les rétrovirus, ces organismes qui intègrent leur ARN dans le noyau des cellules hôtes pour en modifier l'ADN - l'inverse du processus général de la génétique, raison pour laquelle on les appelle virus recombinants - sont d'abord identifiés par leurs antigènes. En 1981 les cancérologues Harold Varmus et Michael Bishop du National Institute of Health (NIH) américain isolent l'oncogène responsable du sarcome de Rous ; deux ans plus tard une équipe de l'Institut Pasteur isole une *Human Immunodeficiency Virus* (HIV) responsable de l'épidémie de sida (Barré-Sinoussi, 1983).

Les techniques de recombinaison génétique permettent aussi de fabriquer des médicaments. Dès la fin des années 1970, on obtient des hormones, la somatostatine, l'une des hormones du cerveau, des hormones de croissance et bientôt l'insuline. L'insuline est une protéine produite dans le pancréas qui sert à réguler la concentration de glucose dans le sang. On sait que les diabétiques doivent recourir à des injections d'insuline extraite de pancréas animaux. Herbert Boyer, de l'université de Californie à Los Angeles, réussit à fabriquer de l'insuline humaine à partir d'un hybridome de bactérie *E. Coli* et il fonde l'une des premières entreprises commerciales dédiées aux nouvelles biotechnologies, Genentech (octobre 1982). De même, les recombinaisons génétiques permettent bientôt la production d'antibiotiques ou de vaccins hybrides. Grâce à un hybridome de levure on produit un vaccin contre l'hépatite B (Hilleman, 1987) et on parvient à fabriquer des interférons, ces antibactériens qui ne représentent qu'une infime partie de l'ARN messager.

Enfin, il est vraisemblable que grâce aux techniques de recombinaisons génétiques, on connaîtra bientôt l'intégralité du génome humain. Le projet de cartographie l'intégralité du génome de l'homme représente une tâche gigantesque - si celui de la petite bactérie *E. Coli* comporte cinq millions de bases, celui de la levure en compte quinze millions (aujourd'hui décryptées) et celui de l'homme (ou de la souris)... trois milliards, dont près des neuf dixièmes ne semblent d'ailleurs avoir aucune fonction génétique - mais la tâche semble à la portée des nouvelles technologies. En tout cas, les enjeux sont tels qu'ils ont convaincu médecins et biologistes de se lancer dans une entreprise qui est en passe de transformer la biologie en « science

tourde » comme le sont devenues la physique nucléaire ou la conquête spatiale. L'initiative en revient au National Institute of Health américain où la responsabilité de programme est confiée à Jim Watson, le découvreur de la structure de l'ADN (Kevles, Leroy Hood, 1992) et à des médecins français lorsqu'en 1985 Daniel Cohen et Jean Dausset créent un Centre d'études du polymorphisme humain (CEPH). Le CEPH entreprend d'automatiser au maximum le relevé de la carte génomique humaine, son séquençage est réalisé par des robots biologistes mis au point par la société Bertin qui synthétisent des petits fragments d'ADN (oligonucléotides) découpés en morceaux de la taille voulue grâce à des molécules coupées de gènes, les enzymes de restriction (qui permettent aussi de localiser les origines des séquences codantes du génome) pour être ensuite recombinés avec un ADN hôte - en l'occurrence celui de la levure (Yeast Artificial Chromosomes) afin d'être soumis à une PCR (Polymérase Chain Reaction) qui permet la lecture de la chaîne nucléotidique. Que ce soit en France ou aux États-Unis, on constate que le principal mobile des « cantonniers de l'ADN » (Cohen, 1993) est d'ordre médical ; il s'agit de localiser les gènes défectueux du génome, c'est-à-dire l'origine des maladies génétiques. Aujourd'hui, il ne se passe guère de mois qu'on ne découvre le gène facteur ou cofacteur d'une nouvelle maladie. Mais peut-on réparer l'ADN défaillant ? Ce projet encore plus ambitieux que la fabrication des protéines par recombinaison génétique a vu ses premières réalisations grâce à l'utilisation de virus recombinants. Le Généthon a permis la mise au point d'une thérapeutique contre la mucoviscidose consistant à pulvériser directement dans les bronches du patient un adénovirus porteur des gènes absents de son génome.

Naissance d'une industrie ?

L'histoire récente des biotechnologies multiplie les paradoxes. En 1975, c'est à l'instigation des scientifiques de l'Académie des sciences des États-Unis que la conférence d'Asilomar (Californie) évoque les risques de l'utilisation de l'ADN recombinant et propose un moratoire sur la diffusion des nouvelles technologies en dehors des laboratoires (Fincham, Ravetz, 1993). Il n'empêche, le législateur nord-américain laisse se développer les nouvelles technologies en dehors de toute contrainte dans les secteurs pharmaceutiques, agronomiques ou chimiques et, en une dizaine d'années, un nouveau secteur industriel est né dont les performances boursières n'ont guère à envier à celles d'autres secteurs de pointe comme l'informatique. En 1980, à la demande d'un ingénieur de la General Electric (A. Chakrabarty) qui sollicite la prise d'un brevet pour une bactérie nettoyeuse d'hydrocarbures, la Cour suprême des États-Unis reconnaît que des organismes vivants peuvent être brevetés, tout comme n'importe quel procédé technique. En 1987, le bureau des brevets (US) étend le principe de protection industrielle « ... à tout organisme vivant multicellulaire, dont les

animaux, mais en excluant l'espèce humaine » et, s'il refuse (en 1992) de reconnaître une quelconque propriété intellectuelle sur une séquence d'ADN humain, il accepte de breveter une lignée de souris transgéniques destinées à la recherche cancérologique. L'affaire John Moore contre l'université de Californie à Los Angeles (UCLA) illustre à quel point les biotechnologies font désormais partie de l'économie de marché. Moore est un patient atteint d'une forme rare de leucémie dont les médecins découvrent que la rate produit des anticorps contre le cancer particulièrement efficaces qu'ils décident de commercialiser. Mais, en 1988, Moore est débouté de sa demande de royalties, la jurisprudence nord-américaine confirmant qu'une lignée cellulaire ne saurait être la propriété du donneur, mais celle de l'inventeur. Cette législation particulièrement libérale explique en partie le boom des industries biotechnologiques aux États-Unis, l'autre raison étant évidemment d'ordre économique. Il se traduit d'abord par l'apparition de nouvelles firmes (Cetus, Genentech, etc.) ; puis les grands de l'industrie pharmaceutique ou de l'agro-alimentaire investissent le domaine (Smithkline Beecham, Elie Lilly, Abbott, Connaught, etc.). La même évolution se vérifie en France. Des firmes nouvelles apparaissent comme Transgène (Strasbourg), Genetica (Paris) ou Immunotech (cette dernière en tant que filiale d'un institut d'immunologie installé à Marseille-Luminy par la recherche publique, CNRS-INSERM), puis des grandes entreprises ouvrent des départements de biotechnologie (Rhône-Poulenc, BSN, Sanofi, etc.). Il s'agit de produire des antibiotiques, des vitamines (B12, C2, B2), des vaccins humains ou vétérinaires à meilleur coût que les procédés biochimiques ou bactériologiques traditionnels. Soulignant l'intérêt économique des biotechnologies, la firme Elie Lilly (Indianapolis) avance que vingt hectolitres de cultures bactériennes peuvent fournir cent grammes d'insuline pure alors qu'il faut plus de sept cents kilogrammes de pancréas de porc par la manière classique. Bref, au début des années 1990 la production de médicament représente un gros tiers du chiffre d'affaire mondial des biotechnologies, estimé à près de trois milliards et demi de dollars.

Un second paradoxe fait que, bien que les biotechnologies soient surgies du secteur biomédical, l'industrie alimentaire ou chimique représente aujourd'hui la part la plus importante de son chiffre d'affaire. Ainsi en 1991, les deux tiers sont réalisés dans le secteur agro-alimentaire, c'est-à-dire par la production d'enzymes, de levures, d'isoglucose, de biopolymères (épaississants alimentaires et conservateurs), d'acides organiques (la production d'acides lactiques et citriques par la voie biologique est devenue concurrentielle avec les méthodes purement chimiques), etc. En théorie, toutes les synthèses de la chimie organique peuvent désormais être réalisées à partir de la biomasse. Pour résoudre ses problèmes d'énergie, le Brésil s'est lancé dans la production d'éthanol, un carburant de substitution à l'essence fabriqué à partir de la canne à sucre. Évidemment l'agronomie a elle aussi bénéficié des

avancées récentes en matière de biotechnologies. Pour diverses raisons, la biologie moléculaire du monde végétal avait pris un certain retard par rapport à celle des procaryotes et des mammifères. Aujourd'hui, une partie des semences commercialisées dans le monde provient des techniques de clonage *in vitro* par plasmides de transfert Ti. Car les biotechnologies améliorent la productivité des cycles naturels, par exemple par le raccourcissement des cycles normaux de sélections de plantes homozygotes. Un pied de framboisier fournit par les techniques classiques cinquante descendants par an, en clonage *in vitro* on peut en obtenir mille fois plus. L'introduction de gènes étrangers dans le génome des espèces végétales permet d'obtenir des plantes qui présentent des caractéristiques métaboliques utiles à l'agriculture, c'est-à-dire de doter les espèces utiles (blé, orge, maïs, etc.) de la capacité de résister aux herbicides ou aux parasites grâce au clonage d'inhibiteurs de protéase. De même, le mélange du patrimoine génétique de deux espèces par fusion des protoplastes permet d'en créer de nouvelles ; l'hybridome de tomate et de pomme de terre donne un nouveau légume, la « pomate ». L'industrie agro-alimentaire affirme que les biotechnologies sont porteuses d'une nouvelle « révolution verte » : en 1987 aux États-Unis, un patron de la société Monsanto n'hésite pas à l'affirmer : « Certes, nous n'avons pas encore trouvé de vaccin fiable contre certaines maladies tels la malaria ou le sida. En revanche nous disposons maintenant d'un vaccin vraiment efficace contre la faim dans le monde, il s'agit de toutes les possibilités offertes par l'agriculture transgénique » (Schneiderman, 1987).

Ces possibilités intéressent aussi l'élevage animal. Les techniques de reproduction *in vitro* ont décuplé les capacités de reproduction des bovidés (désormais une vache peut assurer la gestation d'une centaine de veaux au cours de son existence là où elle ne pouvait en porter qu'une dizaine par insémination artificielle). Surtout, le développement des techniques de clonage d'organismes supérieurs ouvre la perspective de transformer vaches et brebis en véritables usines à protéines depuis que les biologistes ont réussi à exprimer « à long terme » un gène humain inséré dans de l'ADN animal (Dziersak, Belmont, 1988). On a réussi à faire produire à des vaches transgéniques du lait contenant des protéines à usage thérapeutique humain (Gene Farming). Enfin, comment ne pas signaler la naissance de la brebis Dolly en Écosse au début de l'année 1997 ? La possibilité de cloner l'ensemble d'un organisme complexe implique des conséquences prodigieuses et pour certains, effrayantes.

En effet, l'avenir des biotechnologies n'apparaît pas sans nuage et d'ailleurs leur développement n'est pas allé sans susciter des inquiétudes. On connaît les arguments d'un débat éthique sur lequel on ne s'attardera pas ici mais qui resurgit à l'occasion de chacune de ses prouesses : on redoute que l'agriculture transgénique ne diffuse dans la nature de l'ADN recombiné susceptible de modifier l'équilibre naturel ; on craint que le

géné génétique ne fournisse à la médecine humaine l'outillage d'un nouvel eugénisme. Quoi qu'il en soit, l'expansion du secteur a marqué une pause au début des années 1990, mais peut-être pour des raisons moins liées à l'éthique qu'aux contraintes économiques auxquelles il s'est heurté. En 1994 le magazine *Business Week* (26 sept. 1994) s'interroge : « Les biotechnologies : pourquoi ça n'a pas payé ? ». et dresse le constat d'un secteur économique handicapé par sa fragilité, la multiplication de petites firmes aux ressources financières limitées, en tout cas insuffisantes pour assurer une recherche-développement de qualité. Les nouvelles firmes ont tablé sur des investissements à trois ans alors que l'industrie pharmaceutique traditionnelle escompte sept à dix ans pour développer de nouveaux médicaments. Une situation aggravée par des études de marché trop optimistes et des mauvaises estimations de coûts de fabrication. De plus, on peut lui reprocher certains échecs thérapeutiques, voire la persistance de certaines incertitudes sur l'efficacité du génie génétique (Carey, 1994). Lorsque le *Washington Post* signale le premier succès d'une thérapie génique appliquée à deux fillettes souffrant d'une forme rare de maladie auto-immune, l'enthousiasme est tempéré par le fait qu'on ignore si leur guérison est le fait des gènes recombinants ou d'une chimiothérapie beaucoup plus classique (Weiss, 1995). Bien sûr, nul ne songe à remettre en question le développement des biotechnologies et surtout leurs extraordinaires promesses. Cependant, on relève que leur budget de recherche-développement qui croissait de près de 40 % par an au tout début des années 1990 est revenu à un taux dix fois moindre aujourd'hui. C'est probablement le signe que les biotechnologies atteignent leur maturité.

► BARRÉ-SINOUSSE F. *et al.*, « Isolation of a T-lymphotropic retrovirus from a patient at risk for acquired immune deficiency syndrome (AIDS) ». *Science*, 220, 1983, p. 868-871. — BELMONT J.W. *et al.*, « Expression of human adenosine deaminase in murine hematopoietic cells ». *Molecular Cell Biology*, 8, 1988, p. 5116-5125. — CAREY J., « Gene therapy promises », *Business Week*, 4 sept. 1994, p. 3391. — COHEN D., *Les gènes de l'espoir. À la découverte du génome humain*, Paris, R. Laffont, 1993. — DOUZOU P., DURAND G., KOURILSKY P. & SICLET G., *Les Biotechnologies*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 3^e éd., 1995. — DZIERSAK E., PAPAYANNOPOULOU T. & MULLIGAN R., « Lineage-specific expression of a human Beta-globulin gene in murine bone marrow transplant recipients reconstituted with retrovirus-transduced stem cells ». *Nature*, 331, 1988, p. 35-41. — FINCHAM J.R.S. & RAVETZ J.R., *Genetically Modified Organisms. Benefits and Risks*, Univ. Press of Toronto, 1991. — HILLEMANN M.R., « Yeast recombinant hepatitis B vaccine », *Infection*, 15, 1987, p. 3-7. — HUZUMI N. & TONEGAWA S., « Evidence for somatic rearrangement of immunoglobulin genes coding for variable and constant regions ». *Proceedings of the National Academy of Sciences (US)*, 73, 1976, p. 3628-3632. — KAN Y.-W., GOLBUS M.S. & DOZY A.M., « Prenatal diagnosis of alpha-thalassemia, clinical application of molecular hybridization ». *New England Journal of Medicine*, 295, 1976, p. 1165-1167. — KEVLES D.J. & LEROY HOOD, *The Code of Codes. Scientific and Social Issues in the Human Genome Project*, Harvard Univ. Press, 1992. — KOURILSKY P., « Le génie génétique ». *La Recherche*, 1980, n° 110, p. 390-403.

— LWOFF A. & ULLMAN A. prés., *Hommage à Jacques Monod. Les origines de la biologie moléculaire*, Paris/Montréal, Études vivantes, 1980. — ROUGEON F., KOURILSKY P. & MACH B., « Insertion of a rabbit Beta-globin gene sequence into an E. coli plasmid ». *Nucleic Acids Research*, 2, 1975, p. 2365-2378. — SALOMON-BAYET C. dir., *Pasteur et la révolution pasteurienne*, Paris, Payot, 1986. — SCHNEIDERMAN H.A., *Biotechnology : a Key to America's Economic Health in Health Care and Agriculture* (conférence à la Société Américaine de Microbiologie, San Diego [Cal.], juin 1987), Saint Louis, Monsanto, 1987. — WEISS R., « Scientists report the first success of "gene therapy" : experimental technique helps defeat immune-system ailment », *Washington Post*, 20 oct. 1995. — Coll. : *Monod, hommage à — Les origines de la biologie moléculaire*, Paris/Montréal, Études vivantes « Academic Press », 1980. — Internet : BERNOT A. & ALBERT O., « La naissance de la biologie moléculaire », <http://www.genethon.fr/projets/Histoire/BM/>. — Fondation Nobel, <http://www.nobel.se/laureates/medicine>. — LANE M., « Invention or Contrivance? Biotechnology, Intellectual Property Rights and Regulation (conf. à la convention sur la diversité biologique, Djakarta, nov. 1995) », <http://www.acephale.org/bio-safety/loCindx.htm>.

Jean-François PICARD

→ ADN ; Agronome ; Clonage ; Nature ; Race.

BOHR Niels, 1885-1962

Niels Bohr fut un physicien théoricien d'une perspicacité et d'une profondeur exceptionnelles. Il a créé la théorie de l'atome, contribué à celle du magnétisme, à la physique nucléaire... Mais aussi, il a jeté les bases d'une conception de la science qui dépasse le principe métaphysique fondateur posé par Galilée : le monde est mathématique.

En 1911 un jeune physicien danois, Niels Bohr, soutient une thèse sur la théorie électronique des métaux. Il démontre que selon cette théorie, un métal contenant des électrons libres ne pourrait pas être diamagnétique. Ce résultat maintenant classique (« théorème de Bohr-van Leeuwen ») va permettre à Bohr de dépasser la croyance des physiciens de l'époque, selon laquelle les théories physiques déjà connues pouvaient rendre compte de tous les faits expérimentaux.

En 1913 il publie trois articles « Sur la constitution des atomes et des molécules ». Il y rend compte des propriétés essentielles des spectres atomiques en combinant subtilement l'électromagnétisme et la mécanique classique avec des hypothèses qui contredisent frontalement ces théories. C'est ce qu'on appelle désormais « l'atome de Bohr ». L'hypothèse d'un atome « planétaire » (Perrin, Nagaoka) avait été précisée et justifiée par Rutherford grâce aux expériences de ses élèves Geiger et Marsden. Il semblait impossible de la concilier avec les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme : selon ces lois, en effet, une particule électriquement chargée en mouvement accéléré perd de l'énergie par rayonnement, et par suite un atome planétaire ne peut être stable. Les théoriciens cherchaient à combler l'abîme entre l'atome et ce que nous appelons aujourd'hui la physique classique. Bohr,

au contraire, comprend qu'avec les atomes la physique entre dans une région nouvelle, caractérisée par la pertinence du quantum d'action h . Il pose les hypothèses suivantes :

- 1° L'énergie d'un électron atomique ne peut prendre qu'une série de valeurs discrètes, correspondant à des états stationnaires de l'atome. Dans un état stationnaire l'électron n'émet aucun rayonnement.
- 2° Quand l'atome passe d'un état stationnaire à un autre d'énergie moindre, il émet un quantum de rayonnement dont la fréquence est déterminée par la loi de conservation de l'énergie, et par la relation de Planck entre la fréquence d'un rayonnement et l'énergie des quanta (aujourd'hui appelés photons) dont il est constitué. Le processus d'émission est un « saut quantique » qui ne peut être analysé en étapes successives. Bohr parvient ainsi à rendre compte de la formule empirique de Balmer, qui décrit le spectre expérimental de l'hydrogène.

Après 1913 il étudie longuement les relations entre physique classique et propriétés quantiques (« principe de correspondance »). L'atome de Bohr, cependant, ne peut être qu'une théorie provisoire. La *mécanique quantique*, créée en 1925 par Max Born et Jordan et par Heisenberg, paraît capable de systématiser les acquis et de permettre d'aller plus loin. Mais elle pose de graves problèmes dès qu'il ne s'agit plus seulement de faire des calculs mais de comprendre ce que l'on fait. Ayant longuement médité sur la signification de cette nouvelle mécanique, Bohr formule en 1927 un *postulat quantique* : tout processus atomique présente un caractère d'indivisibilité, complètement étranger aux théories classiques. (L'évolution ultérieure de la physique l'a confirmé : cette inséparabilité est bien au cœur de la théorie quantique.) L'objet atomique et l'appareil qui sert à l'observer sont, en principe, inséparables : « On ne peut par conséquent attribuer une réalité indépendante, au sens physique ordinaire de ce mot, ni aux phénomènes ni aux instruments d'observation. » C'est pourquoi on ne peut pas dire qu'un électron, par exemple, est un corpuscule, ou qu'il est une onde : il est l'un ou l'autre, selon le dispositif expérimental dans lequel il est plongé. C'est ce que Bohr appelle la *complémentarité*.

Autre aspect : il doit exister des systèmes de deux (ou plus) objets atomiques inséparables. Nous savons cela grâce à Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen, qui dans un article célèbre de 1935 tentèrent de montrer que la mécanique quantique est une théorie incomplète. Bohr leur répondit dans un article profond et difficile, souvent incompris encore de nos jours. Plus récemment, en cherchant à justifier les idées d'Einstein, John Bell a découvert un critère (les « inégalités de Bell ») qui distingue entre les hypothèses de Bohr et Einstein-Podolsky-Rosen. L'approche de ces derniers exige que les résultats de certaines mesures effectuées sur deux objets atomiques inséparables (on dit aussi « intriqués ») satisfassent les inégalités de Bell. Or l'« expérience de pensée » imaginée dans leur article a

maintenant pu être réalisée dans un grand nombre de variantes, et les résultats ont montré avec persistance une violation des inégalités de Bell. C'est pourquoi les physiciens les plus sensibles aux leçons de l'expérience jugent que le point de vue de Bohr l'a emporté.

Physique nucléaire

En 1936 Fermi et ses collaborateurs envoient des neutrons sur des échantillons de matière. Les phénomènes qu'ils observent sont dus à l'interaction des neutrons avec les noyaux des atomes de l'échantillon. En utilisant la mécanique quantique et en faisant des hypothèses simples et naturelles, Bethe a évalué les probabilités des divers types d'événements que peut produire cette interaction. Il a trouvé que les processus élastiques (où le neutron rebondit sur le noyau sans l'altérer) doivent prédominer. Or l'équipe de Fermi a trouvé que pour toute une série d'espèces nucléaires, c'est la capture du neutron qui est de loin la plus probable. Bohr aborde cette contradiction avec le sens aigu de la spécificité des objets et des situations qui lui est propre. Contrairement à ce qui se passe quand des électrons interagissent avec des atomes on a affaire, admet-il, à un processus en deux étapes. Le neutron incident est d'abord capturé par le noyau, formant avec lui un système hautement instable appelé *noyau composé*. Celui-ci élimine ensuite son excès d'énergie, soit en émettant un photon — c'est la capture du neutron — soit par un autre moyen. Le concept de noyau composé est devenu central en physique nucléaire ; Bohr ne l'avait pas trouvé par des calculs mais en réfléchissant sur des particularités qualitatives : compacité des noyaux, courte portée des forces qui s'exercent entre leurs constituants (protons et neutrons).

De même quand il aborde la théorie de la fission nucléaire, Bohr compare le noyau à une goutte liquide, ce qui permet de comprendre des traits essentiels du phénomène de fission.

À propos de la mesure, Bohr insiste souvent sur le fait que l'appareil et les résultats des mesures qu'il effectue doivent être décrits en termes de concepts classiques. Cela semble aller de soi, puisque l'appareil est macroscopique. Mais Bohr justifie cette prescription par un argument surprenant : elle tient, dit-il, au fait que « par le mot d'*expérience*, nous nous référons à une situation où nous pouvons dire à d'autres hommes ce que nous avons fait et ce que nous avons appris ». Et il va jusqu'à affirmer que les concepts classiques resteront *toujours* indispensables pour le physicien. Comment dire « toujours » dans un domaine qui vient de vivre une révolution si profonde : cela ne revient-il pas à affirmer bien imprudemment qu'elle sera la dernière ? Non, car la nécessité des concepts classiques n'est pas fondée sur des lois physiques mais sur l'analyse du sujet de la connaissance. Celui-ci — l'être humain impliqué dans un réseau de rapports avec autrui — ne joue donc pas un rôle purement passif : il dispose d'une marge de liberté dans le choix de ses concepts. Notre étude des phénomènes physiques ne

peut donc plus être considérée, comme les physiiciens le croient après Galilée, comme une simple lecture du livre de l'univers. Les concepts physiques mathématisés ne sont pas présents dans la nature : nous les élaborons dans notre effort pour comprendre les phénomènes.

Poser la pérennité des concepts classiques, c'est d'abord reconnaître qu'ils demeurent valables, à une bonne approximation, pour les processus qui mettent en jeu des actions très supérieures à h . La connaissance physique est donc par essence *approximative et régionale*. Quand il étudie des phénomènes concrets – passage des particules chargées à travers la matière, réactions nucléaires, fission... – Bohr combine les concepts et les images classiques avec les lois quantiques. Les progrès de la mécanique quantique n'ont pas rendu obsolètes les approches de ce type ; elles sont au contraire en plein développement, sous le nom de *théories semi-classiques*. Ces théories approchées sont souvent accessibles là où un calcul « rigoureux », strictement quantique, est impraticable ; elles ont aussi l'avantage d'être plus intelligibles, parce qu'elles font voir ce qui se passe.

Bohr a explicité sa conception de la connaissance physique en quelques mots, transmis par son assistant A. Petersen : « Il est faux de croire que la tâche de la physique est de dire comment est la nature. La physique concerne ce que nous pouvons dire sur la nature. » En remettant en question les principes métaphysiques qui, depuis quelque trois siècles, présidaient au développement de la physique, Bohr a indiqué la direction d'une science qui surmonterait enfin les préjugés scientistes. La voie est ouverte, mais qui s'y engagera ?

● Niels Bohr. *Collected Works*, 10 vol., Elsevier, Amsterdam, 1972-1999 ; *La théorie atomique et la description des phénomènes*, Gauthier-Villars, 1932, rééd. Sceaux, Éditions Jacques Gabay, 1993 ; *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard, « Folio Essais », 1993.

► LURCAT F., *Niels Bohr et la physique quantique*, Paris, Seuil, « Points Sciences », 2001. – PAIS A., *Niels Bohr's times, in physics, philosophy, and polity*, Oxford, Clarendon Press, 1991.

François LURCAT

→ Complémentarité ; Controverse Bohr-Einstein ; Déterminisme ; Mesure en mécanique quantique ; Observable ; Quantique.

BONNET Charles, 1720-1793

Naturaliste genevois, Charles Bonnet était partisan de l'ovisme et de la préformation. Il niait ainsi l'existence des « animaux spermatisés » ou « globules » (Buffon) et refusait l'épigénèse présupposant la négation de la passivité de la matière et l'affirmation de sa spontanéité, prémisse de la mise entre parenthèses de l'activité divine créatrice. Sa défense de la théorie de la

génération par les germes préexistants emboîtés ou dissemés, dans ses *Considérations sur les Corps organisés* (1762), le conduisit à se ranger parmi les adversaires de la nouvelle science représentée par Buffon et Needham. Néanmoins, tout en demeurant résolument préformationniste, Bonnet en vint à attribuer une signification plus large à la notion de germe, accordant désormais au développement, jusqu'alors considéré comme une simple extension des parties, un rôle important et une liberté réelle. Le germe cessait ainsi d'être conçu comme corps organisé en miniature pour être défini en termes de « préordination ou [de] préformation de parties capables par elle-même de déterminer l'existence d'une Plante ou d'un Animal » (*Préface de la Contemplation de la nature*, 1764). L'immutabilité ne pouvait plus être considérée comme étant l'attribut essentiel de l'univers créé. Tout en sachant distinguer sur le plan de la méthode les aspects scientifique et philosophique de son œuvre, Bonnet aspirait à la constitution d'un système unifié tant sur le plan du contenu que de l'architecture conceptuelle de celle-ci (M. Buscaglia), ainsi qu'en témoigne son emprunt du concept de « chaîne des êtres » à la pensée de Leibniz. Concept dont Lamarck réinvestira la signification.

● *Traité d'insectologie*, 1745. – *Essai de psychologie*, Leyde, 1754. – *Recherches sur l'usage des feuilles dans les plantes*, 1754. – *Essai analytique sur les facultés de l'âme*, Copenhague, 1760. – *Considérations sur les corps organisés*, Amsterdam, 1762. – *Contemplation de la nature*, Amsterdam, 2 vol., 1764. – *La palingénésie philosophique*, Genève, 2 vol., 1769. – *Recherches philosophiques sur les preuves du christianisme*, Genève, 1771. – *Œuvres d'histoire naturelle et de philosophie*, Neuchâtel, 1779-1783.

► CARAMAN R. DE, *Ch. Bonnet, philosophe et naturaliste, sa vie et ses œuvres*, 1859. – ROGER J., *Les sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e siècle*, Paris, A. Colin, 1963. – ROSTAND J., *Esquisse d'une histoire de la biologie : Un préformationniste*. – *Ch. Bonnet*, Paris, 1945, p. 65-80. – Coll. : *Charles Bonnet savant et philosophe (1720-1793)*, éd. M. Buscaglia, R. Sigris, J. Trembley & J. Wüest, Actes du Colloque international de 1959, Genève, 1994. – *Dictionary of scientific Biography*, éd. P.E. Pilt, New York, 1970, t. II, p. 286-287.

Éric HAMRAOUI

→ Développement ; Évolutionnisme ; Gène ; Génération spontanée ; Lamarck ; Nature (Système de la).

BOREL Émile, 1871-1956

Mathématicien et homme politique français. À partir d'une contribution majeure au problème de la mesure, Borel propulse le calcul des probabilités au cœur de l'édifice des mathématiques. Il remplace la conception positiviste de la mesure conçue comme une graduation pragmatique par une définition précise. Puis, il s'aperçoit que la probabilité est un cas particulier de cette définition rigoureuse de la mesure, et non pas comme le suppose Hilbert, une notion empirique.

Nj intuitionniste ni formaliste, Borel est le premier à signaler les paradoxes issus de l'axiome de choix. Son antiformalisme n'empêche pas une fertilité mathématique étourdissante, ouvrant les brèches pour le XX^e s. avec les moyens des mathématiques du XIX^e. Borel apporte les procédés élémentaires des mathématiques contemporaines, ceux de recouvrement fini, d'usage de séries divergentes, d'ensembles de mesure nulle, et de probabilité dénombrable. Il partage avec Lebesgue la fondation de la théorie moderne de l'intégration, et avec von Neumann celle de la théorie des jeux.

La prudence est fille de mesures : les probabilités permettent de formuler une sagesse pratique. Aussi, habile organisateur, courageux face aux périls nationalistes, Borel a témoigné par sa vie de la valeur pratique des mathématiques.

► CALLENS S., *Les Maîtres de l'Erreur*, Paris, PUF, 1997. – KRÜGER L., DASTON L.J. & HEIDELBERGER M. éd., *The Probabilistic Revolution*, vol. I, Cambridge, MIT Press, 1987.

Stéphane CALLENS

→ Maîtrise de l'erreur ; Probabilité.

BOURBAKI

Du point de vue légal, Bourbaki est « l'association des collaborateurs de Nicolas Bourbaki ». Cette association à but non lucratif, sous le régime de la loi de 1901, a son siège social au 45 rue d'Ulm, aux termes d'une convention passée avec l'École normale supérieure. Son but est double : la publication d'une série d'ouvrages et la tenue d'un séminaire. Les ouvrages forment deux séries, publiées et distribuées par les éditions Masson. *Les Éléments de Mathématique* comprennent 18 volumes disponibles et 7 volumes épuisés ; *Les Éléments d'Histoire des mathématiques* forment un volume (disponible). De nombreuses traductions existent. Le Séminaire, qui se tient régulièrement depuis 1948, a donné lieu à 819 exposés publiés ; ils forment 25 volumes publiés par la Société mathématique de France, et 13 volumes dans la série « *Lecture Notes in Mathematics* » des éditions Springer.

L'œuvre principale de Bourbaki est le traité *Éléments de Mathématiques*. L'ambition initiale était d'écrire un ouvrage encyclopédique, donnant les fondations de l'ensemble des mathématiques classiques et modernes ; elle s'appuyait sur une méthode, l'axiomatique, au service d'une idéologie, celle des structures.

Selon ses propres termes, « le traité prend les mathématiques à leur début et donne des démonstrations complètes ». Ceci impose un plan rigoureux. Le traité se compose actuellement de neuf livres : *Théorie des ensembles*, 1 vol. ; *Algèbre*, 3 vol. ; *Topologie générale*, 2 vol. ; *Fonctions d'une variable réelle*, 1 vol. ; *Espaces vectoriels topologiques*, 1 vol. ; *Intégration*, 1 vol. ; *Algèbre commutative*, 3 vol. ; *Groupes et algèbres de Lie*, 5 vol. ; *Variétés différentielles et*

analytiques, 1 vol. Il faut y ajouter le début d'une série inachevée consacrée aux théories spectrales et trois répertoires appelés « fascicules de résultats » qui ont cessé d'être diffusés.

Les Éléments d'histoire des mathématiques ne sont que la reprise en un volume de diverses notes historiques accompagnant les chapitres du traité. Ces neuf livres forment un ensemble assez hétérogène, malgré une profonde unité de style et de rédaction. Les cinq premiers constituent une « nouvelle édition » publiée entre 1970 et 1981. Il s'agit d'une refonte profonde et d'une harmonisation des volumes anciens ; elle est presque complète, car seules manquent les révisions des chapitres consacrés aux algèbres semi-simples et aux formes quadratiques. Le sixième livre décrit la version de Bourbaki de l'intégrale de Lebesgue. Il s'agit d'une mécanique de précision, fort bien composée, mais qui malheureusement est obérée par le parti pris de se limiter aux espaces localement compacts. Bourbaki a pris la décision – fâcheuse – de ne plus diffuser ce livre, à l'exception d'un petit volume écrit après coup et qui tente de raccrocher le calcul des probabilités à la théorie exposée. Ces six premiers livres constituent le fondement sur lequel tout le reste est établi : en particulier les livres 3 à 6 décrivent l'Analyse telle que conçue par Bourbaki, avec un fort biais en faveur de l'Analyse fonctionnelle. Les livres 7 et 8 ont été publiés entre 1960 et 1975. Ils sont encore aujourd'hui des ouvrages de référence pour l'algèbre commutative et les groupes de Lie. Ils s'arrêtent aux portes de la géométrie, tout en fournissant toutes les bases requises pour la géométrie algébrique ou les espaces de groupes. Enfin, le dernier livre sur la géométrie différentielle sert de soubassement aux groupes de Lie. Seul un résumé substantiel, sans démonstrations mais avec des définitions et des constructions très précises, a été publié.

On peut distinguer trois périodes principales dans l'activité de Bourbaki. 1) L'époque héroïque (1935-1950) : D'un groupe de « jeunes Turcs » décidés à établir l'enseignement universitaire des mathématiques sur des bases enfin rigoureuses émergent quatre personnalités exceptionnelles : Henri Cartan (né en 1903), Claude Chevalley (1909-1984), Jean Dieudonné (1906-1992) et André Weil (né en 1906). Bourbaki invente sa méthode de travail : une écriture collective soumise à une critique mutuelle sans concession, et une publication anonyme. S'appuyant sur un solide résumé de la théorie des ensembles paru en 1939, les six premiers livres prennent forme, malgré le handicap des années de guerre (1940-1945) qui provoquent la dispersion du groupe (entre la France et les États-Unis d'Amérique).

2) Les vingt glorieuses (1950-1970) : la méthode est au point, les six premiers livres s'achèvent rapidement. Grâce à une constellation de talents exceptionnels (dont trois médailles Fields : Schwartz, 1950 ; Serre, 1954 ; Grothendieck, 1966) et à la collaboration des meilleurs spécialistes de géométrie algébrique et des groupes de Lie, la « deuxième partie » de Bourbaki

(livres 7 à 9) se constitue en moins de quinze ans, et devient la référence incontournable. Bourbaki domine toute la vie mathématique française, dont c'est un âge d'or. Cartan, Dieudonné et Schwartz bataillent avec succès pour la rénovation du contenu de l'enseignement universitaire des mathématiques. La bataille est gagnée à Paris vers 1957-1958, et quelques années plus tard en province, grâce à l'envoi d'une cohorte de disciples enthousiastes. Les séminaires de Cartan et Bourbaki (à partir de 1948), puis de Schwartz (après 1953), Chevalley (à partir de 1956) et de Grothendieck (dès la fondation de l'IHES en 1958) sont les creusets où toute une génération de mathématiciens apprend son métier. Bourbaki est devenu un pilier de l'*establishment* ; il domine la Sorbonne, le Collège de France, le CNRS, l'École normale supérieure, l'École polytechnique, et commence à investir l'Académie des sciences malgré ses sarcasmes antérieurs. Le mouvement dit des « mathématiques modernes » essaie d'imposer un style axiomatique et abstrait dans l'enseignement élémentaire et secondaire. Les excès et les imprudences de certains thuriféraires trop zélés provoqueront un discrédit, dont souffrira la réputation de Bourbaki.

3) Un lent déclin (après 1975) : il a de nombreuses causes. Le départ des pionniers a tari le souffle messianique du début ; c'est le jeu naturel des générations. Les objectifs initiaux ont été atteints : on dispose d'une imposante encyclopédie des mathématiques, et la méthode est suffisamment connue pour que des imitateurs traitent des sujets non couverts par les *Éléments*. À la suite d'un long procès, Bourbaki a dû changer d'éditeur. Lorsque la publication reprend, après une interruption de 1975 à 1980, Bourbaki lance ses derniers feux (5 vol. neufs ou refondus) : puis c'est un silence complet. Il faut ajouter les contraintes de rédaction imposées par un cadre très rigide. Il y a fort à parier que les membres actuels de l'Association, cooptés longtemps après le début de l'entreprise, ne connaissent intimement qu'une petite partie du dinosaure et sont intimidés à l'idée de troubler l'architecture d'un monument si imposant.

Enfin, *last but not least* et pour paraphraser Valéry : « Nous autres, institutions, savons que nous sommes mortelles. » Si la machine institutionnelle de l'Association continue à tourner (très au ralenti), Bourbaki s'est tu. L'ambition du Séminaire s'est restreinte : une quinzaine de (bons) exposés de synthèse sur divers problèmes d'algèbre et de géométrie sont publiés chaque année, mais l'influence des membres de l'Association est très peu sensible. Les mathématiques vivantes se font ailleurs, dans un monde bouleversé par la destruction du mur de Berlin, le rapprochement de la physique et des mathématiques et l'invasion des ordinateurs.

► BEAULIEU L., *Bourbaki, une histoire du groupe de mathématiciens français et de ses travaux*, Univ. de Montréal, 1989 (thèse). — BOREL A., *Twenty-six years with Nicolas Bourbaki, 1949-1973. Notices American math. Society*, mars 1998, vol. 45, n° 3. — CHOUGHAN M., *Nicolas Bourbaki, Faits et légendes*, Argenteuil, Le Choix, 1995. — ROUBAUD J., *Mathématique : récit*, Paris, Le Seuil, 1995. — WEIL A., *Organisation et*

désorganisation en mathématiques, in *Œuvres scientifiques*, II, Springer, 1979.

Pierre CARTIER

→ Analyse fonctionnelle ; Ensemble ; Formalisme ; Structure.

BRAHÉ Tycho, 1546-1601

Le plus grand astronome de la fin du XVI^e s. et certainement l'un des plus grands astronomes observateurs à l'œil nu de l'histoire. Il fut l'auteur de grands bouleversements dans les techniques de l'observation et dans les normes de précision exigées par l'astronomie. Il a construit un grand nombre d'instruments nouveaux, plus grands, plus stables. Il corrigea avec une ingéniosité sans pareille de nombreuses erreurs dues à l'utilisation des instruments. Il fut le premier à faire des observations des planètes dans leur course et non seulement dans des configurations favorables. Brahé sortit l'astronomie européenne de sa dépendance à l'égard des données anciennes et élimina de ce fait nombre de faux problèmes suscités par ces données comme en fut victime l'astronomie copernicienne.

Il élabora un système qui remplaça celui de Ptolémée et rallia les astronomes qui, pour des raisons physiques et observationnelles, ne pouvaient admettre le mouvement de la Terre. Il a mis l'accent sur l'espace immense que la théorie copernicienne est obligée d'admettre entre la sphère de Saturne et celle des fixes. Il met donc au point un système tychonien qui suppose la Terre au centre du monde immobile et les planètes en rotation autour du Soleil lui-même en rotation autour de la Terre. Remarquable compromis, il réconcilie les Écritures et les lois du mouvement. L'apport de Tycho le plus important est l'observation et la localisation d'une nouvelle étoile apparue en 1572 et disparue en 1574. Elle est le point de départ d'une nouvelle cosmologie puisqu'elle remet en cause l'immutabilité du ciel base de la cosmologie antique. Tycho observa encore des comètes en 1577, 1580, 1585, 1590, 1593 et 1596. Les comètes furent situées au-delà de la sphère lunaire à l'intérieur de laquelle Copernic les voyait encore. Comme les comètes sont observées traverser les trajectoires des planètes que l'on croyait sous-tendues par des sphères solides, Tycho doit être considéré comme l'un de ceux qui a largement contribué à faire disparaître ces sphères solides de la cosmologie.

● *Tycho Brahe's Description of his Instruments and Scientific World as given Astronomiae Instaurate Mechanicae*, éd. H. Reiche, E. & B. Strömberg, Copenhague, 1946. — *Tycho's Brahe Dani opera omnia*, éd. J.L.E. Dreyer, Copenhague, 15 vol., 1913-1929.

► BERNHARDT J., « Copernic, Tycho, Bradley », *Revue de l'enseignement philosophique*, n° 6, 1975. — DREYER J., *Tycho Brahe. A picture of Scientific Life and Work in sixteenth century*, Édimbourg, repr. New York, 1963.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Comète ; Héliocentrisme.

BRICOLAGE

Charles Darwin utilisa le premier le terme de bricolage pour désigner l'« action » de l'évolution. Son usage passa inaperçu et c'est à François Jacob que revient le mérite d'avoir « réinventé » ce terme et de l'avoir, d'une certaine manière, popularisé.

C'est par l'étude au niveau moléculaire des changements évolutifs des êtres vivants que F. Jacob fut amené à décrire l'évolution comme un bricoleur. Au lieu d'inventer de nouvelles protéines pour assurer de nouvelles fonctions, l'évolution utilise des protéines déjà existantes et en détourne la fonction originelle. Plus souvent, c'est en regroupant plusieurs protéines ou fragments protéiques que l'évolution invente de nouvelles fonctions moléculaires. C'est aussi en combinant et en réassortissant des structures élémentaires qu'elle crée des structures régulatrices complexes ou modifie le programme génétique de développement. Ainsi, l'évolution crée la nouveauté en combinant, de manière originale, des éléments préexistants et non en créant de nouveaux éléments.

Parler de bricolage pour désigner les inventions de l'évolution, c'est insister sur le rôle du hasard et de la contingence. Là où un ingénieur ferait un plan pré-établi pour synthétiser un organe et assurer sa fonction, l'évolution utilise les structures anatomiques préexistantes et les organes ayant déjà d'autres fonctions. Celles-ci vont être détournées pour répondre aux nouveaux besoins. Seuls les arrangements efficaces supporteront le crible de la sélection naturelle.

La métaphore du bricolage est séduisante. Elle fournit une explication pour l'apparition de la nouveauté au cours de l'évolution et résout ainsi une des difficultés majeures de la théorie néodarwinienne. Elle souligne les limites de l'adaptation des structures du vivant à la fonction visée et explique ainsi les imperfections du monde vivant. Elle magnifie le rôle du hasard et de l'histoire. Elle dessine les limites du « jeu des possibles » évolutif.

Elle a cependant une double faiblesse. D'une part, elle valorise indûment la distance qui sépare le travail du bricoleur de celui de l'ingénieur. Bricoleur et ingénieur ont tous deux un projet. Et si le bricoleur cherche à réaliser ce projet avec les outils qu'il a sous la main, l'ingénieur est lui aussi prisonnier de ce qui existe, des objets qu'il a déjà construits. À l'opposé, contrairement au bricoleur et à l'ingénieur, l'évolution est aveugle. Elle n'a pas de projets, ne vise aucun but : spécificité du travail de l'évolution dont la métaphore du bricolage ne rend pas du tout compte.

La métaphore du bricolage a eu un effet boomerang. Utilisée pour décrire le processus évolutif, elle est en retour fort bien adaptée pour représenter le travail scientifique. F. Jacob avait déjà vu l'effet miroir de cette métaphore. Plusieurs historiens des sciences l'ont emprunté à F. Jacob ou à Claude Lévi-Strauss pour décrire deux caractéristiques de la démarche scientifique : l'absence d'intentionnalité — le scientifique ne

connaît pas la théorie qu'il va élaborer — et l'importance du contexte local — ce qui, instruments, modèles, concepts, existe dans l'environnement du chercheur et que celui-ci va intégrer à la théorie ou au nouveau modèle qu'il élabore. La métaphore du bricolage est en accord avec une conception relativiste de la connaissance scientifique.

Aussi bien dans la description qu'elle permet du processus évolutif que dans celle du travail scientifique, la métaphore du bricolage a l'avantage — la force — d'occulter une question essentielle : celle de l'importance des matériaux, avec lesquels l'évolution ou le scientifique joue. Quelle est l'influence de la nature de ces matériaux sur l'œuvre réalisée ? Dans quelle mesure le produit final que l'évolution ou le scientifique élabore est-il déjà contenu dans « ce » qui lui a donné naissance ? Quel est le poids des contraintes qui est introduit par le choix des matériaux avec lesquels le travail de bricolage s'opère ?

► DARWIN Ch., *The various contrivances by which orchids are fertilized by insects*, New York, D. Appleton, 1886. — JACOB F., « Evolution and Tinkering », *Science*, vol. 196, 1977, p. 1161-1166 ; *Le jeu des possibles*, Paris, Fayard, 1981 ; « Du répresseur à l'agrégulat », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, vol. 316, 1993, p. 331-333 ; *La souris, la mouche et l'homme*, Paris, Odile Jacob, 1997. — KNORR-CETINA K.D., *The manufacture of knowledge : an essay on the constructivist and contextual nature of science*, Oxford, Pergamon Press, 1981, p. 34. — LYNCH M. & WOOLGAR S., *Representation in scientific practice*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1988, p. 8. — SERRES M., *Éléments d'Histoire des Sciences*, Paris, Bordas, 1989, p. 1-15.

Michel MURANGE

→ Darwinisme ; Développement ; Évolutionnisme ; Jacob.

BRIGGS Henry, 1561-1630

Henry Briggs est un professeur de géométrie anglais. Il enseigne dans un collège de Londres à partir de 1596 puis à Oxford en 1620. Ses travaux portent sur la géométrie, la navigation et l'astronomie. Sa principale contribution aux mathématiques vient toutefois de ses travaux sur les logarithmes. Dès la publication en 1614 du *Mirifici logarithmorum canonis descriptio* de John Napier, Briggs dirige ses travaux dans cette direction, et part rencontrer Napier à Édimbourg. Ils engagent une réflexion sur des modifications et améliorations des tables des logarithmes. La mauvaise santé puis la mort de Napier fera de Briggs le continuateur et le principal diffuseur des idées du mathématicien écossais.

Les modifications auxquelles finit par aboutir Briggs dans *Arithmetica logarithmica* de 1624 portent sur la simplification de la théorie et des calculs des logarithmes. Ceux-ci, sans perdre aucune de leurs propriétés — et en particulier la fondamentale $\log a.b = \log a + \log b$ —, peuvent être construits sur une infinité de bases numériques. Briggs, à la suggestion de Napier,

choisit de prendre le rayon ou *sinus totius* égal à 10^{10} – déterminant la précision des calculs –, $\log 1 = 0$ et $\log 10 = 1$ – facilitant les calculs et l'utilisation. Il calcule les logarithmes décimaux des 25 premiers nombres premiers, puis par généralisation et interpolation, compose une table des logarithmes décimaux des entiers entre 1 et 20 000 et entre 90 000 et 100 000. Le Belge Adrian Vlacq complétera sur les mêmes bases quelques années plus tard le travail de Briggs.

● *Arithmetica logarithmica*, Londres, 1624.

► NAUX C., *Histoire des logarithmes de Neper à Euler*, Paris, Blanchard, 2 t., 1966-1971.

Jean-Pierre SUTTO

→ Extension.

BRUNO Giordano, 1548-1600

Le 17 février 1600, Giordano Bruno meurt sur le bûcher de l'Inquisition dressé à Rome sur la Campo dei Fiori. Il vient de subir sept ans d'emprisonnement et de tortures pour avoir refusé d'abjurer ses doctrines « hérétiques ». Né à Nola, dans le Sud de l'Italie, il avait rejoint en 1565, à l'âge de dix-sept ans, le couvent des dominicains à Naples. Une nuit de février 1576, il s'enfuit. Sa vie ne sera plus qu'une longue errance à travers l'Europe. À Genève, il s'oppose aux calvinistes qui l'excommunient. En Angleterre, il scandalise les docteurs d'Oxford et suscite l'hostilité des puritains. Il est excommunié une nouvelle fois par les luthériens allemands. Rattrapé à Venise par l'Inquisition, il y est arrêté le 19 février 1593.

Giordano Bruno est assurément l'un des philosophes les plus puissants du XVI^e s. Poète, peintre, magicien, homme politique, il a marqué l'histoire de la naissance de la science moderne. Ayant adopté le système héliocentrique de Copernic, il en déploie les implications infinistes bien au-delà de ce qu'avait admis l'astronomie polonaise et même de ce qu'admettra encore Johannes Kepler. Contre la vision médiévale d'un Cosmos ordonné et fini, il avance en effet l'intuition d'un « univers infini » immense et non dénombrable, peuplé d'une infinité de « mondes » semblables au nôtre. Il exprime cette intuition dès 1584 dans *De l'infini universo e mondi*. Il en prêche littéralement le bien-fondé à travers toute l'Europe dans une langue enflammée.

Sa *Cena de le ceneri* donne, en 1584 également, un exposé brillant et argumenté de l'astronomie copernicienne qu'il « complète » et rectifie par la physique de l'*impetus*. Il y rejette les arguments classiques contre le mouvement de la Terre. Ces arguments négligent le fait que l'air environnant de la Terre serait entraîné par elle si elle tournait. « Toutes choses qui se trouvent sur la Terre se meuvent avec celle-ci », et se meuvent par rapport à la Terre, comme si elle était en repos.

Bruno établit une analogie entre le mouvement de la Terre et celui d'un navire glissant sur la surface des eaux. Le mouvement du navire ne produit aucun effet sur les mouvements des choses qui se trouvent à bord.

Ce sont les bases de la physique aristotélicienne qu'il met ainsi en question : la distinction des corps par nature lourds et légers, l'existence de lieux naturels et de mouvements naturels... Dans l'univers positivement infini de Bruno, il ne peut y avoir ni lieux privilégiés ni directions absolues. Les notions de « haut » et de « bas » sont relatives. La notion de « centre du monde » (où Copernic situait le Soleil) n'a plus aucun sens. Le Soleil perd ainsi à son tour sa place. Il n'est plus qu'une étoile parmi les autres étoiles, lesquelles sont des Soleils semblables au nôtre.

Bruno participe ainsi de façon décisive au travail de démantèlement de la physique et de la cosmologie aristotélicienne. Galilée, Descartes, Newton bénéficieront de son combat, sans trop oser le reconnaître.

● Trad. fr. : *Le banquet des cendres*, trad. partielle, Paris, Gauthier-Villards, 1965 (nouv. trad. Paris, L'Éclat, 1988). – *Cause, principe et unité*, Paris, Alcan, 1930. – *Des fureurs héroïques*, Paris, Les Belles Lettres, 1954. – *Le candelajo*, Paris, Point hors ligne, 1986. – *L'infini. L'univers et les mondes*, Paris, Berg International, 1987. – *L'expulsion de la bête triomphante*, Paris, Michel de Maulé, 1992. – *La cabale du cheval de Pégase*, Paris, Michel de Maulé, 1992.

► ECO U., « Giordano Bruno : combinatoire et mondes infinis », *La recherche de la langue parfaite dans la culture européenne*, Paris, Le Seuil, Paris, 1994. – KOYRÉ A., *Du monde clos à l'univers infini*, Paris, Gallimard, 1966. – LEVERGEIS B., *Giordano Bruno*, Paris, Fayard, 1995. – MONNOYEUR F. éd., *Infini des mathématiques. Infini des philosophes*, Paris, Belin, 1992. – ROCCHI J., *L'errance et l'hérésie ou le destin de Giordano Bruno*, Paris, F. Bourin, 1989. – YATES F.A., *L'art de la mémoire*, Paris, Gallimard, 1975 ; *Giordano Bruno et la tradition hermétique*, Paris, Dervy, 1988.

Dominique LECOURT

→ Causalité classique ; Copernic ; Héliocentrisme ; Impetus ; Infini ; Kepler ; Mouvement.

BRUNSCHVICG Léon, 1869-1944

Né à Paris le 10 novembre 1869, Léon Brunschvicg a exercé une influence considérable sur la philosophie française du XX^e s. avant la Seconde Guerre mondiale. Son enseignement à la Sorbonne de 1909 à 1939, sa longue présidence du jury de l'agrégation de philosophie, ses interventions dans la *Revue de métaphysique et de morale* qu'il a fondée avec Xavier Léon, lui ont assuré une position institutionnelle sans égale en son temps. L'arrivée des Allemands à Paris en juin 1940 le contraignit à se réfugier dans le Sud de la France, puis à Aix-les-Bains, où il mourut le 18 janvier 1944.

Sa grande thèse sur *La modalité du jugement* (1897) définit la philosophie comme connaissance de la

connaissance, l'activité intellectuelle prenant conscience d'elle-même. Cette activité étant essentiellement jugement. La science exprimant l'effort continu de l'esprit dans la recherche de lui-même, la philosophie est avant tout théorie de la connaissance.

Les trois livres les plus importants de Léon Brunschvicg visent à décrire la réalité de l'esprit tel qu'il s'exerce dans le jugement : *Les étapes de la philosophie mathématique* (1912), *L'expérience humaine et la causalité physique* (1922), *Le progrès de la conscience dans la philosophie occidentale* (1927).

Brunschvicg met l'accent sur le dynamisme de la pensée scientifique, un dynamisme qui surmonte l'opposition de l'idéalisme et du positivisme. La science est hypothèse et formulation mathématiques des lois du réel. Elle manifeste l'initiative de l'esprit, lequel ne connaît aucune limite à son propre développement.

Gaston Bachelard, dont Léon Brunschvicg fut le directeur de thèse, sera sur ce point dans ses premiers textes son disciple, avant de prendre ses distances par rapport au spiritualisme de son maître.

● *La modalité du jugement*, Paris, Alcan, 1897. – *Introduction à la vie de l'esprit*, Paris, Alcan, 1900. – *L'idéalisme contemporain*, Paris, Alcan, 1905. – *Les étapes de la philosophie mathématique*, Paris, Alcan, 1912. – *Nature et liberté*, Paris, Flammarion, 1921. – *L'expérience humaine et la causalité physique*, Paris, Alcan, 1922. – *Le progrès de la conscience dans la philosophie occidentale*, Paris, Alcan, 1927. – *De la connaissance de soi*, Paris, Alcan, 1931. – *La physique du XIX^e siècle et la philosophie*, Paris, Hermann, 1936. – *La philosophie de l'esprit*, Paris, PUF, 1949. – *Écrits philosophiques*, Paris, PUF, 3 vol., 1951-1958. – *Les philosophes et la science*, sous la direction de P. Wagner, Paris, Gallimard, 2002.

► DESCHOUX M., *La philosophie de Léon Brunschvicg*, Paris, PUF, 1949.

Dominique LECOURT

→ Bachelard ; Découverte ; Idéalisme ; Positivisme.

BUFFON, 1707-1788

Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, naquit à Montbard le 7 novembre 1707. Nommé intendant du Jardin du Roi – où il mourra le 10 avril 1788 –, il vécut en grand seigneur et devint membre de toutes les académies européennes, tout en travaillant jusqu'à douze heures par jour à satisfaire ses curiosités scientifiques. Celles-ci le portèrent vers trois domaines des sciences naturelles, la géologie (*Théorie de la Terre*, 1749), la biologie générale (*Les époques de la nature*, 1779) et la zoologie (*Histoire générale des animaux*, 1749). Buffon n'a pas rédigé seul les 36 volumes de sa monumentale *Histoire naturelle* (1749-1788), mais tous portent la marque de sa pensée et de son style. Les mérites littéraires et scientifiques de ses minutieuses descriptions d'animaux sont bien connus, ainsi que les efforts du grand naturaliste pour imposer une attitude

scientifique en matière d'estimation de l'âge de la Terre. Le débat contemporain porte sur le transformisme, réel ou supposé, de Buffon. Dès le premier volume de son *Histoire des Quadrupèdes* (1753), Buffon pose le problème de l'origine des espèces. Mais c'est surtout le fameux chapitre sur la « Dégénération des Animaux » (1766) qui a accredité la thèse, soutenue par Jean Rostand, d'un Buffon adepte d'un « transformisme limité ». Il admet que des espèces voisines et peu différentes entre elles sont issues, par dégénération, d'une souche principale et commune. Toutefois ces variations n'affectent pas les caractères biologiques essentiels, et Buffon, comme le souligne Jacques Roger, n'acceptera jamais l'hypothèse transformiste présentée par Maupertuis en 1751. Patrick Tort retient cette dernière approche, et constatant l'absence, chez Buffon, d'une théorie du passage interspécifique, il refuse de le qualifier de transformiste.

► JACOB F., *La logique du vivant. Une histoire d'hérédité*, Paris, Gallimard, 1970. – MAYR E., *The growth of biological thought. Diversity, Evolution and Inheritance*, Harvard Univ. Press, 1982. – ROGER J., *Buffon : un philosophe au Jardin du Roi*, Paris, Fayard, 1989. – ROSTAND J., *Esquisse d'une histoire de la biologie*, Paris, Gallimard, 1945. – TORT P., « Buffon », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996.

Jean Paul THOMAS

→ Biogéographie ; Écologie ; Espèce ; Fossile ; Hybride ; Origines de la vie ; Philogénétique ; Taxinomie ; Terre ; Vivant (Théorie du).

BUNGE Mario, né en 1919

Professeur argentin de physique théorique et de philosophie des sciences à l'université de Buenos Aires puis à l'université Mac Gill de Montréal, M. Bunge cherche, à travers son enseignement et ses nombreuses publications, à élaborer une « nouvelle philosophie de la physique » en prise sur la pratique réelle de la recherche. « Credo du physicien naïf », l'opérationalisme, qui consiste à poser que la physique concerne les seules opérations de mesures et de calculs, constitue une « fausse philosophie de la physique » que les philosophes traditionnelles sont impuissantes à entraver en raison de leur incapacité foncière à produire une analyse adéquate de la physique. S'intéressant davantage au langage de la science qu'à la science telle qu'elle se fait, les travaux issus du Cercle de Vienne ne peuvent davantage lever le rideau de fumée qui recouvre sa pratique. Qualifiée à l'occasion de « scientifique » par son auteur, la nouvelle philosophie qu'il entend promouvoir doit « à la fois aider la physique à produire sa propre critique et explorer de nouveaux domaines et de nouvelles méthodes ».

La logique mathématique constituant à ses yeux l'ontologie de la science, M. Bunge lui accorde un

intérêt tout particulier et développe un travail d'axiomatisation des théories physiques, principalement de la mécanique quantique. Ce qui le conduit à développer une métaphysique « exacte » ou encore une « proto-physique » qui est à la physique ce que la théorie des ensembles est au calcul.

– *Scientific Research*, New York, Springer Verlag, 2 vol., 1967.
– *Philosophy of Physics*, Dordrecht, Reidel, 1973 (trad. fr., *Philosophie de la physique*, Paris, Le Seuil, 1975). – *The Mind Body Problem*, Oxford, Pergamon, 1980. – *Scientific Materialism*, Dordrecht, Reidel, 1981.

François BOITUZAT

→ Continuité ; Opérationnalisme.

• *Foundations of Physics*, New York, Springer Verlag, 1967.

C

CANGUILHEM Georges, 1904-1995

Dès les premières pages de sa thèse de médecine sur *Le normal et le pathologique*, en 1943, l'unité de l'œuvre de Georges Canguilhem s'affirme. Son style propre se rassemble autour de deux propositions : pour la réflexion philosophique, écrit-il, « toute matière étrangère est bonne » ; l'exigence propre à la pensée philosophique consiste à « rouvrir les problèmes plutôt que de les clore ». Pour Canguilhem on ne peut philosopher que sur quelque chose, mais ce peut être sur l'usage du stéthoscope, sur l'attelage des chevaux au Moyen Âge ou encore sur une page de Flaubert aussi bien que sur un passage du *Discours de la méthode*. Il a ainsi ouvert à la réflexion philosophique en France des pistes qui n'y étaient guère fréquentées il y a un demi-siècle, à un moment où le devant de la scène se trouvait occupé par l'existentialisme, la phénoménologie, le marxisme et le spiritualisme. Il a exhumé des textes appartenant à l'histoire de la médecine, de la biologie, des sciences et des techniques dans l'examen desquels se sont engagés des chercheurs d'un type inédit qui ont depuis fait leurs preuves.

Sans jamais se croire nulle part chez elle, dira-t-il plus tard en substance, la philosophie a le devoir de se montrer partout indiscrète. Que révélera-t-elle ? Elle montrera que les problèmes résolus ne peuvent être déclarés « clos » sans que l'on risque de perdre le sens de la solution qui leur a été apportée, comme le sens de la question qui les a ouverts. Elle fera apparaître qu'à cette perte de sens bien des forces conspirent contre lesquelles il faut inlassablement appeler à la vigilance et à l'effort. De cette vigilance, Canguilhem n'a jamais cru pouvoir trouver les ressorts – pas plus que les instruments de cet effort – dans les théories philosophiques de la connaissance existantes ou dans leurs avatars épistémologiques contemporains, car, note-t-il, « c'est un des traits de toute philosophie préoccupée du problème de la connaissance que l'attention qu'on y donne aux opérations du connaître entraîne la distraction à l'égard du sens du connaître ».

Il se tourne vers la pratique médicale et vers les sciences du vivant. La première impose à sa réflexion un réexamen des notions de « norme », de « normalité » et de « normativité ». À contre-courant du positivisme dominant qui célèbre la médecine moderne comme une science, il établit que le normal est toujours

second par rapport à l'écart ; il montre que toute conception objectiviste de la norme comme moyenne statistiquement établie repose sur une confusion qui fait perdre, à des fins conformistes, le sens même de l'établissement des normes ; il rappelle que la thérapeutique ne saurait se présenter comme simple application d'un savoir physiologique préalablement donné. La médecine reste un art, un « art au carrefour de plusieurs sciences », selon le mot qu'il emprunte à Leriche et elle suppose toujours en définitive à son principe l'appel de l'individu qui se déclare malade par un jugement comparatif porté sur son histoire propre.

N'y a-t-il pas moyen de déterminer le sens du connaître à partir des valeurs de la vie dont l'homme savant se trouve comme chacun tributaire ? « La science, écrit-il contre Bergson, ne tient son sens que d'être une entreprise aventureuse de la vie », laquelle pour atteindre ses fins propres de conservation et d'expansion crée ces formes signifiantes que sont les concepts. Mais l'individu humain est un vivant particulier. Sa normativité s'affirme comme une capacité, sans commune mesure parmi les autres vivants, de créer de nouvelles normes, lesquelles s'instituent dans un rapport de forces qui le traverse lui-même. Ne faut-il pas en conséquence définir la santé à la façon de Nietzsche comme risque affirmé et assumé par l'individu de franchir ses limites pour s'ouvrir de nouveaux horizons ? Michel Foucault entendra la leçon et s'engagera, dans le sillage de Canguilhem, dans une investigation documentée sur les rapports d'intrication entre savoirs et pouvoirs.

À l'occasion d'un colloque organisé en son honneur au mois de décembre 1990, Georges Canguilhem, de sa retraite attentive, avait adressé aux organisateurs un bref message où il écrivait : « Il ne m'est pas possible, à mon âge, de faire autrement que j'ai toujours fait, c'est-à-dire considérer ce qu'on appelle mon œuvre comme autre chose que la trace de mon métier. » De fait, mis à part ses deux thèses, les écrits qu'il a publiés se présentent tous comme des interventions liées à l'exercice de son métier de professeur de philosophie.

Si la tâche de la philosophie consiste à s'interroger sur le sens du connaître, le lieu le plus approprié de son exercice n'est-il point en effet l'institution où l'on produit et transmet des connaissances : l'institution scolaire et universitaire ? Et ladite institution ne représente-t-elle pas cet espace où l'on peut, malgré tout,

toujours ouvrir les problèmes contre les pouvoirs qui s'empresment de les clore une fois qu'ils sont résolus ? Dans l'existence d'un enseignement de la philosophie, pour peu qu'il soit aussi rigoureux que courageux, Canguilhem, en pleine cohérence avec sa philosophie, voyait le gage de ce qu'il appelait une certaine « allure de liberté » maintenue pour la pensée inventive sous toutes ses formes.

C'est ainsi qu'il paya de sa personne pendant tant d'années en faveur de cet enseignement comme Inspecteur général puis comme président du jury d'agrégation, mais aussi dans les émissions qu'il enregistra pour la télévision scolaire et comme responsable de la première grande enquête réalisée par l'UNESCO en 1953 sur l'enseignement de la philosophie dans le monde. Ceux qui l'ont connu dans ces diverses fonctions ont appris, quelquefois à leurs dépens, le sens concret qu'il assignait à l'exigence philosophique.

Cette exigence répondait au sentiment toujours plus vif qu'il avait acquis de ce que notre monde avait à résister afin de préserver, contre des formes toujours plus insidieuses de normalisation, cette liberté de penser et d'agir pour laquelle il avait su prendre tous les risques en sa jeunesse. De là ce paradoxe d'un philosophe dont l'engagement philosophique se fit expressément en faveur de la « réserve ». Mais « la réserve philosophique n'est ni cache ni sanctuaire, elle est garde du ressort. Une suspension d'acquiescement, d'adhésion, d'adhérence, n'est ni repli ni abstention ». Qui dit « réserve » dit donc aussi capacité préservée d'en sortir, au besoin pour faire une sortie bien ciblée. Du philosophe et logicien Jean Cavaillès, son camarade fusillé par les Allemands en 1944, il lui est arrivé d'écrire superbement : « Cavaillès a été résistant par logique. La déduction est aisée. Et pour qui l'a connu, elle n'est pas qu'imaginaire. Le nazisme était inacceptable dans la mesure où il était la négation, sauvage plutôt que savante, de l'universalité, dans la mesure où il recherchait la fin de la philosophie rationnelle. La lutte contre l'inacceptable était donc inéluctable. »

● *Essai sur quelques problèmes concernant le normal et le pathologique* (1943), rééd. sous le titre *Le normal et le pathologique*, augmenté de *Nouvelles réflexions concernant le normal et le pathologique*, Paris, PUF, 1966. – *La connaissance de la vie* (1952), rééd. Paris, Vrin, 1965. – *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, PUF, 1955. – *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1968. – « Vie », *Encyclopaedia Universalis*, Paris, Vrin, 1974. – *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, Paris, Vrin, 1977. – « Le cerveau et la pensée » (1980), repr. in *Georges Canguilhem, philosophe, historien des sciences*, Paris, Albin Michel, 1993. – *Écrits sur la médecine*, Paris, Seuil, 2002. – *Du développement à l'évolution au XIX^e siècle* (1962), Paris, PUF, 2003.

▶ DAGOGNET F., *Georges Canguilhem, philosophe de la vie*, Le Plessis Robinson, Les Empêcheurs de penser en rond, 1997. – Le BLANC G., *Canguilhem et les normes*, Paris, PUF, 1998 ; *La Vie humaine : Anthropologie et biologie chez Georges Canguilhem*, Paris, PUF, 2002. – *Lectures de Canguilhem. Le normal et le pathologique*, Paris, ENS Éditions, 2002. – *Les maladies de l'homme normal*, Bègles, Éd. du Passant, 2004. – LECOURT D.,

Pour une critique de l'épistémologie, Paris, Maspero, 1972. – RENARD G., *L'épistémologie chez Georges Canguilhem*, Paris, Nathan, 1996 ; *L'épistémologie chez Georges Canguilhem*, Paris, Nathan, 1996. – Coll. : Actes du colloque organisé au Palais de la Découverte les 6, 7 et 8 décembre 1990 par E. Balibar, M. Cardot, F. Duroux, M. Fichant, D. Lécourt & J. Roubaud, *Georges Canguilhem, philosophe, historien des sciences*, Paris, Bibliothèque du Collège International de Philosophie/Albin Michel, 1993. – *Actualité de Georges Canguilhem. Le normal et le pathologique*, Paris, Les Empêcheurs de penser en rond, 1998. – Une bibliographie complète de Georges Canguilhem est disponible in *A Vital Rationalist selected writing from Georges Canguilhem*, éd. F. Delaporte, introd. P. Rabinow, bibliogr. crit. C. Limoges, New York, Zone Books, 1994. – *Dictionnaire de la pensée médicale*, sous la direction de D. Lécourt, 2004, 2^e rééd., Paris, Quadrige/PUF, 2006.

Dominique LECOURT

→ Foucault ; Vitalisme et mécanisme.

CANTOR Georg, 1845-1918

Mathématicien allemand, né à Saint-Petersbourg. Il est le génial créateur de la théorie des ensembles et de la numération transfinitie, qui ont ouvert un nouveau continent aux mathématiciens : celui de l'infini actuel, et suscité une intense réflexion philosophique sur la notion d'existence en mathématiques. Avec la théorie des ensembles commence une vive opposition entre partisans et adversaires de l'infini actuel. Leopold Kronecker (1823-1891), Henri Poincaré (1854-1912) ont soutenu que le mathématicien construit tous ses objets à partir de la succession indéfinie des entiers naturels, et n'a pas besoin d'envisager des ensembles infinis comme des totalités achevées. C'était déjà la position d'Aristote, pour qui le mathématicien n'a vraiment affaire qu'à l'infini potentiel, n'ayant besoin que de pouvoir considérer un nombre plus grand qu'un nombre donné, si grand soit-il. Un infini potentiel c'est donc une quantité qui peut devenir toujours plus grande ou plus petite sans que jamais ce devenir se transforme en être ni que cette virtualité se « réalise » en une quantité « actuellement infinie » : « infinitum actu non datur ». Richard Dedekind (1831-1916), partenaire le plus proche de Cantor, et David Hilbert (1862-1943) ont défendu au contraire « le paradis » cantorien de l'infini actuel, parce qu'il est impliqué dans l'usage des méthodes de l'axiomatique abstraite, qui a apporté aux mathématiques du XX^e s. un essor sans précédent. L'apparition de paradoxes dans la théorie des ensembles, dont le premier est découvert par Cantor lui-même en 1883, entraîne l'axiomatisation de la théorie par Ernst Zermelo (1871-1953) et Adolf Abraham Fraenkel (1891-1965), ainsi que le développement d'une activité de fondation menée notamment par Bertrand Russell (1872-1970), D. Hilbert, L.E.J. Brouwer (1881-1966) et Hermann Weyl (1885-1955).

● *Abhandlungen Mathematischen und Philosophischen Inhalts*, éd. E. Zermelo, Berlin, 1932.

▶ CAVAILLÈS J., *Philosophie mathématique*, Paris, Hermann, 1962. – DAUBEN J., *Georg Cantor. His Mathematics and Philosophy of the Infinite*, Cambridge (Mass.)/Londres, 1979.

Hourya SINACEUR

→ Conjecture ; Ensemble ; Induction complète ; Infini mathématique ; Logicisme ; Réalisme ; Théorie ; Topologie.

CARDAN Girolamo, 1501-1576

Girolamo Cardano (1501-1576) est un des plus célèbres savants de la Renaissance italienne. Il vit une enfance malade et difficile à Pavie. Médecin à partir de 1526, sa carrière sera par la suite toujours partagée entre la médecine et les mathématiques (au sens particulièrement large de l'époque). Sa célébrité comme médecin l'amène à prendre la chaire de l'université de Pavie (1543), puis de Bologne (1562). Son mysticisme et ses écrits d'astrologie le feront condamner par l'Inquisition en 1570.

Il écrit approximativement 200 œuvres dans des domaines aussi divers que la médecine, les mathématiques, les sciences naturelles, la mécanique, la religion, la philosophie, la musique, l'astronomie et l'astrologie. Ses démêlés avec Nicolo Tartaglia à propos de la priorité de la résolution de l'équation du 3^e degré sont légendaires. Même si la priorité devait ensuite être donnée à Scipione del Ferro, les travaux arithmétiques et algébriques de Cardan deviennent des références incontournables dans l'Europe entière. Son *Arithmetica practica* de 1539 et son *Ars magna* de 1545 sont avant tout des livres d'arithmétique. Ils perpétuent la tradition de Fibonacci et la *Summa* de Luca Pacioli. Cardan fait sans doute la première étude systématique des équations en Europe. Il s'intéresse aux équations du troisième et quatrième degrés, aux relations entre les racines et entre les coefficients, et aux méthodes d'approximation des racines. Ses méthodes lui font calculer des solutions négatives, et d'autres que l'on a ensuite baptisées imaginaires.

● *Opera omnia*, éd. Ch. Spon, Leyde, 10 vol., 1663.

▶ « Cardan », *Dictionary of Scientific Biography*, New York, vol. III, 1971.

Jean-Pierre SUTTO

→ Équation.

CARNAP Rudolf, 1891-1970

Philosophe allemand né à Ronsdorf, près de Wuppertal, et mort à Los Angeles. Il est l'un des fondateurs de l'empirisme logique et l'un de ses représentants les plus connus. Durant la période où il est, avec Moritz Schlick notamment, l'un des animateurs du Cercle de Vienne, il publie *Der logische Aufbau der Welt* (1928), où il s'efforce de mener à bien une reconstruction rationnelle du monde dans un langage

phénoménaliste propre à désigner les données de l'expérience immédiate (les techniques logiques qu'il utilise à cet effet sont, pour l'essentiel, celles qui avaient été mises au point par Russell et Whitehead dans les *Principia Mathematica*). L'ouvrage *Logische Syntax der Sprache* (1934) inaugure une seconde série de travaux, consacrés à l'étude syntaxique et sémantique des langages formels. Carnap s'y attache à étendre à des langues quelconques les méthodes d'analyse qui avaient été mises au point par Hilbert et Gödel pour étudier les langages mathématiques. *Meaning and Necessity* (1947), où Carnap propose une analyse sémantique des notions fondamentales de la logique modale, est une étape importante dans cette voie. Enfin, à partir de *Logical Foundations of Probability* (1950), Carnap se consacre essentiellement à la logique inductive et à la théorie des probabilités.

● *Der logische Aufbau der Welt*, Hambourg, Felix Meiner, 1928. – *Logische Syntax der Sprache*, Vienne, 1934 (trad. angl. *The Logical Syntax of Language*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1937). – *Meaning and Necessity*, Univ. of Chicago Press, 1947. – *Logical Foundations of Probability*, Univ. of Chicago Press, 1950.

▶ HINTIKKA J. dir., *Rudolf Carnap, Logical Empiricist*, Dordrecht, D. Reidel Publ., 1975. – RIVENC F., *Recherches sur l'universalisme logique*, Paris, Payot, 1993.

Jacques DUBUCS

→ Cercle de Vienne ; Nécessité ; Objectivité ; Phénoménisme ; Physicalisme ; Positivisme ; Probabilité (logique) ; Quine ; Rationalité ; Vérification ; Wittgenstein et le positivisme logique.

CARNOT Lazare Nicolas Marguerite, 1753-1823

L.N.M. Carnot a été désigné comme le prototype du savant-citoyen de la Révolution française. Aux six années qu'il consacre à la République et à son armée, répondent sa carrière d'ingénieur militaire et ses travaux scientifiques. Sa réputation d'excellent ingénieur militaire est rapidement faite. Ses essais et traités plus strictement scientifiques attendront sa célébrité politique pour être – modestement – reconnus.

Que ce soit dans la mécanique, le calcul infinitésimal, ou la géométrie, Carnot fait montre d'un esprit original et inventif. Il développe à partir d'une idée de conservation de la puissance, une mécanique des machines mi-analytique, mi-géométrique, pour laquelle il a recours à un embryon de géométrie orientée. Il s'essaie aux fondements du calcul infinitésimal. Se fondant sur une notion naïve de la limite, il construit une théorie pragmatique et opératoire qui justifie les égalités où interviennent les infiniment petits, théorie à laquelle il ne manque rétrospectivement qu'une définition analytique de la limite. Sa géométrie suppose l'existence d'un système simple de référence, entièrement défini – « résolu » – par des équations algébriques qui convertissent les caractéristiques angulaires en caractéristiques métriques. Il est possible alors d'examiner des systèmes

ou des figures qui s'en déduisent par des déplacements de certains de leurs éléments, et d'en faire leur propre résolution.

▷ GILLISPIE C.C., « Youschkevitch A.P. », *Lazare Carnot savant et sa contribution à la théorie de l'infini mathématique*, Paris, Vrin, 1979.

Jean-Pierre SUTTO

→ Cauchy ; Infini mathématique ; Méthodes infinitésimales.

CARNOT Sadi, 1796-1832

Physicien français, fils de Lazare Carnot, dit le grand Carnot ou l'organisateur de la victoire. Il entre en 1812 à l'École polytechnique. À ce titre, il participe avec le grade de caporal à la défense de Paris les 29 et 30 mars 1814. À la sortie de l'École, Sadi est admis dans le génie militaire. Il entre à l'École d'application de Metz à la fin de la même année, d'où il sort sous-lieutenant en 1817. Placé en disponibilité en 1819, alors que son illustre père a été proscrit pour avoir rejoint l'Empereur durant les Cent-Jours, il commence ses études sur la théorie de la chaleur. En mai 1824, il publie ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.

Les six cents exemplaires imprimés de l'ouvrage ne rencontrent d'abord presque aucun écho. Il ne touche pas les ingénieurs, car il ne se présente pas comme un livre technique sur les machines. Les physiciens l'ignorent, car il ne s'agit ni d'un traité ni d'un texte relatant des expériences originales. La vie de Sadi Carnot se poursuit dans l'obscurité comme celle d'un rentier taciturne et solitaire. Le ministère de la Guerre accepte sa démission en 1828.

Au cours de l'année 1831, il prend conscience de ce que l'hypothèse du calorique qu'il avait admise dans ses réflexions était fautive. Il se remet au travail. Mais sa santé décline rapidement. Il est admis à la maison de santé d'Esquirol à Ivry le 3 août 1832 pour manie. Il y meurt, semble-t-il du choléra, le 24 août.

C'est en 1834 que l'ingénieur Émile Clapeyron (1799-1864) fait la première mention des *Réflexions* dans un mémoire publié par le *Journal de l'École Polytechnique*. Le mémoire de Carnot ne sera définitivement tiré de l'oubli que par le physicien allemand Rudolf Clausius (1822-1888) en 1850 qui reconnaît à l'ingénieur français le mérite d'avoir été le premier à concevoir le second principe de la thermodynamique dont il donne un nouvel énoncé en même temps qu'il introduit la notion d'entropie.

© *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (1824), rééd., Paris, Blanchard, 1953.

▷ CLAPEYRON E., « Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur », *Journal de l'École Polytechnique*, 14, cahier 23, 1834, p. 153-190. — COSTABEL P., « L'œuvre de Sadi Carnot, son contexte, ses suites », *Sadi Carnot et l'essor de la*

thermodynamique, Actes de la table-ronde du CNRS (Paris 11-13 juin 1974), Paris, CNRS, 1976. — KUHN T.S., « Engineering precedent for the work of Sadi Carnot », *Actes du IX^e Congrès International d'Histoire des Sciences*, Barcelone/Paris 1960. — MAURY J.-P., *Carnot et la machine à vapeur*, Paris, PUF, 1986. — REDONDI P., *L'accueil des idées de Sadi Carnot*, Paris, Vrin, 1980.

Dominique LECOURT

→ Chaleur ; Crise de la physique moderne ; Énergie ; Énergétisme ; Entropie ; Fin thermique de l'univers ; Gaz (Théorie des) ; Probabilité (PHYSIQUE) ; Temps.

CARTÉSIANISME

L'œuvre scientifique de Descartes se distingue d'une part par sa Méthode, et d'autre part par la séparation de l'âme et du corps, ce dernier seul, entendu comme substance étendue, étant l'objet propre des sciences ; ce sont les seuls points communs des cartésiens, tant sont diverses et contradictoires les théories engendrées par le cartésianisme.

Méthode

La Méthode a la propriété de rester suffisamment générale pour trouver une application universelle, et d'être pourtant efficace pour traiter précisément de questions particulières. Elle se démarque de l'*Art combinatoire* de Lulle par sa faculté d'adaptation à chaque problème, qui garde aux choses leur privilège.

Décomposition et recombinaison. — L'objet de la Méthode est de chercher à acquérir une connaissance certaine et évidente, qui doit être préférée aux conjectures seulement incertaines ou vraisemblables. Pour Descartes, une telle certitude ne peut être acquise que de deux manières : soit par une appréhension claire et distincte de l'esprit, ou *intuitus*, soit par une déduction certaine. Ceci étant admis, la Méthode va consister d'abord à décomposer systématiquement les problèmes complexes en questions particulières qui puissent se résoudre facilement chacune prise à part par une immédiate intelligence. Ou autrement dit tout problème portant sur des natures composées doit être ramené progressivement en une série de questions portant sur des natures simples connues par un clair *intuitus*.

La mise en œuvre pratique de la Méthode se résume donc finalement en une double difficulté : d'une part arriver à trouver des natures simples adéquates, et d'autre part en achever effectivement la recombinaison. Toute exposition des sciences sera donc précédée par la recherche des « principes, ou premières causes, de tout ce qui est, ou peut être, dans le monde », qui sont véritablement les principes de la connaissance, et appartiennent à la Métaphysique. Les effets « les premiers et les plus ordinaires » qui sont déduits immédiatement de ces causes, les choses les plus communes et les plus simples comme la nature en général et les corps en particulier, formeront les principes généraux de la

Physique. Il faudrait en déduire ensuite la nature des plantes, des animaux et de l'homme, puis « les autres sciences qui lui sont utiles ». Ainsi se dessine le fameux « arbre des sciences » de la Lettre-Préface des *Principes*, « dont les racines sont la Métaphysique, le tronc est la Physique, & les branches qui sortent de ce tronc sont toutes les autres sciences, qui se réduisent à trois principales, à savoir la Médecine, la Mécanique, & la Morale » (in A.T., IX-2, 14).

La connaissance *a priori* de l'ordre universel régissant toute chose est donc préférable à une connaissance inductive ou par les effets, dite *a posteriori*, qui reste bien sûr possible, mais ne permettrait que la connaissance certaine de questions particulières.

Des hypothèses aux expériences. — Dans les faits, Descartes s'est heurté très tôt à une difficulté insurmontable en appliquant sa Méthode aux sciences de la nature : pour les corps composés, les possibles excèdent largement l'existant, si bien qu'il faut aller au-devant des causes par les effets. La stratégie qu'il adopte alors consiste à introduire au fil des *series* de déductions des hypothèses qu'il s'agira ensuite de vérifier expérimentalement. Cette contamination de l'ordre purement déductif initialement adopté jette quelque soupçon sur la certitude finalement atteinte. En effet l'abandon en cours de route de la chaîne déductive *a priori*, si elle épargne les causes premières, et donc la Métaphysique, suppose *de facto* que les dernières conclusions auxquelles est conduit le raisonnement reposent sur la précarité d'une induction qui peut toujours être remise en cause par de nouvelles expériences. Du coup se trouvent introduites de nouvelles hypothèses conformes aux observations. À l'ordre purement déductif adopté dans les *Méditations* qui fonde la métaphysique cartésienne, suppléée en sciences un ordre hypothético-déductif dont Descartes s'est « à peu près satisfait », mais qui ne conduit pas au même degré de certitude.

L'impossibilité d'une déduction systématique a par ailleurs conduit Descartes à introduire des « modèles » pour rendre compte des phénomènes. Construits à l'aide d'analogies tirées de l'axiome d'homogénéité de la nature, ceux-ci doivent s'entendre comme moins parfaits que la réalité qu'ils n'expliquent que partiellement, donc dans un sens radicalement différent de l'acceptation ultérieure de ce concept. Toute la difficulté, qui fait à la fois la force et la faiblesse de la science cartésienne, sera de confirmer ou éventuellement de modifier ce « modèle » (selon l'orthographe en usage au début du XVII^e s., dans le domaine technique et artisanal). Descartes peut être considéré comme le premier à avoir tenté des justifications de ses hypothèses non seulement par l'expérience, mais aussi par le calcul.

Si la Méthode cartésienne n'est pas absolument expérimentale, elle accorde par force une importance considérable à l'*experientia* qui se trouve investie d'un double statut : d'une part permettre l'observation de la

nature, et d'autre part confirmer les hypothèses introduites pour rendre compte des corps composés.

Mathématiques

L'efficacité de la Méthode est particulièrement manifeste en mathématiques, où profitant au mieux des travaux de Viète et de Stevin, Descartes leur a résolument imprimé une orientation nouvelle. Le principe général qui l'a guidé donne la priorité à la logique sur les écritures, qui pour ce faire vont être simplifiées de manière radicale.

L'innovation cartésienne vient d'abord de la correspondance qu'il postule entre le calcul arithmétique et la géométrie. Par ailleurs, abandonnant l'algèbre cosmique de la *cabala germanorum* pour n'en retenir que le « chiffre », il modifie les notations en un style d'écriture devenu depuis d'usage courant.

Parmi l'importante œuvre mathématique de Descartes, dont l'essentiel se trouve dans sa *Géométrie* de 1637, on retiendra : la résolution du problème de Pappus, lui permettant entre autres de donner les équations des coniques d'Apollonius ; le principe selon lequel une équation de degré n a exactement n racines ; le théorème dit de Descartes-Euler selon lequel, si S est le sommet d'un polyèdre convexe, F le nombre de faces, et A le nombre d'arêtes, alors : $F + S = A + 2$. À côté de ces brillants résultats, Descartes rejette l'idée du calcul infinitésimal proposée par Fermat. C'est à Leibniz que revient le mérite d'avoir introduit le principe des résolutions numériques par approximations en prolongeant les travaux de Huygens, avant d'inventer le calcul différentiel et intégral.

Les sciences de la nature

Le panorama offert par les sciences de la nature est sans doute plus contrasté, et nombre de résultats ne survivront pas à Descartes. C'est aussi là que les critiques seront les plus vives, sources d'interminables controverses. Mais le nouvel élan donné par le cartésianisme marque pourtant le début d'une nouvelle étape dans l'histoire des sciences.

Physique. — Le fondement de la physique cartésienne réside dans l'essence géométrique de la matière, permettant à la fois une analyse opératoire des phénomènes physiques par les mathématiques, et le rejet de la physique aristotélicienne. Le principe scolastique selon lequel « la nature a horreur du vide » est le point de départ de la mécanique cartésienne. Selon Descartes, la matière est en effet toujours pleine, faite de trois éléments. Le premier, d'une grande célérité, est le feu. Il est indéfiniment divisible, et comble donc tout vide. Le second élément, qui a une figure ronde due à l'usure de la friction des particules, est d'une plus grande taille que le premier et est lui aussi à la fois divisible et d'une grande mobilité. Enfin le troisième est la terre, formé de plus grosses parties assez peu mobiles. Contrairement à Lulle pour qui l'être de la matière

n'est qu'agissant, Descartes postule au contraire la continuité de la substance étendue, indépendamment de tout mouvement. Ces trois éléments sont mis en mouvement par trois lois principales. Selon la première, dite « loi de la permanence », « chaque chose demeure en l'état qu'elle est, pendant que rien ne le change » (*Principia III*, art. 37). La deuxième loi concerne plus particulièrement la conservation de la direction du mouvement d'un mobile « qui tend à continuer son mouvement en ligne droite ». Cette deuxième loi est particulièrement importante car couplée à l'impossibilité du vide elle fonde la thèse essentielle pour toute la physique cartésienne de l'universalité du mouvement circulaire. La troisième loi, plusieurs fois remaniée, porte sur les chocs. Elle sera très tôt critiquée par Huygens qui établira la théorie définitive de la percussion des corps.

Ces principes étant établis, Descartes a pu, par un usage approprié des mathématiques, trouver notamment le centre d'équilibre d'une balance, et rendre compte de la mécanique des poulies et des leviers. Passant de la mécanique du point à celle des systèmes matériels, Huygens donnera ensuite l'équation des oscillations du pendule. On notera également qu'il adopte très tôt l'héliocentrisme de Galilée. Parmi les physiciens cartésiens il faut citer Rohault, qui développera systématiquement une physique mathématique, Régis, le chimiste Lémery, et surtout Fontenelle.

C'est certainement en optique que le succès de Descartes est le plus éclatant. Dès sa *Dioptrique* de 1637, Descartes définit la lumière comme un mouvement des particules, rejetant tout transport de matière, mettant ainsi fin aux complexes théories médiévales des espèces intentionnelles. Il est suivi sur ce point par Christian Huygens qui anticipe les théories ondulatoires de la lumière. Par ailleurs, Descartes a pu expliquer très tôt la réflexion de la lumière, et surtout poser la loi de la réfraction, dont il partagerait la paternité avec Snellius. On notera aussi que partant de l'hypothèse que les gouttes d'eau sont rondes, il a montré quelles sont les conditions géométriques requises pour que l'on puisse voir un double arc-en-ciel.

Médecine. — La médecine est manifestement la science où Descartes a rencontré le plus de difficultés. Il a donc adopté une stratégie appropriée permettant de remonter des effets aux causes, en épousant d'une part les connaissances anatomiques et physiologiques de son temps, confortées par ses nombreuses dissections et vivisections animales dont témoignent sa correspondance et les notes des *Excerpta anatomica*, et d'autre part en introduisant le fameux « modèle » du corps machine. Renvoyant dos à dos l'aristotélisme, le galénisme et l'alchimie, Descartes introduit la médecine parmi les sciences, en lui donnant comme règle principale de toujours discerner les opérations propres du corps, qui s'expliqueront par les lois de la physique, de celles qui relèvent de l'union de l'âme et du corps. Il a pu ainsi imaginer la circulation du sang avant d'avoir connaissance des démonstrations du fameux *De motu*

cordis de Harvey dont il sera l'un des premiers défenseurs. On notera aussi la prise en compte de la découverte des « veines lactées » par Asellius, qui l'amène à modifier ses hypothèses sur la digestion et donc à ajuster son « modèle » à l'expérience. L'inachèvement de la question de la genèse du vivant, malgré plusieurs tentatives infructueuses, montre toutefois les limites de la « fabrique ».

Pour réaliser toutes les fonctions du corps, Descartes bâtit à force d'hypothèses une « fabrique » à partir de ses connaissances anatomiques, dont les principes sont tirés de la physique.

Le premier moteur de la « fabrique » est le cœur. Ce dernier contient un « feu sans lumière » qui va rendre compte des battements du cœur, de la circulation et de la distillation du sang. Le sang permet à la fois de maintenir le corps en vie, de le nourrir, et de fabriquer les « esprits animaux ». Ceux-ci forment un « vent très subtil » et sont obtenus par une filtration du sang réalisée dans les pores du cerveau. Ils sont composés des particules les plus vives et les plus agitées. Les sens fonctionnent tous suivant le même schéma : les nerfs, qui sont comme des « cordes tendues », transmettent à la « glande pinéale » située au milieu du cerveau les informations qui leur sont propres. Celle-ci, lieu du « sens commun », pousse alors les esprits animaux selon telle ou telle direction pour causer les mouvements appropriés. Puisque la glande est le « principal siège de l'âme », elle causera aussi les impressions et les passions. Par ailleurs, prenant la suite des travaux d'optique physiologique de Kepler, Descartes montre le premier que les images se forment sur la rétine et non dans l'humeur du cristallin.

En thérapeutique, le fonctionnement autonome du corps a amené Descartes à privilégier l'instinct plutôt que le recours aux médicaments. « La nature travaille elle-même à sa propre guérison », déclare-t-il à Burman en 1648. Aussi l'essentiel de la thérapeutique cartésienne consiste-t-il à adopter le régime qui correspond le mieux au tempérament de l'organisme, ce que l'on peut apprendre essentiellement par expérience. Par ailleurs, si l'âme endure la douleur à cause du corps, elle peut réciproquement agir sur le corps malade, soit négativement par des distractions qui la font se détourner du mal, soit positivement en se persuadant de la guérison. Ainsi la médecine de Descartes ne se limite-t-elle pas au corps, mais prend bien en compte l'homme tout entier. Si malgré tout le mal persiste, il faudra recourir au « médecin extérieur », et donc tant aux remèdes alors en usage qu'aux opérations chirurgicales.

Les principes de la physiologie cartésienne vont inspirer entre autres Regius, Thomas Bartholin, Clauberg, La Forge, et Sténon. L'inachèvement de la médecine cartésienne engendrera deux grandes écoles rivales. Le mécanisme adopté par Borelli et Malpighi systématisa la réduction des fonctions de l'organisme à des processus physiques ; la radicalisation de la thèse de l'animal-machine culminera avec l'œuvre de La Mettrie. Au contraire le vitalisme, qui commence avec

Claude Perrault et Stahl, privilégie l'action de l'âme présente dans tout le corps pour expliquer les fonctions vitales.

● DESCARTES R., *Œuvres complètes*, éd. Ch. Adam & P. Tannery, rééd., Paris, Vrin/CNRS, 11 vol., 1969-1989 (notation abrégée : A.T., [volume], [page]). — *De solidorum elementis*, texte, trad. et comm. de P. Costabel, Paris, PUF, 1987.

► BITBOL-HESPERES A., *Le principe de vie chez Descartes*, Paris, Vrin, 1990. — COSTABEL P., *Démarches originales de Descartes savant*, Paris, Vrin, 1982. — DE BUZON F. & CARAUD V., *Descartes et les « Principia II »*, Paris, PUF, 1994. — GARBER D., *Descartes metaphysical physics*, Univ. of Chicago Press, 1992. — GRIMALDI N. & MARION J.-L. dir., *Le Discours et sa méthode*, Paris, PUF, 1987. — LINDEBOOM G., *Descartes and Medicine*, Amsterdam, RODOPI, 1979. — MARION J.-L., *Sur l'ontologie grise de Descartes*, Paris, Vrin, 1981. — MILHAUD G., *Descartes savant*, Paris, Alcan, 1921. — MOUY P., *Le développement de la physique cartésienne*, Paris, Vrin, 1934. — TOURNADRE G., *L'orientation de la science cartésienne*, Paris, Vrin, 1982. — Coll. : « Pour Descartes ». Mathématiques et physiques cartésiennes, *Revue d'histoire des sciences*, t. 51, 2/3, avril-sept. 1998.

Vincent AUCANTE

→ Automate ; Descartes ; Géométries ; Immatérialisme ; Lumière ; Matière [PHYSIQUE] ; Nature (Système de la) ; Travail ; Vision ; Vitalisme et mécanisme.

CATALYSE

Il n'est guère de produit chimique d'importance industrielle dont la synthèse ne nécessite l'emploi d'un catalyseur. Homogène, hétérogène, rédox ou de transfert de phase (on exclura de cet article la catalyse enzymatique), le catalyseur est le médiateur indispensable qui active, oriente, sélectionne la réaction chimique et qui permet l'obtention dans des conditions raisonnables du produit désiré. L'automobile elle-même se dote, quand elle est respectueuse de la qualité de l'air que nous respirons, d'un pot catalytique où quelques traces d'un métal rare et coûteux veillent sur l'état de nos bronches. Alors que le catalyseur n'est pas vieux de seulement deux siècles, il est devenu un acteur fondamental de la chimie théorique et industrielle. Il n'est pas de technique trop fine ou de théorie trop pointue pour être mise à contribution dans le but de choisir, protéger, améliorer un catalyseur ou d'en comprendre plus finement l'action.

L'apparition d'un phénomène nouveau

Avant le début du XIX^e s., personne ne pensait qu'un facteur autre que l'affinité pouvait intervenir dans la vitesse d'une réaction, exceptions faites de la lumière et de la température. Pour Lavoisier et Laplace par exemple, une réaction facile est une réaction rapide ; c'est aussi une réaction qui dégage une grosse quantité de chaleur. Mesurer la chaleur dégagée, c'est aussi mesurer la promptitude avec laquelle la réaction s'effectue.

De nouvelles expériences vont montrer qu'un corps étranger à la réaction peut modifier très sensiblement le déroulement de la réaction chimique. En morceau, en mousse, en noir (c'est-à-dire très divisé), le platine révèle des vertus particulièrement intéressantes : il décompose le peroxyde d'hydrogène, il facilite l'oxydation de l'alcool et la combustion de l'hydrogène, il permet aussi d'oxyder le dioxyde en trioxyde de soufre. Thénard, qui mène avec Dulong une étude détaillée sur la combustion de l'hydrogène, montre que ce n'est pas le seul métal utilisable, et l'on observe qu'en présence d'acide, l'alcool ne s'oxyde pas mais qu'il se forme un éther.

Des substances, métalliques, en solution, simples ou composées, ont donc la propriété de modifier la vitesse avec laquelle une réaction s'effectue, voire de privilégier une réaction aux dépens d'une autre. Dans ces expériences, la substance qui influence ainsi le déroulement de la réaction chimique n'est ni un réactif ni un produit. Les explications en termes d'affinité chimique, au sens où Berthollet utilise ce terme, sont donc inopérantes pour rendre compte de ce phénomène aussi nouveau que varié.

Un nom nouveau, un cadre théorique traditionnel

C'est Berzélius, le « pape » suédois de la chimie du XIX^e s., qui propose en 1835 le terme et la notion de catalyseur. Pour lui, il n'est pas question de faire appel à une force mystérieuse pour interpréter les observations expérimentales nouvelles. Il a proposé avec un certain succès une théorie électrostatique de la liaison chimique : toute liaison est une attraction entre charges de signes contraires, toute réaction est une réorganisation des interactions pour obtenir une stabilisation supplémentaire.

C'est à nouveau l'électricité qui est mise à contribution pour expliquer les nouveaux phénomènes observés. Berzélius affirme, au vu d'indices expérimentaux bien modestes, que le phénomène est de nature électrique, mais que, en raison de son caractère nouveau, il est plus simple de lui attribuer un nom spécifique : la catalyse. La force catalytique est susceptible d'éveiller des affinités qui sont endormies à la température considérée, par leur seule présence et non par leur affinité propre. Il classera d'ailleurs le phénomène dans la section électricité de son livre *Lehrbuch der chemie*, édition de 1843. Faraday, dont le nom reste lié à des questions d'électricité est, quant à lui, plus réservé sur l'interprétation du phénomène.

Vers une meilleure compréhension du phénomène

Le temps est venu pour des études expérimentales plus quantitatives et, n'en déplaise à Berzélius, pour une construction théorique plus solide. La première modélisation quantitative d'une loi de vitesse est due à Wilhelm qui étudie, en 1850, l'hydrolyse du sucre de canne. Il montre que la vitesse de la réaction est proportionnelle à la quantité de sucre, mais aussi à la quantité

d'acide présent dans le milieu, alors que l'acide joue ici le rôle de catalyseur. Un peu plus tard, l'étude des réactions équilibrées, notamment les réactions d'estérification, conduisent à la loi de Guldberg et Waage.

La théorie cinétique des gaz qui apparaît en 1857 permet une interprétation microscopique des phénomènes. Pour qu'une réaction ait lieu, il faut qu'il y ait un choc entre les particules réagissantes, ce qui justifie l'expression des lois de vitesse observées. Paradoxalement, la notion d'équilibre chimique est conçue comme une notion dynamique. L'équilibre est obtenu quand les réactions inverses ont des effets qui se compensent. Il suffit alors d'écrire les lois de vitesse des réactions inverses pour obtenir les conditions de l'équilibre, et pour retrouver la loi de Guldberg et Waage.

Les choses malheureusement ne sont pas si simples. Comment faire intervenir la notion de catalyse au niveau des lois de vitesse alors qu'elle disparaît dans l'écriture de la loi de Guldberg et Waage ? Comment interpréter les réactions, dont celle étudiée par Wilhelm, pour lesquelles la loi de vitesse ne correspond pas à ce que l'écriture de la réaction laisse penser ? En 1884, dans ses *Études de dynamique chimique*, Van't Hoff montre que les cas résultent de la superposition de plusieurs étapes, l'ensemble de ces étapes constituant le mécanisme de la réaction. Toutes les réactions catalysées entrent dans cette catégorie.

Le défi de l'éphémère

La voie est ouverte pour que l'on puisse admettre que le catalyseur réagit chimiquement au cours du processus, mais qu'il est régénéré, théoriquement sans perte, ce qui justifie sa conservation apparente. En 1902, l'oxydation du dioxyde en trioxyde de soufre catalysée par le pentoxyde de vanadium est interprétée selon ce schéma : le vanadium est réduit et oxydé successivement, retrouvant ainsi son état antérieur.

La voie est ouverte aussi pour de nouvelles recherches : une compréhension plus intime des mécanismes de réaction passe par la connaissance de ces états éphémères que prennent les catalyseurs. Comment observer, identifier, piéger, ces états peu stables qui opposent leur évanescence à l'ingéniosité de l'expérimentateur ? De gros efforts ont été réalisés dans cette direction. Ce furent d'abord des méthodes indirectes comme le traçage radioactif mis au point par Paneth en 1918. Ce sont, de nos jours, les techniques spectroscopiques (résonance magnétique nucléaire, résonance paramagnétique électronique et autres) dont la sensibilité et la rapidité sont largement exploitées. C'est aussi la microscopie à champ proche qui permet de « voir » la surface d'un solide et la molécule qui s'y trouve fixée. C'est enfin la mécanique quantique qui permet de prévoir la stabilité relative d'une structure comparée à une autre, de localiser les sites actifs et d'en « peser » l'efficacité.

Du savoir faire et du savoir voir au bon usage de

l'ordinateur, l'histoire de la catalyse trace une évolution qui est à l'image de celle de toute la chimie. La prévision a pris le pas sur l'observation, le microscopique sur le macroscopique, l'interaction onde-matière sur le thermomètre. Loin d'être désormais un médiateur dont la présence facilite la réaction, le catalyseur est désormais un acteur aussi étudié, compris, choisi que les réactifs et les produits de la réaction chimique.

► BERRY A.J., *From classical to modern chemistry*, New York, Dover Publ., 1954, 1968. — GOUPEL M., *Du flou au clair*, Paris, Éd. du CHTS, 1991. — JORPES J.E., *Jac. Berzelius*, Stockholm/Uppsala, Almqvist & Wiksell, 1966. — MIERZECKI R., *The historical development of chemical concept*, Dordrecht/Boston/Londres, Kluwer Academic Publ., Warszawa P.W.N. Polish Scientific Publ., 1991.

Jean-Claude COMPAIN

→ Affinité ; Berthollet ; Gaz (Théorie des) ; Synthèse.

CATASTROPHISME

BIOLOGIE / GÉOLOGIE

Le catastrophisme a toujours constitué une composante importante de la réflexion en biologie. Comme le phénix, cette thématique, liée au problème de la contingence, renaît de ses cendres sous une forme nouvelle à chaque fois qu'elle paraît avoir été abandonnée. En fait, on y retrouve chroniquement une double composante : l'une, mythique et ancrée depuis des siècles dans notre culture, fait subjectivement référence aux châtiments d'ordre divin, par l'eau ou par le feu, tels ceux décrits dans la Bible. L'autre, scientifique, tente d'identifier, de comprendre et d'interpréter les crises biologiques qui se sont succédées au cours des temps géologiques. Lorsque les progrès des sciences peuvent conforter, théoriquement ou expérimentalement, une vision de type catastrophe, les incidences auprès du grand public deviennent alors considérables.

Cuvier, le fondateur

Le père du catastrophisme moderne est indéniablement Georges Cuvier (1769-1832). Anatomiste de génie, il a l'idée d'appliquer aux ossements fossiles les outils conceptuels mis au point pour les animaux actuels. Il devient ainsi le fondateur de la paléontologie des vertébrés. En étudiant les différentes faunes qui se succèdent au cours des temps géologiques à un même endroit, il découvre un profil temporel particulier ; chacune de ces faunes semble persister quasiment inchangée pendant un laps de temps assez long, puis disparaître en un temps très court pour être immédiatement remplacée. Ce constat renforce le fixisme de Cuvier qui propose qu'au cours de temps géologiques la succession des faunes soit rythmée par une série de catastrophes, ou révolutions du globe.

Prouvant l'ancienne existence d'animaux actuellement

disparus, Cuvier démontrait par là même la mort des espèces. Pour expliquer la continuité de la vie, trois solutions logiques pouvaient alors être suggérées : le stock d'espèces est donné au départ, et il s'épuise au fur et à mesure ; une création nouvelle compense à chaque fois les disparitions dues à une catastrophe ; les espèces se transforment et il y a une continuité temporelle entre anciennes et nouvelles faunes. Cuvier rejette la dernière solution, qui est celle de l'évolution ; il reste muet quant aux deux autres, même s'il est raisonnable de penser qu'il penchait pour la première. Il semble penser que la succession des révolutions du globe pouvait se terminer, étant donné que la dernière a permis l'avènement de l'homme, œuvre ultime de la Création.

L'hypothèse du transformisme se trouva être la bonne. Proposée tout d'abord dès 1809 par Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829), elle fut ensuite longuement argumentée par Charles Darwin (1809-1882). Or, dès *L'Origine des espèces* (1859), ouvrage dans lequel il expose ses deux concepts capitaux — descendance avec modification et sélection naturelle —, il défend le gradualisme, c'est-à-dire le fait que les changements évolutifs doivent être infinitésimaux et se produire de manière continue, à vitesse constante. Ce critère ne lui était aucunement indispensable, et même ses amis et alliés comme Thomas Huxley (1826-1896), le bouledogue de Darwin, lui reprochèrent de ne pas se limiter à l'essentiel.

Le gradualisme vient principalement de l'influence de Charles Lyell (1797-1875), considéré comme le fondateur de la géologie moderne. Mettant en doute le catastrophisme de Cuvier, celui-ci défend dès 1826 la thèse de l'uniformitarisme, c'est-à-dire qu'« une suite régulière et non interrompue de changements dans le monde organique et inorganique peut déterminer [...] les lacunes et les discordances que l'on attribue ordinairement à de grands bouleversements et à des catastrophes violentes ». Il apparut donc une convergence forte entre le géologue qui étudie l'histoire de la terre et le biologiste qui s'intéresse à l'histoire de la vie. L'une des conséquences fortuites de cette évolution des idées fut l'établissement, dans l'esprit de bon nombre de personnes, d'une corrélation entre fixisme et catastrophisme d'une part, transformisme et gradualisme d'autre part. Or une telle corrélation n'est pas fondée, et nous verrons qu'il est scientifiquement pertinent de parler de catastrophisme dans un cadre évolutif moderne.

Catastrophe, extinction et crise biologique

Il convient maintenant de préciser la distinction existant entre catastrophe et crise biologique. Le terme de catastrophe est utilisé pour qualifier un changement rapide et imprévisible de l'environnement, comme une chute de météorite, une éruption volcanique ou encore une variation rapide du niveau des mers ; la crise biologique désigne l'extinction massive et brutale de nombreuses espèces. Le catastrophisme correspond donc à l'explication causale d'une crise biologique par une

catastrophe ; l'autre volet de l'alternative est une explication par un gradualisme.

Les extinctions d'espèces sont des événements qui se produisent habituellement, à un rythme *a priori* régulier. Détecter des crises biologiques, c'est reconnaître des extinctions de masse, c'est-à-dire des disparitions en grand nombre qui surviennent en un laps de temps géologiquement bref. De nombreux artefacts relevant soit de la géologie proprement dite (problèmes de datation ou d'échelle, lacunes de sédimentation, richesse relative des sites fossilifères...), soit de la classification (groupes para- ou polyphylétiques, taxons « Lazare »...) rendent le travail techniquement difficile.

Il faut insister sur l'effet paradoxal que peuvent entraîner les limites de résolution sur la présentation de faits. Ce qui paraît brutal si la limite de résolution est de l'ordre du million d'années peut être beaucoup plus adouci avec une limite de résolution de cinquante mille ans. L'artefact est tel que, subjectivement parlant, dans le premier cas on attend une explication par une catastrophe, tandis que dans le deuxième cas, on voudrait une explication graduelle. C'est pourquoi on hiérarchise les crises biologiques suivant le degré de confiance qu'on peut leur conférer.

Les principales crises biologiques

Dans le milieu marin, quatre extinctions majeures apparaissent avec grande netteté : la fin de l'Ordovicien (l'Ashgillien, environ 440 Ma) ; le Permien supérieur (le Guadelupéen, environ 250 Ma) ; la fin du Permien (le Dzhulfien, environ 240 Ma) ; la fin du Crétacé (le Maastrichtien, environ 65 Ma). Deux autres périodes d'extinction moins tranchées peuvent néanmoins être considérées comme très plausibles : la fin du Trias (le Norien, environ 205 Ma) ; le Dévonien supérieur (le Frasnien, environ 370 Ma). Enfin, il convient de citer deux autres périodes, bien qu'elles soient principalement dues à des artefacts relatifs à la présence de gisements d'une richesse faunistique exceptionnelle. Il s'agit du Cambrien moyen (le Templetonien, environ 520 Ma) en relation avec le gisement des schistes de Burgess, et la fin du Jurassique (le Portlandien, environ 135 Ma) en relation avec le gisement des calcaires lithographiques de Solnhofen. On trouve dans la littérature d'autres « extinctions » statistiquement infondées, en particulier celles qui sont en relation avec une hypothétique périodicité de 26 Ma. Certains astrophysiciens ont cherché à corréler ces événements périodiques avec le voyage du système solaire à l'intérieur de la galaxie ; mais des études statistiques poussées ont prouvé la pauvreté de ces informations.

Des extinctions particulières concernant le milieu terrestre ont été évoquées à plusieurs reprises. Pourtant la majorité d'entre eux correspondent vraisemblablement à des biais dans la documentation paléontologique. Il faut toutefois excepter la fin du Crétacé avec la disparition des dinosaures, qui se trouve en corrélation avec la crise marine, et la « grande coupure »

existant entre l'Éocène et l'Oligocène (entre 37 et 39 millions d'années), qui voit un renouvellement des faunes de mammifères tant en Europe qu'en Amérique du Nord.

D'un point de vue médiatique, ce n'est pas l'extinction la plus importante (celle de l'Ordovicien) qui est la plus prégnante. Le public retient avant tout celle de la fin du Secondaire, à la transition Crétacé/Tertiaire (KT), celle qui a vu disparaître les dinosaures. Depuis une dizaine d'années, il faut rajouter la crise du Cambrien moyen, très étudiée par les Britanniques puis popularisée par le livre de Gould, *La Vie est belle*.

La fin des dinosaures

D'une certaine manière, la crise KT est exemplaire car la disparition des dinosaures est tellement frappante qu'on en a continuellement cherché une explication. Nous allons nous attarder quelques instants sur ce magnifique exemple de la résurrection du catastrophisme en sciences de l'évolution. Il faut tout d'abord rappeler avec insistance que les dinosaures ne sont pas les seuls organismes vivants touchés. Ceci est important, car toute explication valable doit expliquer le phénomène dans son ensemble, et non pas être limité à ces seuls « terribles reptiles ».

Parmi les vertébrés terrestres, les amphibiens semblent épargnés. Les lépidosauriens (lézards et serpents) perdent graduellement les mosasaures. Comme on pouvait s'y attendre, les archosauriens sont effectivement les plus durement touchés ; on assiste à la disparition complète des dinosaures, à l'extinction des ptérosaures (les reptiles volants), mais de manière graduelle ; la moitié des familles de crocodiles survivent, mais aucun crocodile géant ; enfin, les oiseaux, partiellement décimés, passent la limite fatidique pour présenter une grande radiation au début du Tertiaire. Au niveau de la flore, on n'observe aucune extinction de masse.

Les taxons marins, quant à eux, présentent des modalités d'extinction fort différentes ; il n'y a pas d'extinction de masse pour les poissons téléostéens, tandis que les élasmobranches (les requins) voient 20 % de leurs familles disparaître. Les ammonites ne quittent pas le Secondaire, mais l'appauvrissement est amorcé dès le début du Maastrichtien. Enfin, le plancton marin est également touché. Si le nanophyto-plancton (en particulier les coccolithophoridés) subissent un renouvellement soudain, les foraminifères planctoniques présentent une transition graduelle. En résumé, on observe pour les extinctions des organismes marins des modalités fort différentes de celles des organismes terrestres. Ce point est crucial, car toute « bonne » explication doit embrasser l'ensemble des phénomènes.

Parmi les explications proposées, beaucoup se sont focalisées exclusivement sur la disparition des dinosaures. De plus, la plupart d'entre elles ne peuvent être considérées comme scientifiques car non testables. Citons, entre autres : la prédation des œufs de dinosaures

par les mammifères, la synthèse par les plantes à fleurs de molécules toxiques qui auraient empoisonné en masse les dinosaures ; la stérilisation des mâles par une augmentation soudaine de la température ; la survenue d'un nuage de gaz cosmique empoisonné... D'autres hypothèses ont une approche plus globale, et sont souvent scientifiquement testables, comme : l'explosion d'une supernova ; la chute d'une météorite de grande taille ; un volcanisme de grande ampleur ; une régression générale des mers ; un refroidissement des mers. On remarque sans peine que ces hypothèses rejoignent le cadre du catastrophisme, ou celui du gradualisme. De plus, on peut y distinguer une origine terrestre, ou une origine extraterrestre.

L'explication par l'explosion d'une supernova est exemplaire à cet égard. Proposée en premier lieu par les paléontologistes, elle est reprise par les astrophysiciens quand certains d'entre eux découvrent une supernova à 3 000 années lumière de la Terre, c'est-à-dire le résultat d'une explosion qui a eu lieu il y a environ 65 millions d'années... Une telle explosion aurait pu avoir des effets cataclysmiques sur les organismes vivants, assaillis successivement par des rayons X, des rayons cosmiques, et de la matière d'origine cosmique ; il aurait dû s'ensuire une anomalie climatique entraînant un refroidissement général. Mais il est connu que l'explosion d'une supernova devrait libérer différents éléments lourds comme le plutonium 244. Or on n'en trouve pas dans les sédiments de la limite KT... L'hypothèse se trouva donc élaborée et réfutée de manière scientifique.

Un travail analogue permit de retenir l'hypothèse de la chute d'une météorite de grande taille, souvent retenue comme la cause de la disparition des dinosaures. En effet, cette fois-ci, on trouve dans les sédiments en question un élément particulier, l'iridium, qui pourrait être la preuve de l'explication avancée. *A priori* relativement rare dans les couches superficielles terrestres et courant dans les météorites, on a pensé se servir de l'iridium comme chronomètre géologique de la sédimentation. En effet, si on fait l'hypothèse que la quantité de météorites qui se désagrègent dans l'atmosphère terrestre est globalement constante au cours du temps, la quantité de poussières riches en iridium qui en proviennent produit une pluie elle-même constante. Elle devait donc permettre de calculer la vitesse de sédimentation dans les fonds marins, car plus la sédimentation est rapide, plus la quantité d'iridium mélangée aux sédiments marins est faible. Or, au cours des dosages, il apparut que les sédiments de la limite KT de Gubbio, en Italie, présentaient un taux en iridium cent soixante fois supérieur à la normale. Cette anomalie étant retrouvée dans plusieurs localités éloignées les unes des autres (Danemark et Nouvelle-Zélande), on en a déduit une distribution homogène sur l'ensemble du globe.

Afin d'expliquer cette teneur anormale en iridium, on a fait l'hypothèse de la chute d'une météorite importante (entre quatre et quatorze kilomètres de diamètre), qui pourrait correspondre au cratère de Chixulub, en

Amérique centrale. L'énergie libérée par un tel impact peut être calculée et les conséquences assez bien déterminées. Immédiatement après l'impact, d'importants dégâts sont la conséquence de l'effet de souffle, de tsunamis et d'incendies ; puis les poussières projetées dans l'atmosphère obscurcissent l'atmosphère, provoquant un « hiver nucléaire » avec un arrêt de la photosynthèse pendant plusieurs années. Enfin, il y a un refroidissement général du climat et des pluies acides. La détérioration des chaînes alimentaires devrait alors être très importante. Cette explication paraît séduisante, mais pourtant des problèmes demeurent. Techniquement parlant, le cratère de Chixulub est sans doute plus ancien que la limite Crétacé/Tertiaire, sans doute de l'ordre de 77 millions d'années. D'autre part, la couche d'iridium n'est sans doute pas contemporaine partout ; enfin – et surtout – les extinctions ne sont pas toutes brutales !

La chute de la météorite n'est pas la seule explication proposée à la couche d'iridium. En effet, la fin du Maastrichtien voit un volcanisme très important, en particulier en Inde. Les trapps du Dekkan paraissent être le résultat de la plus grande catastrophe volcanique de ces deux cents millions d'années. D'une durée approximative de cinq cent mille ans, ces éruptions pourraient être la cause de la couche d'iridium, étant donné que cet élément se trouve en quantités non négligeables dans le magma ; les émissions de gaz et de poussières auraient les mêmes conséquences que l'impact de la météorite... mais évidemment les mêmes problèmes restent.

Enfin, les autres hypothèses ayant une certaine cohérence relèvent plutôt de la paléontologie stricte, avec une connotation gradualiste. Ainsi il semble qu'à la fin du Crétacé une régression marine provoque une baisse générale du niveau des mers ; cet événement serait associé à une diminution de l'air de répartition des espèces vivant en eau peu profonde, à une baisse graduelle de la température de la surface des mers et à une continentalisation du climat. Pour d'autres, ce serait exclusivement le refroidissement général qui serait responsable des extinctions.

Le cas de la transition KT paraît exemplaire pour illustrer le renouveau du catastrophisme. Il y a une crise biologique majeure, spectaculaire. Plusieurs explications sont proposées, chacune argumentée scientifiquement, mais la plupart du temps de manière indirecte. Le catastrophisme se trouve en fait plongé dans un cadre conceptuel pauvre, étant donné qu'il veut répondre à une relation simple une cause/un effet. Le panorama ci-dessus montre qu'en fait bon nombre d'explications ne sont pas exclusives l'une de l'autre. On peut très bien concevoir qu'il y ait en même temps une régression marine, un refroidissement du climat, une chute d'une météorite géante et une éruption volcanique de grande ampleur ! On peut même imaginer que si crise biologique majeure il y a, elle est le résultat de la coïncidence temporelle de divers facteurs *a priori* indépendants, facteurs qui, isolément, auraient eu peu

de conséquences sur le vivant, et qui n'ont d'effet catastrophique que par leur regroupement temporel.

On arrive donc à se demander si, justement, ce type de catastrophisme ne correspond pas en plus à la vision simpliste des choses « à grand effet, grande cause ». Le gradualisme paraît plus facilement intégrer une vision systémique, considérant une multiplicité de facteurs qui, agissant chacun de manière minimale, n'ont d'effet spectaculaire que par coopération.

Le problème de l'explosion cambrienne

Pour les paléobiologistes, la crise KT n'est pas la seule catastrophe majeure paradigmatique. Celle du Cambrien, popularisée par Gould, fait actuellement couler beaucoup d'encre. En effet, cette fois-ci, s'ajoutent à la dualité catastrophisme/gradualisme d'autres couples comme cause intrinsèque/cause extrinsèque, ou encore déterminisme/contingence.

Tout part de la découverte en 1909 par le paléontologue américain Walcott, du gisement des schistes de Burgess (Colombie britannique, Canada), datant du Cambrien moyen (environ 520 Ma). Les animaux y sont trouvés en très grand nombre, et dans un état de fossilisation remarquable. Récemment, le travail est repris par le paléontologue anglais Whittington, aidé par ses deux étudiants Briggs et Conway Morris. L'interprétation donnée par le groupe anglais diffère profondément de celle provenant de Walcott. En effet, ce dernier, après avoir décrit bon nombre d'organismes, tenta à chaque fois de les classer à l'intérieur des embranchements connus de la zoologie, même si de temps à autre il fallait un peu forcer les choses. L'école anglaise procéda différemment. Quand les parentés étaient évidentes, l'intégration des fossiles dans les embranchements existants était naturellement réalisée. C'est ainsi qu'on compte actuellement, par ordre d'abondance : 44 genres d'arthropodes, 19 genres de plathelminthes, 18 genres d'éponges, 8 genres de lophophores, 7 genres de priapulidés, 6 genres d'annelides, 5 genres de cordés et d'hémicordés, 5 genres d'échinodermes, 4 genres de coelentérés, 3 genres de mollusques. Tout se passe donc comme si les embranchements majeurs constituant la faune actuelle existaient déjà. En particulier, les chordés étaient déjà représentés par un fossile désormais célèbre, *Pikaia*.

En revanche, certaines formes posaient réellement problème, ne paraissant apparentées à aucun organisme existant actuellement. Dans ces cas, Whittington et ses élèves proposèrent la création de nouveaux embranchements. Suivant l'interprétation britannique, tout se passe comme si, au Cambrien, il aurait existé alors plus de plans d'organisation – et donc d'embranchements – que maintenant. L'interprétation de la faune de Burgess devient donc complètement différente.

Pourtant cette manière de voir a été battue en brèche et fortement critiquée, certains des animaux auparavant considérés comme énigmatiques prenant place dans la classification traditionnelle. Ainsi, *Hallucigenia*, qui

reçut ce nom de par les cauchemars que sa structure faisait faire aux paléobiologistes, rejoignit sans problème l'embranchement des onychophores quand on réussit à le comparer à d'autres fossiles, ... et à l'orienter dans le bon sens. *Wiwaxia* est également un bon exemple de cette nouvelle conception. Gould le décrit de manière à faire émerger son étrangeté : « Mais si toutes ces observations avaient permis à Conway Morris de reconstituer le mode de vie de *Wiwaxia*, il ne put en revanche trouver de la même manière aucun indice convaincant d'homologie ou de lien généalogique avec aucun autre groupe d'organismes. Dépourvus de soies, d'appendices et de segmentation, *Wiwaxia* n'est ni un arthropode ni un annélide... *Wiwaxia* est encore un de ces organismes bizarres de Burgess, peut-être plus proche des mollusques que de tout autre embranchement moderne si l'on considère que sa mâchoire est l'homologue de la radula des mollusques – mais de toute façon, pas très proche. » Pourtant l'analyse reprise en 1991 par un paléontologiste américain prouve sans contestation possible que cet animal est un annélide polychète. Il convient bien sûr d'avoir à l'esprit la grande difficulté de reconstitution et d'interprétation de ces fossiles très anciens (520 Ma !), déformés par la schistosité. Néanmoins, on sent bien dans le discours de Gould le manque de prudence élémentaire relatif à l'élémentaire « je ne sais pas ».

Décimation et catastrophe

Pourquoi une telle emphase sur un sujet si controversé ? En fait, tout dépend du message que l'on désire faire passer. Pour Gould, le message est clair, et relève du catastrophisme. Il veut croire qu'au Cambrien, le nombre d'embranchements était supérieur à maintenant. Il veut donc voir deux crises biologiques importantes. La première a trait à la diversification brutale de l'ensemble des formes vivantes, ce que l'on a appelé « explosion cambrienne » ou encore « big bang de l'évolution animale ». En effet, le gisement antérieur le plus riche, celui d'Ediacara en Australie (environ 600 Ma), présente une pauvreté relative telle que le big bang a dû se passer vraisemblablement en 20 millions d'années – un processus se déroulant en 20 Ma étant considéré alors comme rapide.

La deuxième crise concerne la décimation, c'est-à-dire l'appauvrissement du nombre de plans d'organisation. Il est clair que plus le nombre d'embranchements inconnus est grand plus ces deux crises biologiques sont importantes. Pour illustrer son propos, Gould combat l'iconographie classique de l'évolution, celle du cône de diversité croissante, pour la remplacer par celle du double processus diversification/décimation (voir figure) : « La variété anatomique atteignit un maximum tout de suite après la diversification initiale des animaux multicellulaires. Dans l'histoire ultérieure de la vie, c'est l'élimination qui a eu cours, et non pas l'expansion. » En fait, Gould s'intéresse plus à la décimation qu'à la diversification parce qu'il veut démontrer l'importance de la contingence en évolution. Et si

la contingence est de type catastrophe, la démonstration n'en sera que plus exemplaire. Pour lui, la décimation ne se fait pas de manière darwinienne, mais bien plutôt de manière aléatoire. Pour lui, il n'y a pas de raison intrinsèque d'expliquer la disparition de tel groupe plutôt que tel autre. « Par hasard », il était là au mauvais moment. Il touche ici le côté typiquement historique de l'évolution, et il veut expliquer au public américain la version biologique du nez de Cléopâtre.

Le but de ce plaidoyer – tendancieux, comme nous l'avons vu – est parfaitement affiché à la conclusion du livre et vise à montrer sur quelle fantastique improbabilité a reposé l'apparition de l'espèce humaine : « [...] pourquoi les hommes existent-ils ? une bonne part de la réponse concernant certains aspects du problème dont la science peut traiter peut se formuler comme suit : parce que *Pikaia* a survécu à la décimation. Cette réponse n'invoque pas une seule loi de la nature ; elle ne repose sur aucun raisonnement au sujet de la prédictibilité de certaines voies évolutives ; ni sur aucun calcul de probabilité basé sur l'écologie ou les règles générales de l'anatomie. La survie de *Pikaia* a été contingente ; elle a relevé du rien que l'histoire. »

Quel renversement de situation en deux siècles ! Le catastrophisme de Cuvier était là pour asseoir un fixisme présentant l'homme comme résultat d'une création divine, donc inéluctable. Ici, le catastrophisme moderne tend à hypertrophier l'importance de la contingence, et donc à diminuer plus encore la probabilité de l'apparition de l'homme, alors que le gradualisme sert pour certains à prouver la marche inéluctable par complexité croissante vers l'homme.

Cause interne, ou cause externe ?

On peut se demander dans quelle mesure Gould a raison. Plusieurs arguments tendent à prouver que sa vision est exagérée. Tout d'abord, la faune de Burgess a été trouvée ailleurs, dans les grès de Chengjiang (Yunnan, Chine), ou encore au Groenland. La distribution de ces organismes était donc mondiale ; on comprend assez bien que la décimation – si décimation il y a – puisse toucher de manière aveugle un animal dont l'aire de répartition est restreinte. La contingence absolue est peut-être moins évidente quand l'animal a une grande aire de répartition.

Mais le point-clé qui permet de discuter le principe de la contingence absolue est de tenter de comprendre le pourquoi de la première crise biologique, celle de l'augmentation *a priori* brutale de la disparité. Deux explications sont actuellement proposées. L'une, externaliste, assez pauvre, tente de corréler l'apparition d'animaux de relativement grande taille par l'augmentation de la teneur en oxygène dans l'atmosphère, et donc dans l'eau. En effet, si la pression partielle de l'oxygène dissout est importante, ce gaz peut diffuser jusqu'au cœur d'organismes présentant une certaine épaisseur. L'autre, internaliste, corréle l'explosion cambrienne à l'apparition du complexe de gènes homéotiques.

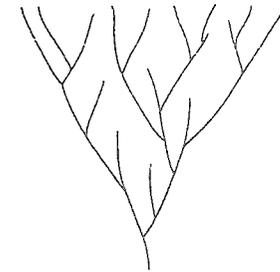
À l'exception de certains groupes comme les coelentérés (méduses, anémones de mer), tous les animaux appartenant aux grands embranchements sont des triblastiques, c'est-à-dire qu'ils possèdent trois feuillettes embryonnaires, l'ectoderme, l'endoderme et le mésoderme. Or les embranchements impliqués dans l'explosion cambrienne sont tous des triblastiques. Il se trouve que la génétique moléculaire du développement a récemment démontré que l'ensemble des animaux triblastiques actuels possèdent tous un complexe de gènes homéotiques qui, lors du développement embryonnaire, structure l'animal suivant son axe antéro-postérieur. Ainsi, quels que soient leurs plans d'organisation, les animaux actuels sont tous pourvus d'un même système génétique qui leur sert au cours de l'embryogenèse précoce. L'explication évolutive de cet invariant est qu'un tel système est hérité d'un ancêtre commun, ancêtre qui est obligatoirement antérieur à l'explosion cambrienne. Mais peut-on admettre qu'un système génétique ait pu être inventé plusieurs fois ? La solution la plus raisonnable est de considérer que l'invention a eu lieu une fois, et que cet événement a amené un tel avantage évolutif que les autres animaux ont été éliminés. Ainsi l'explosion cambrienne correspondrait à un jeu diversification/décimation qui se serait produit de manière synchrone. Le complexe homéotique amène, dans la limite de contraintes, une ouverture évolutive qui permet l'apparition de plans d'organisation très différents et les animaux qui n'ont pas acquis ce complexe se trouvent éliminés par compétition.

À l'intérieur d'un tel cadre, il est crucial maintenant de vérifier si la décimation postérieure à l'explosion cambrienne a eu réellement lieu. En effet, si, comme tout le laisse actuellement penser, il n'y a pas – ou peu – d'animaux étranges appartenant à des embranchements désormais disparus, on se retrouve, n'en déplaise à Gould, à l'intérieur d'un cadre normal de disparition d'espèces. Le problème lié au catastrophisme se trouve donc déplacé. Au lieu d'une décimation contingente non expliquée et postérieure à l'explosion cambrienne, c'est une décimation corrélée à une nouveauté évolutive qui apparaît. Le schéma proposé par Gould pour remplacer le cône de diversité croissante est toujours valable, mais ne correspondant pas à la même étape évolutive, et pas avec les mêmes paramètres. Ceux-ci deviennent internes, et explicables biologiquement, plutôt qu'externes et fortuits.

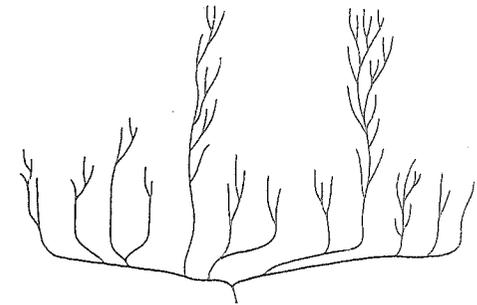
Vers un nouveau cadre conceptuel

On voit donc le débat se déplacer, et opposer ceux qui tentent d'expliquer les crises par des causes physiques – principalement des géologues –, à ceux qui privilégient la compétition entre groupes – principalement des biologistes. De plus, le concept de catastrophisme paraît être un concept flou. En effet, suivant les cas, on se trouve avec des idées contradictoires. Soit on est dans un cadre petite cause/grand effet (la présence

de l'homme n'est liée qu'à la survie de *Pikaia*), soit au contraire on cherche à expliquer de grands effets par de grandes causes (il faut une météorite gigantesque pour éliminer les gros dinosaures). Suivant les cas, l'explication est soit de type internaliste (apparition d'un caractère avantageux majeur, comme le complexe homéotique), soit de type externaliste (le feu du ciel ou le feu de la Terre). Enfin, le cadre est, du point de vue de la théorie des systèmes, conceptuellement pauvre (une cause, un effet), ou complexe (plusieurs paramètres se potentialisent pour produire un effet).



Le cône de diversité croissante, image habituelle de l'augmentation de la biodiversité au cours du temps. Cet arbre ne tient compte que des phylums qui ont des descendants vivant à l'époque actuelle.



Une représentation plus réaliste de l'histoire du vivant, tenant compte de la décimation et de la diversification.

D'un point de vue évolutif, ces discussions sont importantes. En effet, elles démontrent la difficulté de la reconstitution de l'histoire de la vie, et la relativité des différentes interprétations. Tout ce qui a été dit est localement valable. La contingence du vivant par rapport à son milieu est indéniabie. Personne ne nie que la surface des mers épicontinentales ait varié, que le climat ait changé, que des météorites soient tombées, et que des éruptions volcaniques aient eu lieu. Personne non plus ne nie l'apparition de caractères-clés amenant un avantage sélectif, comme la symbiose mitochondriale, le complexe homéotique ou les incisives

des rongeurs. La controverse porte plutôt sur les relations complexes existant entre tous ces paramètres, sur le poids relatif à accorder entre facteurs internes et facteurs externes, sur l'intrication entre contingence et potentialités évolutives. Il est vraisemblable que chaque crise biologique a son explication multivariable propre, qui nécessitera pour être comprise une approche par les modèles. Le dilemme ne sera plus, comme aujourd'hui entre « bad genes or bad luck », et on peut espérer que le catastrophisme deviendra alors bien relâché.

► BONIS L. DE. *Évolution et extinction dans le règne animal*, Paris, Masson, 1991. – BRIGGS D.E.G., ERWIN D.H. & COLLIER F.J., *The Fossils of the Burgess Shale*, Washington, Smithsonian Institution Press, 1994. – CONWAY MORRIS S., « Burgess shale faunas and the Cambrian explosion », *Science*, 1989, n° 246, p. 339-346. – GILBERT S.F., *Biologie du développement*, Bruxelles, De Boeck Univ., 1996. – GOULD S.J., *La Vie est belle*, Paris, Le Seuil, 1991 ; (dir.), *Le Livre de la vie*, Paris, Le Seuil, 1993. – HARTENBERGER J.-L., « Modalités des extinctions et apparitions chez les Mammifères du Paléogène d'Europe », *Mém. Soc. géol. France*, N. S., 1987, n° 150, p. 133-143. – LAURENT G., « Révolutions du globe », *Dictionnaire du Darwinisme et de l'Évolution*, 1996, p. 3683-3685. – LE GUYADER H., « Geoffroy Saint-Hilaire/Cuvier », *Dictionnaire du Darwinisme et de l'Évolution*, 1996, p. 1867-1883. – LEVINGTON J., « Le Big Bang de l'évolution animale », *Pour la Science*, Dossier hors série, janv. 1997, p. 48-55.

Hervé LE GUYADER

→ Actualisme ou uniformitarisme ; Cuvier ; Développement ; Espèce ; Fossile ; Lamarck ; Lamarckisme ; Orogenèse.

CATÉGORIES ET FONCTEURS MATHÉMATIQUES

Une naissance difficile

Le concept mathématique de catégorie est d'apparition récente : il émerge entre 1942 et 1945 des travaux d'Eilenberg et Mac Lane sur la théorie des groupes et la topologie algébrique. Les catégories voient le jour dans l'indifférence, voire l'hostilité générale. Formalisme creux et inutile, recherche vaine de l'abstraction pour elle-même, *abstract nonsense* : autant de qualificatifs que certains mathématiciens, heureusement de plus en plus rares, continuent aujourd'hui encore d'employer à leur propos. Mal leur en prend, car la théorie des catégories est devenue un des outils fondamentaux des mathématiques contemporaines, révolutionnant et transformant nombre de disciplines, de l'algèbre à la logique en passant par la géométrie algébrique.

Il ne convient pas de s'attarder longtemps sur la définition abstraite d'une catégorie, car elle est de ces formes pures qui ne prennent sens que pour autant que des intuitions et des objets précis leur correspondent. Il faut en voir l'origine dans un phénomène très

général : on ne considère plus aujourd'hui les différents objets mathématiques sans tenir compte des transformations auxquelles ils sont susceptibles de se prêter. Ainsi une même figure géométrique, la sphère par exemple, peut être abordée de plusieurs points de vue selon que l'on considère ses propriétés métriques (distances), différentielles (structure locale) ou topologiques (déformations) ; à chacun correspond une théorie particulière. En d'autres termes, les mathématiques modernes associent à leurs objets des familles de transformations ou « morphismes », cette association étant constitutive de la nature même des objets considérés.

Comme son nom l'indique, le concept de catégorie est très général ; à toutes les structures algébriques usuelles (groupes, anneaux, algèbres, espaces vectoriels, ...) sont associées des catégories, mais les structures ordonnées comme l'ensemble des entiers naturels sont également susceptibles de descriptions catégoriques. De manière générale, une catégorie est constituée par la donnée d'objets et de morphismes. Comme on s'y attend, la catégorie associée aux groupes finis aura par exemple pour objets les groupes finis et pour morphismes les morphismes de groupes, mais la définition de morphismes peut prendre des formes moins convenues : ainsi, la catégorie associée aux entiers naturels a pour objets... les entiers naturels, mais a pour morphismes les relations d'ordre partiel, une inégalité comme $3 \leq 5$ s'interprétant comme un morphisme de 3 à 5. À chaque morphisme sont associés deux objets appelés respectivement origine et but du morphisme ; deux morphismes peuvent être composés si l'origine de l'un coïncide avec le but de l'autre, cette composition devant satisfaire à certaines conditions (associativité, existence de morphismes « identité »). Cette définition permet déjà de saisir la teneur des polémiques qui ont accompagné le développement du formalisme catégorique. Euler savait que l'étude des déplacements des solides dans l'espace est une étude de transformations géométriques, quantifiables algébriquement et susceptibles d'être composées selon les mêmes règles que les morphismes dans les catégories. L'algèbre linéaire, la géométrie, la théorie des groupes ont longtemps manié diverses notions de morphismes sans que le besoin d'un formalisme comme celui des catégories se fit jamais sentir. D'où les réserves suscitées de prime abord par une théorie qui semble bien ne rien apporter sinon une terminologie nouvelle greffée sur des idées par trop familières. D'où aussi le statut paradoxal pour l'histoire des sciences des deux articles fondateurs de la théorie (Eilenberg S. & Mac Lane S., « Natural Isomorphisms in group theory », *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 1942, p. 537-543 ; « General Theory of natural equivalences », *Transactions of the American Mathematical Society*, 1945, p. 231-294), qui ont pu être jugés à peu près vides de contenu « objectif » tout en ayant opéré une véritable révolution dans la manière de concevoir les mathématiques.

Les catégories philosophiques

Le choix du mot « catégorie » pour désigner un certain type de configuration d'objets mathématiques n'est pas gratuit et a ses racines dans une longue tradition philosophique. Au-delà de l'arbitraire relatif propre aux choix terminologiques, les problèmes soulevés par la structuration catégorique de l'univers mathématique s'avèrent bien renvoyer aux recherches entreprises en théorie de la connaissance depuis la logique aristotélicienne. Pourtant, ces implications épistémologiques ont été peu étudiées, sans doute pour une grande part du fait des difficultés techniques inhérentes à la théorie. Aussi, faute d'une littérature constituée à laquelle renvoyer et dont faire l'exégèse, force est pour l'instant de se limiter à signaler des renvois et connexions entre les discours mathématiques et philosophiques sur la pensée catégorique.

On sait que les traités logiques d'Aristote réunis dans l'*Organon* ont une fonction propédeutique, conformément à une conception instrumentale de la logique qui a traversé l'histoire. Le traité des *Catégories*, le premier de l'*Organon*, porte sur les genres de l'Être. Les catégories en sont les *summa genera*, les genres les plus généraux : substance, quantité, qualité, relation, lieu, temps, position, possession, action, passion (Aristote, *Organon*, I,4). Du point de vue mathématique, les catégories aristotéliciennes au sens strict ont une portée beaucoup trop générale pour offrir aucune détermination intéressante des concepts ou contenus d'expérience scientifique. Aristote en est bien conscient, qui théorise la dissociation du savoir en sciences, chacune d'elles étant pourvue de principes qui lui sont propres, les mathématiques étant abordées essentiellement au livre M de la *Métaphysique*. Pourtant, sans quitter le terrain de la logique générale, les *post-predicamenta* et certains concepts dérivés de l'Être ont des propriétés d'universalité formelle que n'ont pas les catégories : « Puisque l'Un et l'Être se prennent en plusieurs acceptions, il s'ensuit nécessairement que leurs dérivés se disent aussi en ces mêmes acceptions, de sorte que le Même, l'Autre et le Contraire doivent varier selon chaque catégorie » (Aristote, *Métaphysique*, trad. introd. et notes J. Tricot, Paris, Vrin, 1986).

Aussi ces concepts : identité, altérité, différence, similitude, opposition... (Aristote, *Organon*, I,10 et sq. ; *Métaphysique*, Δ, 9 à 11) vont-ils se révéler plus pertinents que la table des catégories lorsqu'il va s'agir de comprendre la structure du savoir scientifique – on les retrouvera en particulier dans certaines remarques programmatiques de Leibniz, qui les met explicitement au cœur des relations entre logique et géométrie (Leibniz, *Specimen geometriae luciferae*, in *Mathematische Schriften, zweite Abteilung, Band III*, éd. Gerhardt [1863], Hildesheim, Georg Olms Verlag, 1971). La théorie mathématique des catégories permet dans de nombreuses situations de donner un contenu précis à certains de ces concepts, ainsi, par exemple, pour ce qui est de penser l'identité dans la différence. Une

difficulté conceptuelle majeure dans le travail mathématique est de réussir à identifier des objets distincts mais toutefois semblables sous un certain rapport ; la plupart des problèmes de classification se posent en ces termes. Une des réussites les plus exemplaires des techniques catégoriques est précisément le développement de méthodes systématiques d'étude des équivalences, en un sens très large, entre objets. Les résultats les plus surprenants d'algèbre, de géométrie ou de topologie contemporains reposent sur leur utilisation.

Un autre aspect de la pensée catégorique au sens philosophique est sa fonction taxinomique ; le vocabulaire des genres et des espèces en témoigne. À la manière de certains aspects du corpus aristotélicien, les catégories mathématiques s'organisent en une hiérarchie complexe et susceptible de descriptions organiques. Les transformations entre catégories, dites transformations fonctorielles ou plus communément foncteurs, codifient leurs rapports mutuels et structurent cette hiérarchie. On a insisté sur l'aristotélisme, mais l'étude dans une perspective catégorique de ces grands moments de la logique que sont les travaux de Leibniz sur les fondements ou celle de la distinction kantienne entre logique générale (celle de l'*Organon*) et logique transcendantale ouvrent à l'épistémologie autant de champs d'investigation, au sein desquels va peut-être se jouer le devenir de la logique mathématique, trop longtemps réduite à ses aspects purement analytiques. Les tentatives les plus significatives d'exploration des implications philosophiques des avancées en théorie des catégories sont dues à l'un des grands noms de la discipline : F.W. Lawvere. Son attention s'est portée en particulier sur des thèmes relevant en première analyse de l'univers conceptuel des *post-predicamenta* : « Je suis persuadé que, dans la prochaine décennie et le siècle prochain, les progrès techniques dus aux théoriciens des catégories serviront à la philosophie dialectique, en donnant une forme précise par l'intermédiaire de modèles mathématiques à d'anciennes distinctions philosophiques comme le général et le particulier, l'objectif et le subjectif, l'être et le devenir, l'espace et la quantité, l'égalité et la différence, le quantitatif et le qualitatif, etc. En contrepartie, un intérêt explicite des mathématiciens pour de telles questions philosophiques est nécessaire pour favoriser l'extension de l'enseignement et de l'utilisation des mathématiques (et des autres sciences) » (F.W. Lawvere, « Categories of space and of quantity », *Philosophical, epistemological and historical explorations*, Echeverria J. éd., Berlin, Walter de Gruyter, 1992). Toutefois, ces idées ont été accueillies avec scepticisme par la communauté mathématique et n'ont jusqu'ici guère eu d'échos.

La naturalité des transformations mathématiques

Lorsqu'en 1945 Eilenberg et Mac Lane introduisent le concept de catégoric, ils le conçoivent explicitement comme une prolongation du programme d'Erlangen (Klein F., *Le Programme d'Erlangen*,

Paris, Gauthiers-Villars, 1974). L'idée de Klein était de caractériser les espaces géométriques par les groupes de transformations associés. Eilenberg et Mac Lane se proposent d'étudier les objets mathématiques en corrélation avec les transformations ou morphismes associés à ces objets par telle ou telle théorie : de même que la géométrie selon Klein reconduit à l'étude d'invariants pour les groupes de transformations, la théorie des catégories s'intéresse au degré d'invariance d'un concept par les familles de morphismes autorisés. Cette idée que certaines structures présentent des propriétés de stabilité n'était d'ailleurs pas nouvelle et hantait depuis un certain temps déjà la pratique mathématique à travers l'adjectif « naturel » attribué ici ou là à telle propriété ou telle correspondance, mais elle n'avait pas trouvé jusque-là de formulation rigoureuse adéquate.

Les phénomènes de naturalité les plus familiers sont ceux liés à la dualité entre espaces vectoriels. Les physiciens les voient à l'œuvre au travers des propriétés de covariance et de contravariance tensorielles. L'isomorphisme familier entre un espace vectoriel de dimension finie et son bidual (le dual de son dual) a une propriété dite de naturalité : il peut être défini d'une manière uniforme (sur tous les espaces vectoriels simultanément) et compatible aux transformations linéaires (propriété de covariance). En revanche, si un espace vectoriel de dimension finie et son dual sont toujours en isomorphisme (ce sont deux espaces vectoriels de même dimension), cet isomorphisme n'est pas naturel : sa construction dépend essentiellement du choix de bases pour les espaces considérés. La théorie des catégories naît d'abord pour rendre compte de ce type de propriétés, dont l'ubiquité est tout de suite signalée par Eilenberg et Mac Lane. Il faut toutefois attendre 1952 et les travaux d'Eilenberg et Steenrod pour que l'efficacité des techniques catégoriques devienne manifeste avec la formalisation fonctorielle et axiomatique des théories topologiques connues sous le nom de théories homologiques (Poincaré, Brouwer, Hopf et *al.*), qui associent à un espace diverses familles d'invariants.

Finalement, « En un sens métamathématique [la théorie des catégories] fournit des concepts généraux applicables à toutes les branches des mathématiques abstraites et contribue ainsi aux tendances actuelles en faveur d'un traitement uniforme de diverses disciplines mathématiques » (Eilenberg & Mac Lane, « General Theory of natural equivalences », *op. cit.*). Cela s'est vérifié avec la théorie des groupes, pour laquelle le formalisme fonctoriel s'est révélé particulièrement bien adapté, permettant la transposition dans le cadre algébrique de méthodes topologiques et le développement systématique de la partie de l'algèbre dite homologique (Mac Lane, 1963). L'aspect le plus surprenant dans l'évolution des mathématiques contemporaines est bien cette intricance sans cesse plus forte de domaines traditionnellement distincts, au premier rang desquels l'algèbre, la topologie et la géométrie, dont certaines méthodes tendent à se confondre à la lumière de l'univers catégoriel et de techniques comme la

théorie des faisceaux (Leray, 1945 ; Cartan, 1948-1951). La théorie des faisceaux permet en particulier de formaliser les problèmes de passage du local au global).

Problèmes de fondements

Indépendamment de ses applications, la théorie des catégories a acquis une existence propre. En France, il convient de signaler tout particulièrement le nom d'Ehresmann parmi les fondateurs. Au début des années 1960, Lawvere s'est lancé, sur les conseils d'Eilenberg, dans le projet audacieux d'une refondation catégorique des mathématiques. Il a proposé dès 1964 une nouvelle axiomatisation de la catégorie des ensembles, avant de découvrir dans les années 1970 la signification logique d'un des concepts les plus prolifiques de la théorie : l'adjonction (on n'en précisera pas ici la définition. Il apparaît très naturellement dans la théorie des structures algébriques : la propriété fondamentale des deux transformations principales de la théorie, la formation d'objets libres et l'oubli de structure, est d'être l'une à l'autre adjointes). De fait, les opérations logiques élémentaires relèvent de tels phénomènes et, en dernier recours, sont mieux comprises dans le cadre catégorique que dans leur présentation classique. Ainsi, les notions d'implication, de conjonction, les quantificateurs universels et existentiels, y ont une interprétation élégante et convaincante.

En théorie des ensembles, l'axiomatique de Zermelo-Fraenkel avait longtemps laissé pendants deux problèmes : l'indépendance et la non-contradiction de l'axiome du choix et de l'hypothèse du continu. Cette dernière remonte à G. Cantor et affirme que tout sous-ensemble infini de l'ensemble des nombres réels est soit le cardinal de l'ensemble des réels, soit dénombrable (de même cardinal que l'ensemble des entiers naturels). Gödel (1938) avait montré la non-contradiction relative de l'axiome du choix et de l'hypothèse du continu, mais il fallut attendre 1963 et la méthode dite du *forcing* de Cohen pour que l'indépendance soit démontrée. Lawvere et Tierney allaient ensuite prouver que la technique de *forcing* se réexprime, de manière plus simple, dans une variante catégorique de la théorie de Leray des faisceaux : les *topoi*. Indépendamment de l'exploit conceptuel ainsi réalisé, le plus surprenant rétrospectivement est une fois encore le caractère unificateur des avancées accomplies. La notion de *topos* est née de la réélaboration par Grothendieck des concepts classiques de topologie et de faisceau dans le cadre de la géométrie algébrique. Les travaux de Lawvere et Tierney la révèlent être au cœur des problèmes de fondements, l'édifice des mathématiques s'avérant ainsi bien plus cohérent qu'on ne l'avait soupçonné. Des méthodes d'origine topologique servent de fondement ultime à la théorie des ensembles, laquelle ne peut plus désormais prétendre délimiter le terrain et les enjeux de la philosophie mathématique.

Dernier coup de théâtre : dans le contexte des *topoi*, le calcul des valeurs de vérité suit les règles du calcul

des propositions intuitionnistes. La logique intuitionniste, qui remonte aux travaux de Brouwer au début du siècle, revient ainsi sur le devant de la scène mathématique après une longue période de marginalité, due pour une bonne part à l'intransigeance épistémologique de ses partisans. Elle insiste sur le caractère constructif des démonstrations et, typiquement, exclut les preuves par l'absurde ; ses modèles sont d'origine topologique – ce qui explique au passage que les règles de calcul intuitionnistes se retrouvent dans les *topoi*.

Malgré leur universalité et leur caractère originaire, les intuitions qui sous-tendent ces avatars topologiques et logiques de la théorie des catégories sont plus délicates à acquiescer que celles qui sous-tendent la logique mathématique usuelle. Il faut peut-être voir là une illustration des difficultés de principe rencontrées par la pensée lorsqu'elle est, comme dans la phénoménologie husserlienne, en quête d'intuitions originaires et d'une logique ou d'une ontologie sans compromis.

► ARISTOTE, *Organon*, trad., introd. et notes J. Tricot, Paris, Vrin, 1984 ; *La Métaphysique*, trad., introd. et notes J. Tricot, Paris, Vrin, 1986. – CARTIER P., « Logique, catégories et faisceaux », *Sém. Bourbaki*, 30^e année, 1977/1978, vol. 513. – EILENBERG S. & MAC LANE S., *Collected Works*, Orlando, Academic Press, 1986. – LAWVERE F. W., SCHANUEL S. H., *Conceptual mathematics. A first introduction to categories*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1997. – MAC LANE S., *Categories for the working mathematician*, New York, Springer-Verlag, 1971. – MAC LANE S. et MOERDIK I., *Sheaves in geometry and logic. A first introduction to topos theory*, New York, Springer-Verlag, 1992. – SCHUBERT H., *Kategorien*, New York, Springer-Verlag, 2 vol., 1970.

Frédéric PATRAS

→ Axiomatisation et formalisation ; Ensemble ; Géométries ; Structure ; Topologie.

CAUCHY Augustin Louis, 1789-1857

Académicien, professeur à l'École polytechnique, royaliste intransigeant et catholique plus qu'ardent, travailleur infatigable, Augustin Louis Cauchy écrit 800 articles et mémoires, et son *Cours d'analyse* et ses *Leçons*, tirées de ses cours, restent encore à ce jour la base de notre enseignement d'analyse. Tenter d'évaluer l'œuvre mathématique de Cauchy est aujourd'hui une tâche insurmontable. Elle touche à tous les domaines des mathématiques, et devient le modèle de la rigueur scientifique, et la source de nombreux développements pour les mathématiciens du XIX^e s.

Il fonde en particulier notre calcul infinitésimal sur la notion de limite. La définition – aujourd'hui classique – lui permet en quelque sorte de contrôler les infiniment petits en les rendant plus petits que toute quantité numérique donnée, et son mode opératoire de les éliminer complètement des mathématiques. Elle lui permet aussi de définir dérivées et intégrales, de construire le lien entre les deux, et de repenser la continuité d'une fonction. La formule de Taylor ne devient

plus qu'une conséquence de sa notion d'intégrale. Ses soucis de rigueur l'amènent à préciser les critères de convergence nécessaires à l'existence des séries.

L'étude des invariances d'une fonction à plusieurs variables par permutation de ses variables, son calcul des substitutions, jouent un rôle fondamental dans l'apparition du nouveau champ de recherche que deviendra la théorie des groupes, dès lors que l'on s'intéressera à dégager les structures propres à ces combinaisons.

● *Œuvres*, Paris, Gauthier-Villars, 2 séries, 27 vol.

► BELHOSTE B., *Cauchy, a Biography*, New York, Springer-Verlag, 1991. – DAHAN-DALMEDICO A., *Mathématisations. Cauchy et l'école française*, Paris, Librairie Blanchard, 1993.

Jean-Pierre SURTO

→ Analyse complexe ; Analyse fonctionnelle ; Équation ; Groupes et symétrie ; Local et global ; Topologie.

CAUSALITÉ (Principe de)

PHYSIQUE

La théorie aristotélicienne de la « nature » (*physis*) pré-supposait un partage tranché dans l'ordre du monde (cosmos) : le monde des astres (supralunaire), objet des observations des astronomes, faisait apparaître la régularité et la perfection de mouvements circulaires éternels en droit intégralement explicables par l'arithmétique et la géométrie. Aristote (385-322 av. J.-C.) imputait cette perfection au caractère divin des astres et en concluait qu'ils n'étaient pas constitués de la même matière que les réalités de notre monde (sublunaire). Il donnait à ce feu divin le nom d'« éther ».

Notre monde, lui, se présentait à l'observation comme celui du « devenir », de la génération et de la corruption, le monde du changement dont les « éléments » ultimes de tous les corps sont constitués par la terre, l'eau, l'air et le feu, correspondant aux quatre qualités sensibles : froid, humide, sec, chaud. Ces deux mondes se trouvaient donc soumis à des lois différentes. Deux mondes : deux sciences. Et la physique, proprement dite, ne pouvait concerner que le second. Quel était ainsi l'objet essentiel de cette science ? Le changement. Or pour en rendre compte, Aristote avait élaboré une très subtile théorie de la causalité, qui distingue et combine quatre types de causes.

Il le fait comprendre en utilisant des analogies empruntées au domaine de l'art – au sens large de *techné* (beaux-arts et techniques). Parmi ces analogies, celle de l'art médical occupe une place de choix. Un médecin ne saurait agir que s'il a d'abord l'idée de la fin qu'il poursuit, rétablir la santé du patient. « cause finale » ; mais l'idée de cette fin, la santé, est constituée par une forme, jugée bonne de l'organisme, « cause formelle » ; pour l'établir chez le malade, il faut qu'il dispose de certaines substances, les médicaments (*pharmakon*), appropriés à son organisme, « cause

matérielle » ; et enfin il faut qu'il les administre au malade, « cause efficiente ».

L'analogie médicale montre bien qu'il existe une hiérarchie parmi ces causes : c'est la cause finale qui prime, avec la cause formelle qui lui est indissociablement liée, la cause efficiente leur est subordonnée. Cet ensemble de « causes » s'oppose à la cause matérielle qui favorise ou non leur action selon qu'elle est, ou non, appropriée aux deux premières. D'où cette version simplifiée de l'aristotélisme : c'est la forme qui « informe » la matière, laquelle apparaît passive – voire résistante – au regard de l'activité de la première. Tout être naturel individuel se trouve ainsi constitué d'une matière et d'une forme qui s'y actualise plus ou moins parfaitement.

Tout changement naturel, et non plus « artificiel », est supposé se soumettre à ce modèle, relever du même type d'analyse. C'est le cas, en particulier, du « mouvement local », mouvement de translation, des corps sur Terre. Aristote s'appuie sur l'observation : il y a des corps lourds et des corps légers. Ceux qui sont lourds tendent naturellement à tomber vers le bas – c'est-à-dire vers le centre de la Terre ; ceux qui sont légers tendent naturellement à rejoindre le haut – c'est-à-dire le Ciel. Pour lui, ce sont des qualités absolues qui correspondent à la composition matérielle des corps – la terre et l'eau sont lourdes, l'air et le feu légers. Chaque corps tend à rejoindre son « lieu propre » où se réalise complètement sa « forme » propre. Il y a dans le monde des directions absolues. Ceci vaut pour les mouvements « naturels » sur Terre. Et se trouve au demeurant confirmé par les mouvements dits « violents », c'est-à-dire contrariés : si je lance une pierre vers le ciel, elle ne manquera pas de retomber au bout d'un certain temps puisqu'elle est « lourde ».

Dans une telle physique, sous le nom de « causalité » règne ainsi la « finalité », laquelle s'intègre à un grandiose ordre cosmique hiérarchisé où le mouvement de l'ultime sphère céleste, mue par un Premier moteur immobile, entraîne tous les autres.

Il va de soi, dans ces conditions, qu'aucun mouvement sur Terre ne peut faire l'objet d'une étude géométrique. Le mouvement est défini par son « moteur », ce qui induit la forme à se réaliser pleinement.

Or, avec Galilée (1564-1642), voici la grande nouveauté. Elle tient en deux thèses essentielles qui brisent le cosmos aristotélicien. La première, issue de l'observation de la Lune grâce à la lunette qu'il utilise en 1609, consiste à établir non seulement la justesse du modèle héliocentrique proposé par Nicolas Copernic (1473-1543) dans son célèbre *De revolutionibus orbium caelestium* (1543), mais l'unité de la nature, une unité qui n'est plus d'ordre analogique ou allégorique comme pour les adeptes de la magie naturelle à la Renaissance mais réelle : s'il y a, comme il le rapporte dans le *Messenger Céleste* (1610), des montagnes et des océans sur la Lune, si la Lune apparaît très semblable à la Terre, alors il faut admettre que les astres ne sont point « divins », qu'ils sont constitués de la même matière que notre planète. Galilée en tire la conclusion

immédiate que la même physique s'applique sur la Terre comme aux Cieux.

Cette seconde thèse est exprimée dans un autre texte très célèbre en 1623, *Il Saggiatore* (*L'essayeur*) : « La philosophie est écrite dans cet immense livre qui se tient toujours ouvert devant nos yeux, je veux dire l'Univers, mais on ne peut le comprendre si on ne s'applique pas d'abord à en comprendre la langue et à connaître les caractères avec lesquels il est écrit. Il est écrit en langue mathématique... et ses caractères sont des triangles, des cercles et autres figures géométriques... »

Contre Aristote, Galilée se réfère à Platon et entreprend de géométriser le mouvement sur Terre. Le mouvement n'est pas imputable à une qualité intérieure des corps. Les corps ne se meuvent pas. Ils se trouvent en mouvement les uns par rapport aux autres. Dire d'un corps qu'il est en mouvement ce n'est plus, comme Aristote le pensait, dire qu'il cherche le repos, c'est affirmer qu'il s'établit entre lui et un autre considéré comme immobile une relation de mouvement. Galilée énonce ainsi le premier principe de relativité en physique. Et c'est par cette voie qu'il peut donner la première formulation trébuchante du principe d'inertie au prix d'un extraordinaire effort d'abstraction qui assimile le mouvement d'une bille sur un plan incliné à un mouvement de chute libre dans le vide. Les victoires qu'il remporte, coordonnées aux travaux de Kepler (1571-1630), de Huyghens (1629-1695) et de Descartes (1596-1650), contribuent à rejeter toute idée de « cause finale » comme relevant de l'obscurantisme médiéval. Dès lors va tendre à s'imposer l'idée que la connaissance scientifique d'une réalité quelconque consiste à écarter toute considération de finalité au bénéfice de la causalité.

Mais cette causalité va se trouver d'emblée réduite à une forme mécanique. Descartes et ses disciples y ont grandement contribué. Le mathématicien et philosophe français, qui admire l'œuvre scientifique de Galilée mais trouve sa philosophie un peu courte, entreprend en effet de montrer qu'une physique n'est possible que si l'on réduit tout corps à sa figure et à son mouvement, abstraction résolument faite de toutes les autres qualités qui frappent nos sens et nos imaginations (dureté, couleur, odeur, « espace intérieur »...). Dès lors, la cause du mouvement d'un corps devra toujours être rapportée au contact de ce corps avec un autre qui lui communique son mouvement. En 1644, les *Principes de la philosophie* dressent le tableau d'une physique complète imaginée sur cette base. Avec cette conception « mécaniste » de la causalité, une image des relations de cause à effet va s'imposer comme une évidence, comme une idée « simple », pour des décennies : l'image du « choc ». Gaston Bachelard (1884-1962) a montré, dans des pages célèbres, qu'il s'agissait en réalité d'une monstruosité épistémologique, laquelle allie subrepticement des notions de géométrie euclidienne et une conception (corpusculaire) de la matière. Pour montrer la persistance de cette conception, l'épistémologue français cite Georges Cuvier

(1769-1832) qui écrit cinquante ans plus tard : « Une fois sortis des phénomènes de choc, nous n'avons plus d'idées nettes des rapports de cause à effet. » Le plus étonnant dans cette persistance vient sans doute de ce que cette image ait survécu à l'avènement de la mécanique newtonienne, et qu'on ait même pu considérer qu'elle s'en trouvait confortée.

Venons-en donc à Isaac Newton (1642-1727) qui achève de poser les bases de la physique moderne. La première partie de ses *Principia* expose les définitions et axiomes de la « mécanique rationnelle ». Or, d'entrée de jeu, Newton qui se situe dans la perspective mathématisante de Galilée, réintroduit dans la mécanique la notion de « force ». La géométrie, laquelle n'est à ses yeux que la « partie de la mécanique qui sert à démontrer l'art de mesurer », ne saurait constituer à elle seule une mécanique rationnelle. Il faut lui adjoindre une dynamique, une théorie des forces qui produisent les mouvements observés. « La mécanique rationnelle sera la science et des mouvements quelconques et des forces qui sont requises pour des mouvements quelconques. » Et il distingue la force d'inertie, « force de résistance par laquelle tout corps, autant qu'il le peut, persévère en son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme » ; la force « imprimée » qui est « l'action qui s'exerce sur un corps pour en changer l'état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme », puis la « force centripète » – celle qui attire les corps de toutes parts, les pousse ou leur confère quelque tendance que ce soit, vers un point comme vers un centre. Newton invente le « calcul infinitésimal » et présente ses résultats sous les espèces d'une fonction différentielle qui lui permet notamment de rectifier la formulation galiléenne du principe d'inertie.

Sur cette base, Newton réussit à rendre compte non seulement des mouvements des corps sur Terre, mais aussi de ceux des astres les plus éloignés dans le cadre de la théorie de la gravitation universelle. C'est la même force qui retient la Lune sur son orbite et la pierre que l'on fait tourner au bout d'une fronde. Mais le savant anglais est très conscient de la difficulté de sa position et sait à quelles critiques il s'expose. Il lui faut en effet admettre qu'une fonction différentielle qui décrit l'action de la force « pas à pas », d'instant en instant, puisse rendre compte des relations de corps, les astres, qui se trouvent les uns par rapport aux autres situés à des distances immenses. Il s'agit d'un véritable coup de force. Voilà pourquoi il doit imaginer, dans l'espace absolu qui s'étend entre les astres, l'existence d'un fluide subtil – l'éther – qui puisse en définitive mettre les corps « en contact » malgré le « vide » supposé régner entre eux. Dans le *Scholium* ajouté au Livre III de son ouvrage, comme dans son *Optique*, il doit faire appel à Dieu, « seigneur de l'Univers », pour élucider, si l'on peut dire, ce mystère. On sait qu'il explora toute sa vie, secrètement, une autre voie : celle de l'alchimie. Ses adversaires cartésiens et leibniziens du continent ne se priveront pas de l'interpeller : n'était-il pas en train de restaurer des conceptions

médiévales, aristotéliennes finalistes ? Il réplique d'avance : je ne sais rien de la nature de cette force, et, à son sujet, je ne « feins pas d'hypothèse ». Je sais que je peux en calculer l'action, en réduisant tous les corps à des « points matériels » entre lesquels elle s'exerce. Je formule des lois, sans être en mesure de désigner des « causes » ; et lorsque j'invoque l'action de Dieu, je ne suppose pas qu'il soit « l'âme du monde ».

Ses nombreux disciples et admirateurs physiciens oublieront cette réserve, et perdront de vue le mystère de l'action immédiate à distance que seul Albert Einstein (1879-1955) saura lever. Pire, c'est la force d'attraction qui leur paraîtra le prototype, le modèle, de toutes les forces physiques. Faire œuvre de science, ce sera donc, pour eux, en tout domaine, réduire tout corps à un point matériel et calculer les forces qui s'exercent en ligne droite entre ces points, en considérant la nature de ces forces comme intégralement mécanique. Deuxième âge du mécanisme qui voit l'image du choc connaître paradoxalement une nouvelle carrière. Le « principe de causalité » se traduit par un impératif désormais catégorique : expliquer tout phénomène selon les lois de la mécanique rationnelle. Mais les difficultés n'ont pas tardé à s'accumuler : comment rendre compte, par exemple, selon ce schéma de la propagation des ondes électromagnétiques dont on sait depuis Oersted (1820) et surtout Faraday (1791-1867) qu'elles ne se propagent pas en ligne droite, mais provoquent sur une aiguille un mouvement de rotation ? Comment expliquer les phénomènes de transformation de la chaleur en mouvement dès lors que l'on découvre à partir de 1850 qu'ils sont irréversibles... ? Le « mécanisme » est ainsi mis en procès, dès le milieu du XIX^e s. Ce « procès » a donné lieu, en Allemagne, à un regain de ce qu'on appelait depuis le début du siècle « philosophie de la nature » (Naturphilosophie). L'expression avait été lancée par le philosophe Friedrich W.J. Schelling (1775-1854) qui déjà invoquait les phénomènes électriques et magnétiques pour récuser les présupposés « mécanistes » des newtoniens. Le romantisme allemand s'est nourri de cette contestation dont on ne trouve guère l'écho dans le très littéraire romantisme français, sinon chez Jules Michelet (1798-1874) ; mais on trouve en revanche la trace en médecine dans l'œuvre de Franz Anton Mesmer (1734-1815), l'inventeur fantasque du « magnétisme animal », la future « hypnose » que la France révolutionnaire et républicaine accueillit à bras ouverts, avant que la médecine hospitalière de la fin du siècle ne la rejette sur ses marges.

Mais l'idéal newtonien de la science restait si puissant qu'on trouva une solution de repli, qui faisait, c'est le cas de le dire, la part du feu. Newton ne s'était-il pas refusé à forger des hypothèses au sujet de la force d'attraction ? Auguste Comte (1798-1857) en France, puis Ernst Mach (1838-1916) en Autriche en tirent avec beaucoup d'autres cette conclusion : l'esprit scientifique doit se détourner de la recherche des « causes » des phénomènes – que ces causes soient des êtres « surnaturels » comme le supposent les esprits

théologiques ou des entités abstraites comme l'imaginent les esprits métaphysiques par critique des précédents. La science commence dès lors qu'on se contente de constater des faits, de relever les régularités qui les relient et de les formuler mathématiquement sous la forme de « lois » selon les règles de l'Analyse. La *Mécanique Analytique* de Joseph Lagrange (1736-1813) restera un modèle. D'où cette rengaine : la science ne s'interroge pas sur le pourquoi des phénomènes, elle se borne à établir leur comment.

Le positivisme qui a dominé la pensée scientifique depuis plus d'un siècle, sous diverses versions, n'a cessé de répéter ce credo, qui exclut la notion de causalité de la pensée scientifique pour n'y retenir que la notion de « légalité ». Mais le développement effectif de la physique elle-même a rendu cette position littéralement intenable. Cela s'est manifesté au grand jour dès lors que l'on a abordé l'étude de la matière au niveau sub-atomique. Non seulement on appréhendait un monde de réalités inobservables à l'œil nu, mais surtout il apparut que, dès lors qu'on y entreprenait de les mesurer on agissait sur elles, et qu'on les perturbait au point de ne pouvoir distinguer entre l'effet de la mesure et la « chose » qui était supposée être son objet. Les débats qui entourent le (mal) dit « principe d'incertitude » (1927) de Werner Heisenberg (1901-1976) ne sont pas clos. Le « déterminisme » se trouve toujours en question.

Bachelard soulignait, il y a déjà près d'un demi-siècle, qu'il y avait maladresse. Et que le malentendu tenait en définitive à la notion de causalité « naturelle » acceptée par la pensée occidentale depuis ses premiers pas scientifiques. Ladite pensée s'est trouvée entraînée à penser la causalité sous les espèces du « choc schématisé » entre des corps conçus sur le modèle des boules de billard, et elle a constamment oscillé entre deux positions : soit inscrire ce schéma dans la nature (Locke) soit en faire un schéma de la pensée humaine (Hume, Kant). Dans les deux cas, ne s'agissait-il pas en définitive d'affirmer une maîtrise absolue de l'homme sur le monde, ce qui supposait à tout le moins l'extériorité de l'un par rapport à l'autre ? Ne sommes-nous pas contraints aujourd'hui de reconnaître qu'en réalité notre science est toujours située dans le réel ; qu'elle y est engagée, et donc limitée par la manière que nous avons de nous y prendre, nous autres êtres humains, avec lui. Nous devons nous y faire : nous n'occuperons jamais par rapport à l'univers la place que nous imaginons être celle de Dieu. Nous déterminons - c'est-à-dire d'abord délimitons et façonnons - les phénomènes que nous étudions en fonction de nos connaissances acquises et des moyens dont nous disposons. Nous ne découvrons donc pas « les lois de la nature », mais nous énonçons des « lois physiques » - les lois de notre physique - qui, toujours, ont prélevé sur le réel, à des échelles différentes, la part qui nous en semble accessible. Le principe général, selon lequel à tout effet naturel on doit toujours trouver une cause naturelle, se spécifie selon le type des réalités auxquelles nous avons à faire. Il n'y a

pas dès lors à s'étonner que nous puissions former l'idée de différents modes de causalité. Et il y a lieu de se réjouir que nous puissions toujours en découvrir de nouveaux. C'est ce qu'on appelle le « progrès » scientifique.

Il y aurait sans doute lieu de rendre toute sa force à la formule de Baruch Spinoza (1632-1677) « Causa sive ratio » (« cause c'est-à-dire raison ») : ce que nous identifions comme « cause » n'est jamais ce qui satisfait la rationalité scientifique à un moment donné, en fonction des instruments dont elle dispose et des objets qu'elle se donne. Spinoza dénonçait notre « anthropomorphisme ». Le Dieu que nous imaginons créateur de l'Univers n'est-il pas conçu à notre image, doté des facultés qui sont les nôtres (entendement, volonté...) ? Les physiciens n'ont-ils pas trop bien entendu la leçon en croyant pouvoir s'installer à sa place ? Certaines discussions sur le Big Bang le donnent à penser. Mais l'auteur de l'*Éthique* rapportait en dernière analyse ce défaut de pensée à un autre, plus profond, presque indéracinable : notre « anthropocentrisme ». Nous autres humains nous croyons volontiers que la nature est faite à notre usage. Les difficultés que nous éprouvons à nous détacher de la conception mécaniste de la causalité ne tiennent-elles pas à ce que nous avons, chacun pour nous-mêmes, l'expérience d'être nous-mêmes « causes » d'actions que nous déclenchons. Et nous voudrions, à tout prix, que la nature, par le miroir qu'elle nous tendrait, nous garantisse que nous maîtrisons bien, intégralement, la causalité de nos actes. De ce qui, dans la détermination de ces actes, nous échappe toujours nous ne voulons rien savoir. Notre désir de puissance s'affirme alors comme la négation de la conscience qui affleure de notre impuissance ; n'est-ce pas ce désir, sur fond de désespoir, que nous investissons obstinément dans l'idée mécaniste de la « causalité » ? C'est parce que nous voudrions tant être « maîtres de nous-mêmes » que nous saisissons la première idée qui nous permet de croire que nous pouvons être « maîtres de l'univers ».

► ARISTOTE, *Physique et métaphysique*, Paris, PUF, 1972. - BACHELARD G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934 ; *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951. - COHEN-TANNOUDJI G., *La matière espace-temps*, Paris, Fayard, 1986 ; *Les constantes universelles*, Paris, Hachette, 1991. - COMTE A., *Cours de philosophie positive*, Paris, Hermann, 1990. - DAHAN DALMEDICO A., CHABERT J.-L. & CHEMLA K. dir., *La querelle du déterminisme. Le débat*, Paris, Gallimard, 1990 ; *Chaos et déterminisme*, Paris, Le Seuil, 1992. - DUHEM P., *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, rééd., Paris, Hermann, 1959. - HEISENBERG W., *Physique et philosophie*, trad. fr., Paris, Albin Michel, 1961. - HUTIN S., *Les gnostiques*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1978. - KOYRÉ A., *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1979. - LECOURT D., « Franz Anton Mesmer », Actes du Colloque de la Villette des 24 et 25 février 1993, *La pensée scientifique et les parasciences*, Paris, Albin Michel, 1993 ; *À quoi sert donc la philosophie ?*, Paris, PUF, 1993. - NEWTON I., *L'optique*, trad. de l'angl. J.-P. Marat (1787), précédé de *La lumière aujourd'hui*, trad. F. Balibar, et suivi de *Études sur l'optique newtonienne*, trad. M. Blay, Paris, C. Bourgeois, 1989. - SCHELLING F.W., *Idées pour une*

philosophie de la nature. Introduction à l'étude de cette science, rééd., Paris, Aubier, 1946. - SPINOZA B., *L'éthique*, in *Œuvres complètes*, Paris, Gallimard, 1954. - VERLEY L., *La malle de Newton*, Paris, Gallimard, 1993. - VIENNOT L. & DEBRU C., *Enquête sur le concept de causalité*, Paris, PUF, 2003.

Dominique LECOURT

→ Causalité classique ; Chaos et déterminisme ; Élément ; Force ; Gravitation ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Mouvement ; Naturphilosophie.

CAUSALITÉ CLASSIQUE

PHYSIQUE

Les termes « cause » et « effet » font partie depuis toujours du langage courant et il n'est pas nécessaire d'en donner une définition préalable. Mais le mot « classique » est en revanche beaucoup plus ambigu. L'homme de lettres l'opposera à « romantique », ou encore « moderne », comme caractéristique d'un style clair et ordonné plus ou moins daté, tandis que le scientifique l'opposera à « contemporain » ou même « quantique », comme la détermination d'un ensemble de concepts et de méthodes d'un champ scientifique bien défini mis en place à partir du XVII^e s., appelé aujourd'hui « physique classique ».

Dans cette dernière acception, la causalité classique désigne un rapport simple fondé principalement sur la notion de « force », dans lequel l'extériorité et l'antériorité de la cause par rapport à l'effet sont devenues aussi évidentes que lorsqu'on voit un individu donner un coup de poing à un autre, malgré l'existence d'actions à distance. Elle s'oppose à une causalité contemporaine plus formelle et plus mystérieuse contenue dans un appareil mathématique qui régit aujourd'hui des « champs » et des « potentiels ». L'antériorité chronologique laisse alors place à l'antériorité logique de l'équation. La façon dont le processus de mesure intervient dans le résultat obtenu, dès que le phénomène est de nature quantique, bouscule par ailleurs profondément l'idée d'une causalité qui pourrait être simplement observée de l'extérieur. Le classicisme apparaît alors de toute façon comme un rêve, hélas impossible, de clarté et de simplicité.

On opposera également bien sûr l'époque classique à son passé antique et médiéval dans une confrontation qui permet, en ce qui concerne la science de la nature, de dégager un autre critère de simplicité. Car on désigne d'emblée la causalité de la physique classique comme celle qui est rationnelle par rapport aux causalités magique, astrologique ou alchimique encore en vigueur au XVII^e s. La causalité classique est alors celle qui est limitée à des liens reproductibles entre deux phénomènes quantifiables. L'évidence de ce lien, dû à sa reproduction facile, n'implique une relation causale que par la force de l'habitude et d'un certain anthropomorphisme, diront plus tard les philosophes critiques qui, tel David Hume, succèdent précisément à cette

époque du rêve classique. La causalité ne peut cependant pas être éliminée des sciences de la nature dont le but est d'expliquer, de donner du sens, avant de prévoir. Les philosophes de la Nature essaieront d'éviter les excès contraires d'une causalité trop pleine de type magique et du scepticisme.

Mais cette causalité classique, qui est celle que nous apprenons à l'école comme provenant de Galilée et Newton, se construit à l'intérieur d'un domaine scolastique d'origine aristotélicienne qui est déjà un univers de rationalité dont sont exclues l'astrologie et l'alchimie. C'est cette émergence, moins connue, qui est intéressante en ce qu'elle est à la fois une libération et un appauvrissement de la notion de cause.

Il nous faut alors interroger Galilée, Descartes, Newton et Leibniz plutôt que nos manuels de physique classique. Le scientifique se souvient avoir entendu dire que Galilée remettait le problème des causes à plus tard, traitant du « comment » plutôt que du « pourquoi », mais que Newton avait fondé un véritable système dynamique causal grâce au concept de force. Le philosophe invoquera plutôt le « mécanisme » cartésien ou bien la « dynamique » de Leibniz et sa métaphysique de la force. On voit déjà apparaître une diversité troublante, voire gênante, par rapport au but proposé. Nous allons essayer d'y mettre un peu d'ordre.

Cause et changement

Aristote avait tenté de mettre de l'ordre, lui, dans les différents mouvements des corps terrestres, si différents de ceux des corps célestes. Les causes aristotéliciennes du mouvement sont de deux sortes : naturelle ou violente, qui s'excluent mutuellement. La pierre qui tombe ou le feu qui monte sont animés d'un mouvement naturel qui est l'accomplissement de leur être, l'actualisation du meilleur de leur possibilité. Lorsqu'ils en sont détournés par violence, cela ne peut se faire que par contact, dans un univers où le vide n'existe pas. On a l'habitude de parler de cause finale dans le premier cas, de cause efficiente dans le second, bien que les rapports des différentes sortes de causes soient, chez Aristote, plus subtils que ne le dit l'image habituelle des quatre causes d'une statue de Diane. La cause formelle est certainement présente dans le mouvement naturel et la cause efficiente est bien différente de l'évidence avec laquelle nous nous représentons aujourd'hui le contact d'un corps en mouvement sur un autre corps, comme un coup de poing ou un coup de burin sur le bronze d'une statue. Les scolastiques auront d'ailleurs plus de mal à percer le mystère de la cause motrice par action d'un autre corps, celle qui nous semble aujourd'hui à la fois la plus rationnelle et la plus objective, que les autres. Cette fausse évidence pour nous provient justement du fait que ce type de causalité forme le cœur de la causalité classique à laquelle nous sommes encore habitués. Thomas d'Aquin donne, au XIII^e s., une place centrale au problème de la nature de la cause efficiente en s'interrogeant sur sa place dans l'« agent » (qui agit) et

le « patient » (qui subit) ainsi que sur ce qui est transmis, « forme ou être ». La cause peut être dans l'agent, mais elle n'est pas l'agent. Lorsque les classiques se demandent, plus tard, comment une boule transmet son mouvement à une autre, leur interrogation se situe dans un tout autre registre, mais elle subsiste comme interrogation sur la cause elle-même. La différence est que l'on cherche en réponse un mécanisme et non plus une catégorie qui définirait un genre d'être. La question « pourquoi » se rapproche de la question « comment » et s'éloigne de la question ontologique « qu'est-ce que c'est » dont les réponses par des mots ne satisfont plus nos physiciens-géomètres. La cause se confondra alors avec l'agent.

La physique classique du mouvement est par ailleurs caractérisée par le fait que le mouvement rectiligne uniforme ne requiert plus aucune cause, conformément au « principe d'inertie ». La notion de réalisation d'une possibilité, d'accomplissement, au cours du mouvement disparaît alors totalement. On pourrait dire schématiquement que le mouvement naturel est remplacé par le mouvement inertiel, mais qu'il devient son propre achèvement, sa propre fin, qui ne conduit le corps nulle part et ne le modifie en rien.

Les avatars du principe d'inertie

La théorie du « lieu » a été modifiée par celle de l'*impetus* ou « élan » de Jean Buridan au XIV^e s., théorie qui permet déjà au projectile une fois lancé de persister dans sa course de lui-même, sans intervention extérieure. La théorie de l'*impetus* donne au mouvement persistant une cause d'un type nouveau, intrinsèque pourrait-on dire. Le mobile qui possédait une qualité différente en chaque lieu se voit ainsi déjà attribuer une sorte de qualité de mouvement, indépendante du lieu.

Galilée, à la suite de quelques savants originaux de la Renaissance comme Tartaglia ou Benedetti, défait la distinction entre mouvement naturel et mouvement violent en affirmant la continuité du mouvement de la pierre lancée en l'air et qui retombe. Si le mouvement est continu, comme tout mouvement de projectile, la cause l'est aussi. Ou tout au moins une cause en remplace-t-elle une autre progressivement et non brusquement. On voit se dessiner une proximité entre les causes qui n'existaient pas dans l'Antiquité. Deux causes peuvent agir ensemble et leurs effets s'ajoutent alors tout simplement, dit Galilée dans son *Dialogue sur les deux systèmes du Monde* de 1632 pour justifier que la pierre tombe au pied du mât dans le navire en mouvement ou au pied de la tour sur la terre en rotation. C'est également sur l'affirmation d'une continuité, et dans le même ouvrage, que Galilée fonde son énoncé concernant le mouvement inertiel. Car sur un plan incliné le mobile n'est pas seulement en mouvement, il est accéléré ou décéléré. Qu'arrive-t-il alors au mobile roulant sur un plan horizontal ? « Mais s'il n'y pas de cause de ralentissement, encore moins devrait-il y avoir de

cause de repos. » Le mobile qui ne subit pas d'attraction n'est pas au repos mais en mouvement uniforme.

Dans les *Principes de la philosophie* de 1644, René Descartes, qui accuse Galilée d'« avoir bâti sans fondements », reprend les catégories scolastiques pour les critiquer de l'intérieur, détruit les notions de lieu et d'espace pour définir le mouvement directement par rapport aux corps environnants. Le mouvement ne sera alors plus déterminé de manière unique puisqu'aucun corps ne peut être dit absolument au repos. Il énonce ensuite sa première « loi » de la Nature : « Que chaque chose demeure en état tandis que rien ne la change. » Cet énoncé paraît évident, tautologique, tant que l'on ne se demande pas ce qu'est un « état ». Il prend un sens dès que l'on admet que le mouvement est un état au même titre que le repos, ce qu'affirme Descartes. Que l'état de mouvement d'un corps ne soit pas déterminé dans le système cartésien – puisqu'on peut attribuer à un corps plusieurs mouvements – ne détruit pas la force de son énoncé général. Cela le rend seulement inutilisable pour fonder une « dynamique », c'est-à-dire pour relier quantitativement un changement à sa cause.

La force comme cause

Newton fonde en revanche un système permettant de relier quantitativement le changement du mouvement à sa cause, dans ses *Principes mathématiques de Philosophie naturelle* de 1687, par une règle de proportionnalité posée comme principe. Les deux premières lois newtoniennes sont en effet les suivantes : « Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état. » « Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice, et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée. »

La « force imprimée » est donc la cause du changement du mouvement, en intensité ou en direction, mouvement qui est défini par rapport à l'espace absolu. Newton parvient, à partir de ces principes, à montrer que la force d'attraction qui dévie un mobile en le contraignant à suivre une trajectoire elliptique plutôt que rectiligne est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance au foyer. On a supposé pour cela que le foyer était la source de cette attraction et que la force cherchée pouvait être mesurée par la déviation de la trajectoire, pur élément géométrique. La proportionnalité entre la cause et l'effet, stipulée par la seconde loi, permet donc, pour la première fois, de mesurer une cause.

Mais si le système de Newton permet de calculer les trajectoires des planètes et de prévoir le retour des comètes, il ne règle pas du tout le problème de la causalité, ni pour ses contemporains, ni pour ses successeurs du XVIII^e s., en raison du caractère magique de l'action à distance et du contenu théologique de l'espace absolu. Les premiers opposants à ce système

sont Huygens et Leibniz, adversaires de taille. Huygens avait en effet pris très au sérieux la relativité totale exprimée par Descartes dans ses *Principes...*, mais aussi le fait que tout changement du mouvement devait se produire par contact, plus exactement par choc. Cette affirmation cartésienne constitue alors le départ d'une physique nouvelle, appelée plus tard « mécanisme ».

Le mécanisme

Le mouvement était pour Descartes un « mode » du corps, au même titre que le repos : on pourrait dire une qualité. Sa physique est d'ailleurs plus qualitative que quantitative et constitue à ce titre une démarche radicalement opposée à celle d'un Galilée. Mais elle n'en joue pas moins un rôle tout aussi important dans le déclin de la physique scolastique. Un des éléments du rejet de la tradition était le refus total par Descartes des qualités occultes comme causes. La cause d'un mouvement est un autre mouvement. S'il est celui d'un éther invisible, les processus peuvent être représentés par un mécanisme visualisable. La cause est donc de même nature que l'effet, tout en étant de ce fait bien distincte, séparable de son effet.

La causalité mécanique est d'abord chez Descartes celle du choc d'une boule contre une autre, donné comme composant élémentaire de toute interaction, de toute explication. Il avait donné en 1644 des règles pour les chocs, comme illustration de ses principes. Celles-ci s'avèrent inutilisables dans le contexte même pour lequel elles ont été écrites. Huygens réétudie alors les chocs élastiques, en déduit un ensemble complet de lois à partir de cas particuliers possédant des propriétés de symétrie évidentes auxquels il applique l'invariance galiléenne.

Leibniz ne suit pas Huygens dans sa recherche d'une physique invariante mais reprend l'étude des chocs. Après de multiples tentatives pour déduire les lois des chocs élastiques, maintenant admises par tous, de principes plus satisfaisants pour lui, Leibniz, qui s'était d'abord essayé à l'empirisme de Boyle, tente ensuite plutôt de redonner à la dynamique un cadre métaphysique qui lui soit propre, au-delà du mouvement tel qu'on le voit. La notion de « force du mouvement » y joue un rôle prépondérant.

Leibniz finira par déduire les lois des chocs élastiques des deux lois que nous utilisons aujourd'hui en posant la conservation de la « force vive » (notre énergie cinétique actuelle) et de la « quantité de mouvement », que Huygens avait trouvées comme conséquences, et non comme principes, de ces mêmes lois. Mais cette dernière approche nous fait sortir de la causalité classique proprement dite, au même titre que le « principe de Fermat », ou principe d'*extremum*, qui sera plus tard utilisé par Euler en mécanique. Le mécanisme de Leibniz n'en est pas moins aussi radical que celui de Descartes : « Le monde corporel est une machine ou une montre qui va sans l'interposition de Dieu... Dieu a tout prévu, il a remédié à tout par

avance. Il y a dans ses ouvrages une harmonie, une beauté préétablies. » Il n'est donc plus nécessaire d'invoquer aucune finalité comme cause des mouvements puisque le Monde est, dans son ensemble, comme chez Descartes, la réalisation d'une finalité devenue la seule possible.

L'adéquation de la cause et de l'effet

Dans son effort pour établir des principes métaphysiques qui fondent vraiment une « dynamique », Leibniz avait énoncé celui de « l'adéquation de la cause pleine et de l'effet entier ». Bien que particulièrement utilisée par l'usage qu'en fait son auteur, cette formule pourrait servir ici d'emblème. Rappelons-nous qu'il n'y avait pas de proportionnalité entre la cause et l'effet chez Aristote. La question même d'une proportion, c'est-à-dire d'un rapport quantitatif entre deux espèces si différentes ne se posait pas. Mais des proportions étaient envisagées entre quatre termes : le moteur, le mobile, la grandeur parcourue et le temps. Or un moteur moitié ne produit pas forcément un mouvement moitié, il peut très bien ne rien produire du tout en raison des frottements, des effets de seuil que nous connaissons bien. Nos classiques ont donc tout simplement posé *a priori* la proportionnalité entre la cause et l'effet, déterminant ainsi un champ d'études, celui de la physique linéaire. Ils mesurent alors sans hésiter la cause par l'effet, comme le faisait Newton en mesurant la force d'attraction par la déviation de la trajectoire.

La suite de l'histoire comporte à la fois beaucoup de contestations et beaucoup de succès. D'Alembert n'accepte ni l'action à distance ni la notion de force mesurable comme cause, et tente d'éliminer vraiment la question de la cause en mécanique. Mais l'application du système newtonien à l'étude du mouvement des astres par le même auteur et bien d'autres confirme le bien-fondé de cette solution grossière à la délicate question de la cause. L'électromagnétisme et la thermodynamique statistique viendront ajouter leurs résultats à ceux de la mécanique proprement dite, jusqu'à ce que la théorie de la Relativité restreinte d'Einstein ne repose la question de la causalité d'une façon nouvelle : puisque toute interaction a lieu à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière, chaque événement ne peut dépendre que d'un ensemble appartenant à un domaine bien déterminé de l'espace-temps.

On se rend compte alors que la question du temps était absente du problème de la causalité antique, médiévale ou classique telle que nous l'avons présentée. L'action pouvait être instantanée ou successive, faite de chocs ponctuels ou d'un changement continu. Mais dans la façon dont l'effet était produit par la cause, l'antériorité de celle-ci n'était pas essentielle. Elle ne l'est en effet devenue ensuite que dans le cadre du déterminisme, au XVIII^e et XIX^e s., lorsque l'état d'un système à un instant donné devient la cause de ses états futurs, comme dans le choc mais de façon continue. On peut dire alors que la différence de nature

entre la cause et l'effet a été totalement remplacée par l'antériorité temporelle de l'une sur l'autre.

► DESCARTES R., *Principes de la Philosophie*, in *Œuvres de Descartes*, éd. Ch. Adam & P. Tannery, Paris, Vrin, 1978.
 — GALILÉE, *Galileo Galilei : Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, trad. de l'it. R. Fréreau & F. De Gandt, Paris, Le Seuil, 1992. — GARIN P., *Le problème de la causalité et Saint Thomas d'Aquin*, Paris, Beauchesne, 1958. — LEIBNIZ G.F.W., *Œuvres*, éd. L. Prenant, Paris, Aubier-Montaigne, 1972.
 — LENOBLE R., *Mersenne ou la naissance du mécanisme*, Paris, Vrin, 2^e éd., 1971. — NEWTON I., *Principes mathématiques de Philosophie naturelle*, Paris, J. Gabay, 1990. — YAKIRA E., *La causalité de Galilée à Kant*, Paris, PUF, 1994. — Coll. : *Les théories de la causalité*, éd. J. Piaget & M. Bunge, Paris, PUF « Études d'épistémologie génétique », 1971.

Christiane VILAIN

→ Causalité (Principe de) ; Élément ; Force ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Mouvement ; Nature (Système de la) ; Vitalisme et mécanisme.

CELLULE

Concept empirique et concept théorique

Le concept de cellule détermine l'un des principaux programmes de recherche biologique. Le terme sert à définir l'unité morphologique correspondant aux parties vivantes élémentaires des organismes tant animaux que végétaux. Il renvoie à des contenus descriptifs révélés par l'observation microscopique des organismes élémentaires et des éléments de tissu des organismes complexes. La découverte empirique des cellules comme unités morphologiques et la représentation de plus en plus raffinée des microstructures qui les composent apparaissent donc, pour une part, tributaires des perfectionnements de l'instrumentation microscopique et des techniques de teinture, de préparation et de marquage depuis le milieu du XVII^e s. jusqu'à nos jours. A chaque stade d'évolution technologique n'assisterait-on pas à une mutation de l'image de l'unité organique de base que l'on percevait dotée de dispositifs intégrés de plus en plus complexes ? Or le concept de cellule n'est pas qu'observationnel et graduellement révisable au fil des découvertes empiriques ; il renvoie à des représentations théoriques concernant l'organisme, sa genèse, son intégration structurale et fonctionnelle, la régulation des processus élémentaires dans et entre les unités morphologiques qui le composent. D'où un autre type d'histoire (Duchesneau, 1987) : celle-ci s'emploie à déterminer la part d'invention théorique aux diverses phases d'établissement et de transformation d'un programme de recherche conjointement morphologique et physiologique. Elle s'interroge en particulier sur les adaptations qui ont permis à la « théorie cellulaire » d'intégrer successivement des modèles empruntés à l'embryologie descriptive et analytique, à la génétique mendélienne et néomendélienne, voire, plus récemment, à la biologie moléculaire.

Dans sa *Micrographia* (1665), Robert Hooke avait représenté la structure alvéolaire du parenchyme de chène-liège et utilisé la métaphore de la cellule pour caractériser cet arrangement. Puis, nombre de naturalistes avaient mis en lumière la nature « globulaire » ou « vésiculaire » de certaines microparties de plantes et d'animaux observées au microscope. Cette période est dominée par le modèle micromécaniste des petites structures juxtaposées et emboîtées et par la thèse de la préformation des corps sous forme de germes emboîtés. Aux théoriciens de la fibre vivante dans la seconde moitié du XVIII^e s. revient l'honneur d'avoir suggéré une conception unifiée des éléments morphologiques constitutifs des organismes vivants. Les fibres de divers types étaient tenues pour autant d'unités structurales identifiables au moyen de propriétés émergentes (irritabilité hallérienne, sensibilité) et résultant d'un principe de formation propre. Mais la genèse des fibres restait mystérieuse et le rapport à un morphotype élémentaire, substrat de toutes les opérations physiologiques, n'était nullement établi. D'ailleurs, les observations des microscopistes étaient contaminées par une multitude d'aberrations optiques et ne permettaient aucunement d'inférer un type unique de structure élémentaire qui valût universellement pour les végétaux et les animaux. Une véritable révolution technologique se produit vers la fin de la décennie 1820 avec la mise au point des premiers microscopes achromatiques : ceux-ci corrigent les aberrations sphériques et les effets de halo dus à des lentilles de faible ouverture, qui tendaient à faire des observations antérieures un indissociable mélange de vérité empirique et d'illusion visuelle. Au même moment, diverses constructions spéculatives remettent à l'ordre du jour la recherche du composant structural élémentaire de l'organisme global. Selon certains (Canguilhem, 1967), l'impulsion serait venue, dans le sillage de la *Naturphilosophie*, de naturalistes, tel Lorenz Oken, qui avaient spéculé sur le morphotype unique représentant le micro-organisme de l'organisme global. L'occasion prochaine de surgissement de la théorie cellulaire nous semble plutôt résider dans les hypothèses globulistes qui prennent leur essor avec les naturalistes français Henri Dutrochet et François-Vincent Raspail. Tenants d'un réductionnisme physico-chimique appliqué aux phénomènes complexes, ils soutenaient qu'une pluralité de structures développées pouvait s'analyser en termes de globules ou d'utricules juxtaposés ou intégrés ; par extension analogique, le même concept devait valoir pour l'ensemble des structures animales et végétales. Mais les globules, dénués d'organisation interne, semblent trop rudimentaires pour rendre compte de la nécessaire complexité fonctionnelle, des unités vivantes. En particulier, l'importance du noyau, que le botaniste Robert Brown met en évidence à partir de 1831, est méconnue. Enfin, les globulistes ne parvenaient pas à rendre compte du mode de dérivation des structures complexes à partir d'unités morphologiques du type de celles qu'ils imaginaient. Du moins cette approche théorique incitait-elle à mettre en œuvre les moyens d'observation dorénavant

disponibles en vue de découvrir un type général de structure élémentaire qui servit de substrat aux processus physico-chimiques des organismes.

La première théorie cellulaire

Des apports conceptuels spécifiques détermineront de plus près le premier programme cellulaire. Des modèles fournis par la physiologie de son maître Johannes Müller et par l'embryologie de Karl Ernst von Baer, Theodor Schwann (1810-1882) tirera l'idée d'établir la morphogenèse des éléments organiques sur une démonstration embryogénétique. Quant à l'idée de privilégier la séquence nucléole → noyau → membrane cellulaire comme processus de formation et de différenciation subséquente des cellules, elle semble lui être venue du botaniste Matthias Schleiden (1804-1881), qui publie ses *Beiträge zur Phyto-genesis* en 1838. Selon le modèle de Schleiden, non seulement les structures élémentaires des végétaux sont toutes de type cellulaire, mais les cellules-filles se produiraient à partir du fluide interne à la cellule-mère, le « cyto-blastème ». La séquence de développement impliquerait la formation successive du nucléole, du noyau et de la membrane, et le dépôt stratifié de matière organique à l'intérieur de la cellule. L'individualité cellulaire assurant le cadre d'exercice des fonctions végétales, l'organisme global apparaît comme la résultante de l'interrelation des cellules. Schwann s'emploie à généraliser ce modèle morphogénétique de tendance réductionniste en l'appliquant aux diverses structures histologiques de l'animal. Les observations qu'il réalise en 1838-1839 donnent lieu aux inférences des *Mikroskopische Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur und dem Wachstum der Thiere und Pflanzen* (1839). Il y conjugue analyse et synthèse. L'analyse vise à établir par preuves empiriques l'omniprésence des formes cellulaires comme structures primordiales, et les modes de différenciation qui permettent de dériver toutes les formes organiques complexes à partir de cellules. À l'analyse appartiennent les analogies qui permettent de rattacher à la séquence morphogénétique la production d'éléments tissulaires différenciés. Pour y parvenir, il s'agit dans de nombreux cas de retracer la formation embryonnaire des tissus et d'en montrer la métamorphose. L'activité assimilatrice/désassimilatrice de la cellule est à la base même de tout processus de différenciation structuro-fonctionnelle. La synthèse doit construire une représentation cohérente et heuristique-ment féconde des lois gouvernant la formation et le métabolisme cellulaire. Unité morphologique et fonctionnelle, la cellule est tenue pour un organisme élémentaire où se déroulent des processus qui ne répondent à aucune téléologie immanente. La théorie se complète d'une hypothèse spéculative visant à orienter le programme de recherche dans une perspective réductionniste. Schwann développe alors l'analogie entre la formation exogène de cellules à partir du

« cytoblastème » intercellulaire et une forme *sui generis* de cristallisation.

Pendant une quinzaine d'années, le programme schwannien va connaître divers ajustements dans l'attente d'une première révision radicale. En premier lieu, Müller lui-même adopte la notion de cellule et s'emploie à établir la morphogénèse cellulaire des tissus cancéreux. Dans *Ueber den feineren Bau der krankhaften Geschwülste* (1838), il assimile les cellules morbides à des formations de type embryonnaire qui auraient été bloquées dans leur évolution. La formation blastémique apparaît dans tous les cas gouvernée par un principe synthétique d'intégration, forme de principe vital (*Lebensprinzip*) étranger au programme schwannien, plus réductionniste. La différence dans le cas des cellules morbides est que le principe opère une intégration imparfaite et détermine l'apparition d'une sorte d'organisme « parasitaire » par rapport à l'organisme normal fonctionnellement plus différencié. Dans les sections ajoutées à son *Handbuch der Physiologie des Menschen* après 1840, Müller entreprend de réformer le programme schwannien dans une perspective « téléomécaniste » (Lenoir, 1982). Même s'ils se déroulent suivant des déterminations physico-chimiques, les phénomènes plastiques et métaboliques de la vie cellulaire identifiés par Schwann se trouvent subordonnés au plan fonctionnel qu'incarne le *Lebensprinzip*. Cela vaut en particulier pour la génération de nouvelles cellules. Le potentiel des cellules germinales, le « tout implicite », représente en effet une causalité adéquate à reproduire l'organisme complexe par différenciation des cellules qui en proviennent. Par réplication ultérieure des cellules dérivées de chaque type peut se réaliser l'organisme complexe actuel, le « tout explicite ». Moyennant de tels correctifs théoriques, le programme cellulaire va susciter de multiples recherches, particulièrement dans l'école müllérienne. Pour cette première génération de chercheurs, l'essentiel consistera toutefois à établir l'histologie cellulaire sur une base inductive.

La deuxième théorie cellulaire

Dès 1855, deux disciples de Müller, Robert Remak (1815-1865) et Rudolph Virchow (1821-1902) procèdent à la première révision radicale de la théorie cellulaire. Remak prend appui sur les recherches embryologiques qui, depuis Schwann, ont porté sur les premières sphères de segmentation (blastoderme) de l'œuf fécondé. Il tient la cristallisation blastémique pour inacceptable, car elle ne respecte pas le principe d'une organisation vitale élémentaire, condition nécessaire d'activité formatrice. Dans ses *Untersuchungen über Entwicklungsgeschichte der Wirbelthiere* (1855), il dépasse l'hypothèse d'une formation endogénétique et il avance le principe de la reproduction des cellules par une division se produisant du noyau au protoplasme périphérique. Cette séquence lui semble attestée par les données d'observation. La position institutionnelle précaire de Remak qui, d'origine juive, ne peut prétendre à

un poste universitaire en Prusse, et la nature plus ésotérique de ses recherches font que le mérite d'avoir substitué un nouveau programme de recherches à celui de Schwann revient généralement à Virchow.

D'entrée de jeu, le cadre des travaux de Virchow est beaucoup plus médical que biologique. Pour celui-ci, la période 1855-1858 marque l'adoption du principe nouveau de reproduction des cellules par division nucléaire au sein de cellules préexistantes et se termine par la publication de la *Cellularpathologie*, dont l'influence sera déterminante. Virchow s'intéressait aux phénomènes d'inflammation et de dégénérescence tissulaire qu'il rattachait à des altérations du métabolisme cellulaire. Ses observations, jointes à celles de Remak, l'incitent à postuler une loi générale de reproduction cellulaire par division, qui donnera lieu à la formule *Omnis cellula e cellula*. Mais la thèse qu'il avance n'a pas seulement trait à la description du processus morphogénétique. Il repense le concept de cellule de façon à en fixer la signification physiologique. Lieu des échanges moléculaires représentant l'activité vitale, la cellule est une unité morphologique et physiologique conforme à l'idée de totalité organique. L'organisme global n'est qu'une association de cellules structurellement et fonctionnellement agencées de façon à interagir. Le noyau cellulaire est l'organe reproducteur de l'organisme et de ses diverses structures ; au protoplasme échoit le rôle d'assurer les échanges chimiques dont dépendent les fonctions particulières de tel ou tel type d'unités. L'analyse cytochimique du métabolisme, mais elle doit se déployer dans un cadre de morphologie fonctionnelle qui lui donne sens : l'observation et l'expérience sont donc appelées à établir la conformation spécifique de ces types et celle des « territoires » qu'ils forment dans l'organisme, territoires constituant le « milieu » propre des interactions cellulaires. Sans doute trouve-t-on là l'une des sources de la notion de « milieu intérieur » chez Claude Bernard. Par ailleurs, l'irritabilité cellulaire est la propriété charnière qui permet de rendre compte des phénomènes hétéronomiques, mais néanmoins fonctionnels, associés aux formations pathogènes du type des tumeurs cancéreuses. L'économie normale des processus cellulaires, comme leur déviance pathologique, relève des lois physiologiques. Bref, les cellules apparaissent comme les cadres essentiels de l'intégration vitale, et la morphologie cellulaire ainsi interprétée doit donner lieu à un programme de recherche physiologique sur la réactivité vitale des cellules aux stimuli.

Or, dans le même temps, le cadre général de la physiologie se trouve redéfini par le réductionnisme de Hermann Helmholtz, Emil Du Bois-Reymond et Carl Ludwig. Dans cette ligne d'idées, les travaux de Max Schultze, d'Ernst Wilhelm von Brücke et de Lionel Beale mettent en valeur les dispositifs physico-chimiques du protoplasme, conçu comme substrat des fonctions métaboliques de la cellule. Et Albert Kölliker considère le « cytoplasme » — ce terme désignant désormais le protoplasme nucléé — comme une forme

intégrée d'organisme élémentaire dans et par lequel s'exerce la réactivité vitale et s'opèrent les transformations chimiques modifiant le milieu organique ambiant. Cette représentation théorique définit le cadre de référence obligé pour l'ensemble des analyses morphologiques et physiologiques. En témoigne l'importance que Claude Bernard, à compter des *Leçons sur les propriétés des tissus vivants* (1866), lui accorde comme base d'interprétation des analyses physiologiques les plus diverses. La théorie cellulaire est désormais en possession de ses principes fondamentaux : définition des cellules comme organismes élémentaires ; analyse et dérivation de toutes les structures organiques à partir de cellules ; décomposition de toutes les fonctions vitales en termes de propriétés et de processus cellulaires ; formation des cellules à partir de cellules préexistantes.

Dans ce cadre, l'analyse s'ordonne à l'investigation fine des structures internes de la cellule afin d'y rattacher les processus élémentaires du fonctionnement vital. Ainsi l'attention se porte-t-elle sur les structures du noyau et sur celles du protoplasme. La part la plus réductionniste de la théorie, à contresens semble-t-il du « holisme vitaliste » de Virchow, se manifeste surtout dans la recherche de modèles pour rendre compte de la structuration complexe des éléments protoplasmiques. Les recherches analytiques sur ce point atteindront un sommet avec les expériences de Charles E. Overton, qui, en 1895, confirmera l'existence d'une membrane enveloppant le protoplasme nucléé. Traduisant cette évolution dans la modélisation analytique, les dernières décennies du siècle voient se multiplier les observations portant sur les structures internes du corps cellulaire lui-même. Deux types de déterminations influent sur ce programme de recherche tel que Brücke le décrit (*Die Elementarorganismen*, 1861) : 1) les innovations technologiques relatives aux microscopes et aux techniques de fixation et de teinture ; 2) l'ambition spéculative propre au réductionnisme de découvrir au sein de protoplasme des formations organiques analysables en propriétés physico-chimiques et pouvant rendre compte de la structuration élémentaire de la matière vivante. L'idée spéculative est d'autant plus séduisante que l'on envisage même l'hypothèse d'organismes élémentaires dépourvus de noyau. Le néodarwinien Ernst Haeckel avait cru pouvoir soutenir cette thèse en identifiant des micro-organismes présumés analogues à de simples amas de protoplasme, « cytodes » et « monères ». La thèse d'une structuration vitale primordiale liée au protoplasme semble d'autant plus prometteuse que l'on pressent la difficulté de rendre compte de structures complexes, telles les syncyties, excluant ou dépassant l'association de cellules nettement individualisées. D'ailleurs, même les cytologistes qui mettent en valeur les mécanismes nucléaires de la mitose et de la méiose comme fondement de la reproduction cellulaire, réservent en général l'hypothèse d'un rôle du cytoplasme dans la *Zellbildung*.

On peut distinguer trois types de théories protoplasmiques : le type granulo-fibrillo-réticulaire, le type

granulaire ou particulaire, et le type moléculaire-protéinique (Albarracín Teulón, 1983). Représentative du premier groupe est la notion de « micelle » proposée par Carl von Nägeli. Cristalloïdes en solution, les micelles s'agrégeraient pour former un « trophoplasme », qui pourrait à son tour s'organiser en une structure filamenteuse, l'« idioplasme » : par extension au-delà des limites de la cellule, celui-ci déterminerait la morphogénèse des organismes. De même ordre est la théorie des « bioplastes » exposée par Richard Altmann dans *Die Elementarorganismen und ihre Beziehungen zu den Zellen* (1890) : les « bioplastes », qui servent aussi à caractériser des bactéries, auraient la capacité de se reproduire de façon autonome et de former des fibres intracellulaires. August Weismann fournit l'exemple d'une théorie granulaire lorsqu'il suppose l'existence de « biophores », particules formées de molécules complexes, dotées de propriétés fonctionnelles et susceptibles de fournir les éléments matériels de détermination du patrimoine génétique. Une intéressante synthèse nous est offerte par Oscar Hertwig dans *Die Zelle und die Gewebe* (1893). La cellule y apparaît composée d'innombrables particules distinctes, parmi lesquelles les « idioblastes » auraient la capacité de croître et de se reproduire par division. Ces unités particulières auraient une provenance nucléaire, mais, s'assimilant de différentes matières, elles se transformeraient en « plasomes », unités vivantes du protoplasme. Le réductionnisme chimique ne s'affirme pleinement que dans le troisième groupe d'hypothèses : celles-ci définissent l'unité vitale protoplasmique en termes de molécules protéiniques. Eduard Pflüger et Paul Ehrlich se représentaient la cellule comme une macromolécule gigantesque dont la portion centrale correspondrait au noyau et dont les portions périphériques incarneraient les divers processus métaboliques. Dans son *Allgemeine Physiologie* (1895), Max Verworn rattache les processus caractéristiques du métabolisme cellulaire à un ensemble de « molécules biogènes protéinoïdes », capables de se reproduire et de modifier les molécules protéiniques ordinaires de façon à maintenir la régulation métabolique. Ces diverses théories, en plus de servir de cadre heuristique à de multiples recherches analytiques, préfigurent les orientations réductionnistes qui se déploieront avec une intensité renouvelée dans la biologie moléculaire du XX^e s., par-delà le cadre fourni par la notion de cellule, conçue comme unité primordiale de l'organisation vitale.

La reproduction cellulaire : mitose et méiose

La morphologie des structures intranucléaires, ne saurait donner lieu à aucune description systématique sans l'aide d'hypothèses sur les processus impliqués et de modèles exprimant l'intégration des microdispositifs et des séquences de transformation. La description des processus de la mitose et de la méiose et les connotations morphologiques et fonctionnelles du concept de chromosome ne surgissent, dans la seconde

moitié du XIX^e s., qu'au terme d'évolutions complexes. L'histoire emmêlée des découvertes empiriques et des modèles hypothétiques destinés à en rendre compte a suscité peu d'analyses et reste à retracer pour une grande part.

Le paradigme virchowien a posé le principe de la formation de nouvelles cellules par division de cellules existantes, et ce processus paraît impliquer au premier chef une multiplication des noyaux. Mais les observations microscopiques se révèlent pour le moins ambiguës. Dans la période antérieure à 1870, les microscopistes observent occasionnellement des corpuscules intranucléaires en changement de phases mais ne parviennent pas à repérer la séquence morphogénétique de transformation du noyau qui établissait la continuité des structures au-delà de la dissolution de la membrane nucléaire. Dans la période 1870-1878, les découvertes se succèdent à un rythme rapide grâce au développement de techniques de fixation, de teinture et d'observation microscopique *in vivo* et mènent à la reconnaissance de certaines phases de la division du noyau (« métaphase » et « anaphase » de la mitose). Otto Bütschli et Eduard Strasburger formulent alors des hypothèses relatives aux séquences morphologiques du processus reproductif. Dans les éditions successives de *Ueber Zellbindung und Zelltheilung* (1875, 1876 et 1880), où il intègre les contributions de Bütschli, Strasburger confirme l'universalité de la division nucléaire consécutive à la métaphase et à l'anaphase en la présentant comme un fait fondamental sous-tendant la diversité des formes végétales et animales. Si de nombreux cytologistes, en particulier Oscar et Richard Hertwig, tirent les mêmes inférences d'observations analogues, le processus n'est que très imparfaitement analysé. Strasburger maintient en effet que les corpuscules ou bâtonnets intranucléaires, découverts par Émile Balbiani en 1876 — les « futurs » chromosomes — se résorbent en une masse indifférenciée de « chromatine » qui se divise suivant une segmentation équatoriale lors de la métaphase. Après 1878, le mécanisme morphogénétique de la mitose se déploie de façon de plus en plus rigoureuse, ce qui permet de détailler les autres phases de la division nucléaire. Se développe alors la pratique d'observer au microscope l'évolution de cellules vivantes. Walther Flemming, prélevant son matériel cytologique sur la *Salamandra maculata*, publie alors une série de textes révolutionnaires. Il met en évidence les filaments chromosomiques dans l'« interphase », état de stabilité entre deux divisions, et leur scission longitudinale au terme de la phase initiale (« prophase »). Il observe le processus terminal (« téléphase ») qu'il conçoit comme l'inverse de la prophase. Dans le cours de ses recherches, il suggère la remontée polaire de chaque moitié des chromosomes longitudinalement segmentés dans l'anaphase. S'il commet encore l'erreur de supposer les chromosomes joints bout à bout pour former un « écheveau » continu dans l'armature de l'interphase, il parvient à imposer l'universalité d'une division nucléaire indirecte par « métamorphose

filamentaire du noyau», thèse qu'il expose dans *Zellsubstanz, Kern und Zelltheilung* (1882). En 1885, Carl Rabl va rejeter le faux modèle de l'écheveau continu de chromatine dans l'interphase; corrélativement, il établit la discontinuité des structures chromosomiques à travers leurs métamorphoses et il pose le principe du nombre fixe de chromosomes pour les cellules d'une espèce donnée. Expérimentant sur les œufs des deux variétés (*univalens* et *bivalens*) de l'*Ascaris megalcephala*, Theodor Boveri établit définitivement en 1887-1888 l'individualité des chromosomes, structures nucléaires dotées d'indépendance morphologique et fonctionnelle. Les anomalies résultant de la fécondation d'un même œuf par deux spermatozoïdes (dispermie) révèlent que les différents chromosomes sont porteurs de facteurs héréditaires spécifiques. Des recherches analogues se poursuivent sur les chromosomes des végétaux, particulièrement avec Léon Guignard.

Pendant cette même période, la nomenclature se précise reflétant le raffinement de la représentation théorique: en 1878, W. Schleicher avait proposé «caryocinèse» pour le processus de division du noyau. Flemming en 1882 modifie ce terme en «caryomitose» pour faire droit à la métamorphose filamenteuse du noyau — par abréviation «mitose». Les termes de «prophase», «métaphase» et «anaphase» sont avancés par Strasburger en 1884, celui de «télophase» par M. Heidenhain en 1894. Après que l'on eut recouru aux appellations les plus diverses, Wilhelm Waldeyer en 1888 inventa le vocable «chromosome».

Corrélativement, le premier stade menant à la découverte de la méiose a consisté à se convaincre que les processus de fécondation supposent l'intervention de deux noyaux cellulaires qui, à la suite d'une transformation spécifique, n'en forment plus qu'un (Hughes, 1959). En 1873, Bütschli observe deux noyaux dans l'œuf fécondé de nématode, avant que ne débute le processus de division qui engendrera les blastomères. En 1874, Ludwig Auerbach observe la fusion de ces deux noyaux en un seul. En 1878, O. Hertwig établit, en expérimentant sur les oursins, que l'un des deux noyaux provient bien du spermatozoïde. Puis, en 1879, Hermann Fol observe la pénétration d'un spermatozoïde dans l'œuf d'étoile de mer. Mais cette séquence d'inférences apparemment directes ne doit pas faire perdre de vue l'ambivalence des chercheurs, partagés entre un modèle de continuité des structures nucléaires à travers la fécondation et la division cellulaire, et un modèle d'effacement de ces structures avec «épigénèse» de nouvelles structures. Dans la décennie 1870, la métamorphose des structures des pronuclei et le lien de ces structures avec celles de l'œuf fécondé restent en grande partie indéterminés: cela est vrai non seulement des chromosomes, imparfaitement identifiés, mais aussi des fuseaux mitotiques, des centrosomes, et de la transformation de ceux-ci en «corpuscules polaires» formant des asters. La provenance incertaine de ces structures nucléaires accroît la difficulté d'expliquer la fusion des noyaux dans la fécondation. C'est le

dévoilement des phases de la mitose, surtout après la synthèse opérée par Flemming (1882), qui déclenche l'éclaircissement des mécanismes de la fécondation. En 1883, Édouard van Beneden, expérimentant sur la variété *univalens* (deux chromosomes avant réduction) de l'*Ascaris megalcephala*, constate que, suite à l'exclusion des corps polaires, chaque pronucleus ne contient plus qu'un chromosome: ces chromosomes une fois devenus manifestes, les membranes nucléaires s'effacent, puis les deux chromosomes s'assemblent à la plaque équatoriale pour donner lieu aux phases subséquentes de la division cellulaire. Bref, deux ensembles de chromosomes, issus d'une division réductrice aboutissant aux chromosomes des pronuclei mâle et femelle, fournit, par combinaison, l'assortiment des chromosomes du zygote. L'erreur de Van Beneden vient de ce qu'il se représente la répartition en deux du nombre de chromosomes typique de l'espèce entre le pronucleus et le corps polaire, sans tenir compte de la structure par paires dans le noyau normal. La disjonction de paires homologues de chromosomes entre le pronucleus et le corps polaire va permettre de concevoir le maintien d'un jeu complet, mais simple et non double, de chromosomes dans chaque pronucleus. Cette division réductrice ou «réduction chromatique» est conçue par Boveri en 1887-1888 et par O. Hertwig en 1890. Ce dernier confirme en outre le phénomène corrélatif pour le spermatozoïde. Comme Boveri l'établira de façon synthétique en 1892, dans les dernières phases de division qui aboutissent à la formation des gamètes mâle et femelle, pour chaque division de chromosomes par deux se produit une division par quatre de la cellule-mère. De ce fait, dans la réduction chromatique, les deux paires homologues engendrées par un processus mitotique normal se trouvent partagées entre trois corps polaires et un pronucleus. Corrélativement, la spermatogénèse de l'*Ascaris megalcephala bivalens* (quatre chromosomes avant réduction) aboutit à un partage des deux jeux de chromosomes homologues deux à deux entre quatre spermatozoïdes. Même si le cas de l'*Ascaris* n'est pas universalisable à toutes les formes de reproduction sexuée animale, il constitue un modèle des plus représentatifs. Malgré les modalités variables de son accomplissement, la réduction chromatique apparaît la règle, exception faite de cas pathologiques, tels ceux de dispermie ou de polyspermie. La fécondation des végétaux supérieurs suscite des analyses qui se déploient en parallèle. Ainsi Strasburger montre-t-il en 1888 la division en deux du nombre total de chromosomes dans la production des gamètes (cellules du pollen et du sac embryonnaire); et, grâce aux recherches de Guignard et d'Overton, le processus général de réduction chromatique est démontré tant pour les gamétophytes que pour les sporophytes. Malgré les remarquables découvertes ainsi réalisées, la part de spéculation subsiste et entraîne des divergences interprétatives majeures sur le mécanisme déclencheur de l'assortiment des chromosomes des deux pronuclei dans la reproduction.

Comme la mitose, la réduction chromatique va

susciter l'invention terminologique. Dès 1887, Flemming avait distingué la «division hétérotypique» impliquant la réduction chromosomique dans les gamètes de la «division homotypique» représentée par la caryocinèse ou mitose. C'est en 1905 que J.B. Farmer et J.E. Moore proposent le vocable de «méiose» pour signifier la division hétérotypique de Flemming.

Comme Wilson l'affirme éloquentement dans *The Cell in Development and Heredity* (1896), «l'hérédité apparaît comme la conséquence de la continuité génétique des cellules, et les cellules germinales en constituent la base physique». De fait, dès 1883, August Weismann entreprend de construire une théorie de l'hérédité en partant de nouvelles conceptions de la division cellulaire et de la fécondation. Il suppose la reproduction continue d'un plasma germinatif d'une génération cellulaire à la suivante. Dans des conditions appropriées, les composés moléculaires intracellulaires qui servent d'agents de la transmission héréditaire se réinvestiraient dans de nouvelles cellules germinales, susceptibles de reproduire un individu de même espèce. Weismann prend appui sur les observations de O. Hertwig et de Fol relatives à la fusion des pronuclei dans la fécondation pour soutenir que le plasma germinatif doit se trouver dans la substance du noyau. Cette thèse lui semble confirmée lorsque Strasburger en 1884 montre que, dans la fécondation des plantes à fleur, seul le noyau du spermatozoïde à l'exclusion de sa partie médiane (somatique) intervient dans la fusion. La fusion nucléaire à parts égales lui semble par ailleurs prouver l'équivalence des éléments mâle et femelle dans la transmission héréditaire des caractères hors de toute influence somatique. En 1892, il identifie le plasma germinatif aux chromosomes. Un nombre égal de chromosomes étant fourni par chacun des deux progéniteurs, le mécanisme complexe de la division nucléaire aurait essentiellement pour fonction d'assurer un partage équitable entre les deux pronuclei de la part de chromatine qu'ils légueront respectivement au zygote. Mais Weismann se méprend sur la réduction des chromosomes: il suppose que le nombre total est divisé abstraction faite de l'individualité des chromosomes. En cette même année 1892, Boveri avance un modèle plus adéquat selon lequel l'assortissement des chromosomes individualisés dans la méiose se produirait terme à terme: d'où la prise en compte de paires bivalentes d'éléments chromosomiques susceptibles de croisement dans la génération du zygote.

Après 1900, suite à la «redécouverte», par Hugo De Vries, Carl Correns et Erich von Tschermak, des lois génétiques de Gregor Mendel, élaborées de façon purement «phénoménologique» plus de trois décennies d'apparavant, la ségrégation des caractères dans le croisement et la reproduction trouve sa base morphologique présumée dans les chromosomes, particulièrement dans la conjugaison «synaptique» des éléments chromosomiques bivalents que sont les «chromatides» mâles et femelles. Les chercheurs travaillant

sous l'égide de Wilson et de Walter Sutton développent alors un programme de recherche associant les lois phénoménologiques de Mendel et le dévoilement des mécanismes de réplication, de variation et d'assortiment des chromosomes. La cartographie des gènes sur les chromosomes s'annonce comme une hypothèse que tenteront bientôt de confirmer les travaux de Thomas H. Morgan et de son école. C'est ainsi dans le cadre d'une théorie cellulaire désormais dotée de ses principaux modèles morphogénétiques que s'accompliront les recherches de la génétique néomendélienne.

Jusqu'à présent, peu d'études ont abordé les transformations de la théorie cellulaire au xx^e s. L'histoire épistémologique qu'il conviendrait de tracer soulignerait sans doute la croissance quasi exponentielle de données descriptives de plus en plus fines sur les microstructures cellulaires, données que des moyens techniques remarquablement puissants permettent d'obtenir. Mais, par-delà ces développements «inductifs», des motifs de transformation majeure surgissent, particulièrement dans la seconde moitié de ce siècle, et orientent vers une biologie moléculaire de la cellule. Parmi les principaux ingrédients de cette mutation, il faut compter la modélisation biochimique des microdispositifs structuraux et des processus localisés tant dans les parties somatiques que nucléaires de l'«organisme élémentaire». Mais ce réductionnisme dans la recherche des modèles d'analyse ne ruine pas pour autant l'importance du cadre théorique *sui generis* que forme la conception intégrée de l'unité morphologique de base des vivants. Cette conception se rattache d'ailleurs de plus en plus aux schèmes analytiques de la synthèse évolutionnaire, qui suggère, du moins à titre programmatique, les raisons adaptatives des diverses structures et des divers processus cellulaires, voire de ce type même d'organisation vitale.

- ALBARRACIN TEULÓN A., *La teoría celular. Historia de un paradigma*, Madrid, Alianza editorial, 1983. — BAKER J.R., *The Cell Theory. A Restatement, History, and Critique*, New York, Garland, 1988. — BRÜCKE E.W. VON, «Die Elementarorganismen», *Sitzungsberichte der Kais. Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathematisch-naturw. Klasse*, 1861, vol. 44-2, p. 381-406. — CANGUILHEM G., *La connaissance de la vie*, 2^e éd., Paris, Vrin, 1967. — CHURCHILL F., «Hertwig, Weismann, and the Meaning of Reduction Division circa 1892», *Isis*, 1970, vol. 61, p. 429-457. — COLEMAN W., «Cell, Nucleus, and Inheritance: An Historical Study», *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1965, vol. 109, p. 124-158. — DUCHESNEAU F., *Génèse de la théorie cellulaire*, Paris, Vrin, 1987 (et Montréal, Bellarmin). — HERTWIG O., *Die Zelle und die Gewebe. Grundzüge der allgemeinen Anatomie und Physiologie*, Iéna, G. Fischer, 1892-1893. — HUGHES A., *A History of Cytology*, Londres/New York, Abelard-Schuman, 1959. — KLEIN M., *Histoire des origines de la théorie cellulaire*, Paris, Hermann, 1936. — LENOIR T., *The Strategy of Life. Teleology and Mechanics in Nineteenth Century Biology*, Dordrecht, Reidel, 1982. — SCHWANN T., *Mikroskopische Untersuchungen über die Ueber einstimmung in der Struktur und dem Wachstum der Thiere und Pflanzen*, Berlin, Sander'schen Buchhandlung, 1839; *Microscopical Researches into the Accordance in the Structure and Growth of Animals and Plants*, New York, Kraus Reprint, 1969. — STRASBURGER E.,

Zellbindung und Zellteilung, 3. Auflage, Iena, G. Fischer, 1880. — VIRCHOW R., *Die Cellularpathologie in ihrer Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre*, Berlin, Hirschwald, 1859; *La pathologie cellulaire basée sur l'étude physiologie et pathologie des tissus*, Paris, J.-B. Baillière, 1861. — WILSON E.B., *The Cell in Development and Heredity*, 3^e éd., New York, Macmillan, 1928.

François DUCHESNEAU

→ Embryogenèse; Espèce; Gène; Génération spontanée; Haeckel; Immunologie; Micro-organisme; Neurone; Oncogène; Récepteur; Schleiden; Schwann; Virus; Vitalisme et mécanisme.

CERCLE DE VIENNE

La préhistoire du Cercle de Vienne, l'histoire qui a immédiatement précédé son apparition, est celle des diverses formes d'opposition à l'idée que la philosophie serait en définitive une super-théorie platonicienne de la réalité ou une science kantienne de la science. Créé à la fin des années 1920 dans la capitale autrichienne à partir du regroupement de ces forces critiques, le Cercle de Vienne entendait poursuivre les travaux du logicien allemand Gottlob Frege et du philosophe des sciences autrichien Ernst Mach, déjà associés avant la Première Guerre mondiale par Bertrand Russell, philosophe à Cambridge.

La tentative de Gottlob Frege (1848-1925) de mener à bien le projet leibnizien d'un langage idéal fondé sur la logique formelle était en soi si révolutionnaire qu'on a souvent dit de son œuvre qu'elle constituait la première véritable avancée de la logique depuis Aristote. Frege voulait prouver que les mathématiques reposent entièrement sur la logique formelle. Pour y parvenir, il lui fallait d'abord élaborer la méthode devant servir de critère absolu à la représentation de tout ce qui peut passer pour une proposition, qu'elle soit d'ordre logique, mathématique ou empirique. Grâce à ce système de notation, on pourrait désormais distinguer sans ambiguïté les structures logiques à la base de l'intelligibilité en général et celles qui permettent de renvoyer sans risque d'erreur à des objets empiriquement réels. La philosophie analytique s'est développée en prenant pour modèle la rigueur apportée par Frege à la définition des concepts qui sous-tendent les relations mathématiques.

Ernst Mach (1838-1916) s'attela à un projet parallèle portant sur les fondements conceptuels de la physique newtonienne, en butte à des objections de plus en plus sévères au cours de la deuxième moitié du XIX^e s. Newton légitimait son système par un certain nombre de phénomènes inobservables, tels que la force, l'espace et le temps absolus, le mouvement. Mach observa d'abord que force était un terme pour le moins mal choisi et trompeur, puisque ce qu'il désignait correspondait moins à un objet qu'à un rapport, une fonction de la masse et de l'accélération; quant aux « absolus », ils n'avaient jamais vraiment fait partie de la physique, si ce n'est dans l'exposé que donnait

Newton des fondements de cette science. Mach se livra donc à une critique en règle de la terminologie physique, tout entière axée sur la corrélation de l'observation empirique avec des fonctions mathématiques, en excluant d'emblée tout ce qui n'était ni observable ni mathématique. Ce faisant, il reconnaissait ouvertement l'apport de Frege, qui lui aussi utilisait la notion de fonction pour définir la caractéristique la plus fondamentale des propositions.

Dans la période qui précéda immédiatement la Première Guerre mondiale, Bertrand Russell (1872-1970) était généralement tenu pour le représentant par excellence du projet visant à associer le meilleur du rationalisme classique et de l'empirisme. En collaboration avec Alfred North Whitehead, il entreprit de mener à terme le programme logique de Frege dans ses *Principia Mathematica* (1910-1914). Il emprunta à Mach son idée de la nature du savoir empirique pour la développer plus avant dans de nombreux essais publiés dans la revue *Mind* ou dans des livres comme *The Problems of Philosophy* (1912), *Our Knowledge of the External World* (1914) et *Mysticism and Logic* (1917). Sa « théorie des descriptions » (1905) élabore une technique logique pour analyser les propositions contenant des référents trompeurs (« le roi de France chauve », par ex.) : une fois ramenés à quelques composantes simples, ces complexes problématiques cessent d'être des sources de confusion. L'« atomisme logique » était né, et avec lui le programme de la « philosophie analytique ».

L'ébauche de ce qui devait devenir le Cercle de Vienne s'est formée au cours de rencontres qui, en 1907, réunirent à plusieurs reprises Hans Hahn, Philipp Frank et Otto Neurath. Le Cercle de Vienne lui-même se constitua sous forme de groupe de discussion autour de Moritz Schlick, professeur de philosophie des sciences qui occupa à partir de 1921 la chaire à l'origine créée pour Mach. Son organe officiel, *Die Ernst Mach Verein*, vit le jour en 1928. L'année suivante, Neurath, Hahn et Rudolf Carnap, qui venait de s'associer au groupe depuis l'Allemagne, signèrent ensemble le manifeste intitulé *Wissenschaftliche Weltanschauung (Conception scientifique du monde)*, credo du positivisme logique qui s'appuie sur un programme destiné à rendre la philosophie scientifique et conçu comme un prélude à une réforme sociale éclairée. Cette publication donne la composition du groupe qui comprenait alors Gustav Bergmann, Rudolf Carnap, Herbert Feigl, Philipp Frank, Kurt Gödel, Hans Hahn, Viktor Kraft, Karl Menger, Marcel Natkin, Otto Neurath, Olga Hahn-Neurath, Theodor Radakovic, Moritz Schlick et Friedrich Waismann, plusieurs « sympathisants » avoués et trois des plus prestigieux défenseurs de la conception scientifique du monde : Albert Einstein, Bertrand Russell et Ludwig Wittgenstein. Le manifeste allait servir à appuyer la professionnalisation de la philosophie dans le monde anglophone et en Scandinavie.

Qualifié de positivisme logique, d'empirisme logique ou de néopositivisme, le mouvement impulsé

par le Cercle de Vienne se fixait cinq priorités, une résolument critique, les quatre autres constructives.

La première, critique, donc, affirmait l'illégitimité de toute forme de connaissance autre qu'empirique ou mathématique. Elle excluait du champ du savoir les théories spéculatives portant sur la nature de la réalité (autrement dit la métaphysique) ou la vérité révélée (la théologie); les platoniciens, les aristotéliens et les scolastiques perdaient donc leurs droits au titre de philosophes, de même que les kantien, les hégéliens et les bergsoniens. Les néopositivistes considéraient en effet que les tendances répressives et la privation de liberté constatées dans les sociétés du passé tenaient précisément à des croyances métaphysiques sophistiquées, certes, mais foncièrement superstitieuses. Dans cette optique, l'élimination de la métaphysique annonçait une réforme sociale radicale. Conformément aux recommandations de David Hume, héros des empiristes logiques, l'analyse logique du langage devait établir la légitimité des concepts et condamner sans appel ceux qui n'étaient pas acceptables. Otto Neurath prenait d'ailleurs à ce point au sérieux l'attaque contre les platoniciens qu'il alla jusqu'à dresser une liste d'expressions interdites parce que métaphysiques; et en procédant de façon si draconienne que, d'après un spécialiste de ses exégètes, à suivre ses exhortations à la lettre il devient à peu près impossible de décrire la position épistémologique de Neurath lui-même. Enfin, bien que la psychanalyse et le marxisme ne soient pas tout à fait exempts de métaphysique, ils vinrent conforter cet effort de remise à plat en expliquant de façon « scientifique » les origines des superstitions métaphysiques.

Pour livrer cette bataille contre la philosophie — et aussi bien d'ailleurs sur un plan plus général —, le Cercle de Vienne s'est essentiellement inspiré du *Tractatus logico-philosophicus* de Ludwig Wittgenstein. Dans les années 1920, en effet, le style très lapidaire et eschatologique du *Tractatus* paraissait en rupture complète avec toutes les traditions philosophiques, et la campagne entamée pour débarrasser le discours humain de ses illogismes trouva en lui une intensité de bienvenue. À ceci près, toutefois, que Wittgenstein se voulait beaucoup plus radical que le Cercle de Vienne. Sa manière bien à lui d'utiliser les tables de vérité lui permettait, à partir d'une seule matrice, d'exposer les rapports étroits existant entre énoncés tautologiques, contradictoires et porteurs de sens. Qui plus est, la matrice indiquait sans doute possible que toute proposition métaphysique est en soi une impossibilité puisqu'il s'agirait d'une proposition empirique mais nécessairement vraie. La triple distinction évoquée ci-dessus était exhaustive, et de ce fait affirmait la vérité « définitive, irréfutable » de l'absurdité de la métaphysique; la réalité des propositions synthétiques *a priori* était tout simplement impossible. Dans le *Tractatus*, Wittgenstein réussissait qui plus est à éclaircir un certain nombre de problèmes relatifs au sens et à la référence qui avaient profondément embarrassé Frege et Russell.

Très attaqués à Vienne sur le plan philosophique — puis politique —, les néopositivistes consacraient l'essentiel de leurs efforts à dénoncer les superstitions métaphysiques. Malgré les échecs qu'ils rencontrèrent dans la capitale autrichienne, leur mouvement se propagea dans le monde entier après la Deuxième Guerre mondiale. Cela étant, les succès remportés contre la métaphysique le furent aux dépens des aspects positifs du programme.

La deuxième priorité portait sur la vérification des prétentions empiriques au savoir. Seules paraissaient recevables celles qu'il était possible de vérifier sur la base de la perception sensorielle; les autres étaient (assez dédaigneusement) considérées comme vides de sens. Désireux de débarrasser le langage de toutes ses ambiguïtés, les néopositivistes allèrent jusqu'à dénoncer l'usage de la métaphore, mais ce rêve de puristes qui rendait incompréhensible le développement scientifique finit par se retourner contre eux.

En troisième lieu, le Cercle de Vienne tenait la physique « théorique » pour l'exemple même du savoir empirique. Les autres formes de connaissance devaient être jugées à son aune et seules les disciplines élaborant leurs théories sur le même mode étaient dépositaires d'un savoir authentique.

En quatrième lieu, une fois identifié le savoir ainsi qualifié d'authentique, il fallait le regrouper au sein d'un corpus unique en procédant à partir d'un « langage d'observation neutre », à même de rendre compte du développement de la science sous forme d'un ensemble cohérent, entier, obéissant à un processus de développement linéaire. Ce n'est qu'à cette condition que les résultats de la recherche scientifique pourraient s'avérer utiles sur le plan social.

Cinquième et dernier point, toutes les questions d'ordre pratique, aussi bien éthiques que politiques, esthétiques, etc., devaient être considérées comme utilitaires et tranchées en fonction du calcul benthamien de l'utilité. Ce dans le but d'éliminer du discours éthique les appels à la validité personnelle de la conscience et les questions métaphysiques sur le sens de la vie, les prétendues « valeurs » n'étant en fait que des réactions émotives à la situation ambiante.

Quant à la philosophie, si le Cercle de Vienne considérait qu'elle pouvait dissiper les ambiguïtés de la pensée grâce à l'analyse logique, il ne l'envisageait pas comme une discipline à part entière, autrement dit scientifique (Mach refusa d'occuper la chaire de philosophie des sciences du département de philosophie de Vienne). Son rôle se limitait à combattre la métaphysique et à formaliser les résultats de la théorisation scientifique afin d'en découvrir toutes les implications; pour ce faire, elle devait s'appuyer sur un langage idéal, exempt des aléas du langage ordinaire. L'ouvrage de Moritz Schlick sur l'espace et le temps dans la théorie de la relativité représente à cet égard un modèle du genre.

Seuls les « résultats » de la recherche scientifique présentaient un intérêt philosophique pour les membres du Cercle de Vienne. Convaincus qu'il était possible

d'arriver à la découverte scientifique par une infinité de moyens, ils ne se souciaient, philosophiquement parlant, que de déterminer si et dans quelle mesure la découverte était « justifiée », en l'examinant sous l'angle de sa contribution à la science. Pour prendre un exemple, le fait que Kepler ait découvert le mouvement elliptique des planètes en partant de la doctrine mystique de Pythagore ne pèse pas lourd en regard de la vérité de sa découverte, laquelle ne pouvait être confirmée que par une vérification publique. De ce point de vue, c'est à juste titre que Karl Popper est associé au Cercle de Vienne car, en dépit de quelques désaccords avec le groupe (sur la réfutation, notamment), il fut toujours partisan de distinguer nettement entre le contexte de la découverte – qui peut présenter un intérêt historique, psychologique, sociologique, politique ou religieux – et le contexte de la justification, qui seul est doté d'une importance philosophique.

La bataille engagée par les néopositivistes contre la métaphysique était en effet motivée par leur refus d'accepter que des individus ou des groupes aient un accès privilégié au savoir. Pour eux, tout savoir authentique était par définition intersubjectif, ou public ; en d'autres termes, la science constituait avant tout une entreprise collective caractérisée par des critères d'acceptabilité précis.

Ce type de préoccupations – mais aussi, bien sûr, la diffusion du pangermanisme, puis des thèses nazies, dans les milieux universitaires viennois, et le climat politique inquiétant qui régnait dans la capitale autrichienne – engagèrent les membres du Cercle de Vienne à multiplier les contacts européens avec les philosophes travaillant dans le même esprit ; dans le courant des années 1930, le néopositivisme trouva des relais à Berlin, Prague, Lvov, Varsovie, Uppsala et Munster, ainsi que chez les pragmatistes et les logiciens américains. Sa rapide propagation dans ces groupes ainsi que dans les congrès successivement organisés à Prague (1929, 1934), Oxford (1930), Paris (1935, 1937), Copenhague (1936), le Cambridge anglais (1938) et le Cambridge américain (1939) témoigne aussi bien de la résonance de son programme conçu pour rendre la philosophie scientifique que de l'énergie déployée par ses défenseurs. Aussi n'est-il pas surprenant que l'empirisme logique en soit venu à dominer la scène intellectuelle des pays anglo-saxons et scandinaves ; après la guerre, ce sont ses détracteurs qui furent tenus de se justifier.

Reste que les quatre points constructifs du programme ne suscitaient guère qu'un accord de pure forme ; comme tout mouvement d'idées profondément politique – ce qui fut aussi le cas, par exemple, de la phénoménologie –, le groupe donnait de l'extérieur une impression d'homogénéité assez trompeuse. Schématiquement, les différences de positions s'exprimaient en fonction de l'interprétation, rigoureuse ou souple, de ces quatre priorités constructives.

Pour les tenants d'une interprétation rigoureuse (Schlick et Carnap, dans un premier temps), la vérification consistait à comparer aux sensations des

propositions portant sur des points précis, de manière à déterminer si elles leur correspondaient trait pour trait, autrement dit si elles étaient vraies. Pour les autres, cette recherche d'une « correspondance » absolue héritée de Locke était par trop métaphysique puisqu'elle présupposait *de facto* la réalité d'un monde extérieur à l'esprit. Revenant au nominalisme de Berkeley, ils estimaient que la vérité se déduisait d'une « cohérence » entre une proposition (au sens littéral de formule « proposée » comme vraie) et le savoir scientifique accepté.

La même distribution prévalait à l'égard du physicalisme. Les purs et durs voyaient dans la théorie physique un état idéal de la connaissance scientifique auquel devaient aspirer toutes les autres branches du savoir ; il faut d'ailleurs, fût-ce brièvement, préciser que le règne de « terreur méthodique » qui sévit au cours des années 1950 et 1960 dans des pays comme les États-Unis, mettait les autres disciplines en demeure de s'excuser de ne pas présenter les caractéristiques de la théorie physique. Le physicalisme version souple s'en tenait pour sa part à décréter que les seules théories méritant d'être tenues pour scientifiques portaient sur le monde physique, autrement dit laissaient de côté les entités non matérielles ; cette position n'était au fond qu'un prolongement de la guerre menée contre la métaphysique, avec des implications pratiques dans des domaines telle la psychologie, par exemple, dont le vocabulaire comporte quantité de termes comme « pensée » ou « esprit », dont la signification ne saurait être vérifiée à partir des données sensorielles.

De même, l'unité de la science ouvrait sur deux types d'interprétation, les uns parlant d'unité logique, les autres d'unité encyclopédique. Dans le premier cas (Carnap), n'était logique, et ne devait donc être tenu pour scientifique, que ce qu'il était logiquement possible de dériver de la physique (position qui assignait un objectif pour le moins curieux à la formalisation des théories admises). Dans le second (Neurath), l'unité de la science apparaissait comme une obligation de partage des résultats de la recherche, ce aussi bien entre les scientifiques de formation différente qu'entre les milieux scientifiques au sens large et le grand public.

S'agissant de la cinquième priorité du programme, les rigoristes estimaient qu'il n'existait tout simplement rien d'« éthique », en dehors du débat inéluctable sur les moyens d'assurer dans toute la mesure du possible le bien du plus grand nombre. Ceux qui s'en tenaient à une conception souple de l'éthique (Schlick) restaient attachés à l'idée nietzschéenne voulant que le renouvellement de la société passe par l'engagement actif de la jeunesse dans la poursuite des idéaux « scientifiques », et par une défense résolue de la quête du bonheur au sens épicurien (Neurath).

Sur un plan général, le camp des intransigeants a dominé le mouvement néopositiviste. Carnap l'a emporté sur Neurath, à un point tel que l'on commence maintenant seulement à découvrir les points forts du courant le moins influent (et qui s'avèrent d'ailleurs les

seuls viables). Ainsi, lorsque le physicien Michel Polanyi s'en prit au physicalisme absolu au motif, empirique, qu'il ramenait la physique à de la théorie pure sans tenir compte du fait que l'expérimentation suppose un savoir non exprimable sous forme de propositions, ses arguments furent violemment dénoncés comme une tentative de mystification du savoir. Bien plus, aux États-Unis et dans les pays scandinaves le triomphe de la ligne dure du programme de l'École de Vienne signa, outre la fin de la métaphysique, le détroitement de la philologie et de l'histoire qui perdirent leur statut de disciplines maîtresses des sciences humaines ; l'étude du langage resta désormais limitée à la logique formelle et l'histoire s'en tint, selon le mot de Hume, à dérouler le récit des « crimes et des folies » de l'humanité.

Les excès engendrés par la stricte interprétation du programme des néopositivistes devaient susciter, à partir des années 1950, une réaction virulente de la part de philosophes tels Norwood Russell Hanson, Stephen Toulmin et Thomas Kuhn (pour ne citer que quelques-uns des plus célèbres), qui remirent en cause le physicalisme à partir d'arguments puisés dans les derniers écrits philosophiques de Wittgenstein. Tous étaient des physiciens qui, réitérant la révolte solitaire de Polanyi, contestaient l'image de la physique présentée par les « physicalistes » purs et durs. Pour eux, la formalisation ne suffisait pratiquement jamais à donner aux physiciens la clef des problèmes qu'ils rencontraient ; et ils soutenaient que les physiciens et l'ensemble des scientifiques avec eux s'interrogent en fait beaucoup plus sur ce qui les empêche de comprendre les résultats de leurs recherches que sur une difficulté au mieux du domaine de l'herméneutique. Pour observer sous un jour nouveau les vrais problèmes qui se posent en physique, il est indispensable de comprendre d'abord la façon dont les physiciens raisonnent en pratique, ce qui implique d'examiner très sérieusement des exemples tirés de l'histoire. Ainsi en est-on venu à considérer l'histoire de la physique non plus comme un passé révolu mais comme la condition de son développement futur puisque c'est en elle que réside la dynamique de sa logique pratique. Attentivement étudiée, cette histoire montre que le développement de la discipline est tout sauf linéaire et que les divers domaines de recherche de la physique ne partagent pas le même cadre méthodologique. Pour le dire autrement, dans la pratique de cette science le savoir est trop étroitement associé à des *Fragestellungen* spécifiques pour qu'il soit possible d'en faire état avec précision à un niveau général. L'éclairage réaliste ainsi jeté sur la physique a pour fin révélé un élément jusque-là dissimulé par l'attachement exclusif des néopositivistes à la théorie : le savoir est pour l'essentiel parcellaire – ce qui du même coup compromettrait sérieusement le programme radical élaboré visant à réaliser l'unité de la science.

Au bout du compte, pourtant, la position plus souple que défendait Neurath fut exhumée et réhabilitée par l'importance accordée à l'histoire en philosophie des sciences. C'est ainsi que les pratiques acquises par les

scientifiques au cours de leur formation en sont venues à être perçues comme constitutives du savoir ; qu'au lieu de « découverte » on parla plus volontiers d'« invention », sans plus mettre cette dernière en balance avec la justification puisqu'il s'avérait que les procédures autorisant le développement scientifique constituaient en fait des modes d'invention de critères nouveaux, des modes, par conséquent, de légitimation de l'extension du « langage de la physique » et pas simplement de découverte de « faits » nouveaux. Il devenait dès lors impossible de séparer le contexte de la découverte de celui de la justification, dans la mesure où l'examen attentif des « découvertes » dignes de ce nom permet de constater qu'elles s'accompagnent d'une reformulation des critères d'explication de la branche particulière qu'elles concernent et que, partant, les scientifiques sont amenés à enrichir le langage propre à leur domaine de recherche.

La perspective historique adoptée par la philosophie des sciences révèle que si les disciplines scientifiques sont étroitement associées les unes aux autres, elles ne sont pas subordonnées en fonction d'une hiérarchie logique. Le modèle comparatif historique a supplanté l'idée d'une évolution linéaire, progressive. Curieusement, toutefois, l'unité de la science fut préservée en ce sens où, pour employer une image wittgensteinienne, les membres de la famille d'activités regroupées sous le nom de science ne se laissent comprendre que si on les compare les uns aux autres. Préciser leurs différences permet du même coup de préciser leurs caractéristiques spécifiques respectives. En indiquant que le sens s'élabore dans l'entrelacement des mots et des actes auquel donne lieu l'imitation d'exemples, Wittgenstein parvint à démontrer que c'est le mode particulier de la formation des concepts qui rend le savoir possible, que la portée des concepts reste limitée à des contextes précis, et en définitive que, s'agissant du langage, l'analyse logique complique plus les choses qu'elle ne les éclaircit.

La critique du concept monolithique de rationalité mis en avant par les radicaux du Cercle de Vienne ouvre sur une conception de la rationalité passionnément tournée vers la pratique, à la fois pluraliste et ancrée dans la tradition.

- AYER A.J. dir., *Logical Positivism* Londres/Glencoe (Ill.), Allen & Unwin-Free Press, 1959. – HALLER R., « Studien zur österreichischen Philosophie », *Studien zur österreichischen Philosophie*, vol. 1, Amsterdam, 1979 ; « Fragen zur Wittgenstein », *Studien zur österreichischen Philosophie*, vol. 10, Amsterdam, 1986. – HANSON N.R., *Patterns of Discovery*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1958. – JANIK A. & TOULMIN S., *Wittgenstein, Vienne et la modernité* (1973), trad. fr., Paris, PUF, 1978. – JOHANNESSEN K.J., *Tradisjon og skoler i moderne vitenskapsfilosofi*, Bergen, 2^e éd., 1987. – JØRGENSEN J., « Foundations of the Unity of Science », *The Development of Logical Positivism*, Chicago, vol. 2, 1951. – KUHN T., *La structure des révolutions scientifiques* (1982). – NEURATH O., *Empiricism and Sociology*, Dordrecht, The Vienna Circle Collection, vol. 1, 1973, p. 299-318. – PASSMORE J., *A Hundred Years of Philosophy*, Londres,

Duckworth, 1957. — POLANYI M., *Personal Knowledge*. Chicago, Chicago Univ. Press, 1958. — SOULEZ A. dir., *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*. Paris, PUF, 1985. — STADLER F., *Studien zum Wiener Kreis : Ursprung, Entwicklung und Wirkung des logischen Empirismus im Kontext*, Suhrkamp, 2 vol. (à paraître). — TOULMIN S., *Foresight and Understanding*, Londres, 1961 : *Human Understanding*, Princeton, 1973.

Allan JANIK
(trad. O. Bonis)

→ Carnap ; Conventionnalisme ; Donné ; Épistémologie ; Fait ; Feigl ; Frege ; Mach ; Neurath ; Objectivité ; Physicalisme ; Positivisme ; Pragmatisme ; Quine ; Rationalité ; Réfutabilité ; Vérification ; Wittgenstein et le positivisme logique.

CHALEUR

PHYSIQUE

Jusqu'à la mise en ordre newtonienne, la physique se réduit pour l'essentiel à la mécanique, à l'élucidation des rouages de la « grande horloge ». Mais cette horloge universelle, qu'est-ce qui la fait fonctionner ?

Cette question, qui va donner le départ de l'épanouissement de la physique classique, de 1700 à 1900, ce n'est pas Newton (l'ennemi des « hypothèses ») qui la pose. Mais curieusement c'est son disciple le plus proche, Edmond Halley. Celui-ci, en effet, n'est pas seulement astronome, mais aussi géophysicien : son explication des alizés par le chauffage inégal des masses d'air atmosphérique donne le départ de la « météorologie », qui va jouer un rôle décisif dans l'élaboration des idées sur la chaleur.

Cette élaboration est en effet liée à l'étude des gaz, et la météorologie n'est qu'un aspect de cette liaison. Pour une bonne part, en matière de chaleur, la théorie se fonde sur la technique, ici la technique des « machines à feu », qui à leurs débuts exploitent la force exercée par l'air atmosphérique sur un piston derrière lequel on a fait le vide... Enfin, la thermométrie repose dès sa naissance sur la dilatation des gaz, ou sur leurs variations de pression à volume constant quand la température varie.

Ces différentes manières d'aborder la chaleur sont déjà présentes chez les pionniers du XVIII^e s., antérieurs à Halley, en particulier chez Boyle et Amontons.

Du feu au calorique

La première ébauche du thermomètre est le « thermoscope » de Galilée, et ce sont les disciples de celui-ci, surtout Torricelli et Viviani, qui mettent en évidence, avant Pascal, la pression atmosphérique : dès 1645, les deux « fronts » des gaz et des thermomètres sont ouverts. Mais c'est avec Boyle, vers 1660, que démarre pour de bon l'étude de la chaleur. Il établit sa loi des gaz (la « loi de Mariotte » des Français), il étudie les machines avec Hooke et Papin, il propose un thermomètre à liquide, et il réfléchit à la nature du « chaud », qu'il semble consi-

dérer comme un mouvement de la matière. En effet, il étudie l'échauffement par frottement, et affirme que deux glaçons fondraient plus vite si on les frottait l'un contre l'autre.

Cette approche multiple est aussi celle de Guillaume Amontons. Il montre (120 ans avant Gay-Lussac) que l'augmentation relative de pression d'un gaz, à volume constant, est indépendante de la pression initiale, et il fonde sur cette découverte un thermomètre à gaz qui lui permet de vérifier l'idée de Halley (1691) suivant laquelle l'eau bout à température fixe. Amontons propose d'en tirer un point fixe de l'échelle des températures, ce que feront bientôt Réaumur, puis Celsius (1742), bien que la première échelle, celle de Fahrenheit (1724) utilise des points fixes moins reproductibles.

Amontons propose aussi une « machine » formée d'une roue à rayons creux contenant de l'eau et de l'air, qui tourne quand on la chauffe d'un côté : évidemment peu pratique, cette machine n'en est pas moins la première à envisager de tirer d'un chauffage un travail mécanique... Amontons meurt prématurément en 1705, au moment où Boerhave, à Leyde, commence dans ses cours à évoquer des « quantités de feu » — c'est encore ainsi qu'il appelle la chaleur, peut-être influencé par les « particules de feu » de Descartes. Mais le feu de Boerhave a une qualité toute nouvelle : il se conserve ! Il peut passer d'un corps à un autre, mais on ne saurait ni le créer ni le détruire. Cela permet une première ébauche de calorimétrie : Boerhave montre qu'en mélangeant des masses égales d'eau à des températures différentes, on obtient de l'eau à une température qui est la moyenne des deux premières.

Vers le milieu du siècle, l'Écossais Black reprend ces travaux, et met sur pied une calorimétrie complète des solides et des liquides. Mais cette « chaleur » dont il mesure des quantités, quelle est sa nature ? À cette époque, l'hypothèse d'une chaleur matérielle, une sorte de gaz appelé « calorique », commence à supplanter le « mouvement » pressenti par Boyle. Et si Black se garde de prendre position, son traitement quantitatif renforce évidemment le camp du calorique : en 1783 Lavoisier et Laplace envisagent encore les deux hypothèses dans leur *Mémoire sur la chaleur*, mais en 1789, dans le *Traité élémentaire de Chimie* de Lavoisier, le calorique figure parmi les corps simples, au même titre que l'hydrogène.

Calorique ou « mouvement » ?

Au moment où l'autorité de Lavoisier officialise la nature matérielle de la chaleur, une voix s'élève pour le contredire, celle de Rumford (1753-1814). Ingénieur américain établi en Bavière, chargé de superviser l'alésage des canons de bronze, Rumford sait bien que, dans cette opération, la pièce chauffe, et qu'il faut l'arroser copieusement. L'explication en vogue est le dégagement de calorique rendu possible par la mise en poussière du bronze qui l'emprisonnait. Seulement la pièce

chauffe même si le foret, émoussé, ne l'entame plus du tout : Rumford en conclut que la chaleur n'est pas un gaz matériel, mais « une sorte de mouvement ».

Cette interprétation va mettre cinquante ans à s'imposer ! En effet, pour les contemporains elle n'apparaît pas comme un progrès, mais plutôt comme un retour aux vieilles idées de Boyle, antérieures à la calorimétrie. Aussi la plupart des chercheurs évitent de prendre position, à l'exemple de Black : on ignore ce qu'est la chaleur, mais on sait « en » mesurer des quantités... Les autres continuent à soutenir le modèle du calorique, même s'ils émettent parfois des réserves : ce sera encore le cas de Carnot en 1830.

Une complication supplémentaire naît de la découverte de la chaleur rayonnée par Scheele, en 1777 : elle a certaines propriétés de la lumière, se propage en ligne droite, se réfléchit... mais ne traverse pas une vitre ! Ce sont les météorologistes suisses, de Saussure en particulier, qui l'étudient le plus attentivement, mais l'astronome Herschel la détecte dans un spectre solaire, au-delà du rouge : c'est donc une sorte de lumière... Or, en 1800, à l'initiative de Young, on se demande si la lumière ne serait pas une onde, c'est-à-dire un « mouvement » d'oscillation : qu'en est-il de sa parente la chaleur rayonnée ? Serait-ce aussi un mouvement ?

Ces études sur l'infrarouge font en tout cas progresser la théorie de la chaleur, dès qu'on les applique au milieu naturel : l'*Essai sur la Rosée* de Wells (1814) est directement à l'origine de la synthèse que réalise Fourier en 1822 dans son *Traité analytique de la chaleur*. Avec celui-ci, la chaleur accède à la richesse mathématique jusqu'ici réservée à la mécanique. Mais la chaleur de Fourier est encore un « fluide indestructible », c'est-à-dire du calorique : ce modèle sort encore renforcé des travaux pourtant fort remarquables réalisés entre 1800 et 1825. C'est en particulier la position de celui qui va faire accomplir un pas décisif aux idées sur la chaleur : Sadi Carnot.

Des machines à la théorie

Dans l'ambiance d'activité scientifique qui imprègne Paris au début du XIX^e s., les savants multiplient les études sur les gaz : des lois de Gay-Lussac, en 1802, à l'équation des adiabatiques établie par Laplace et Poisson en 1820, les connaissances sur les gaz augmentent sans cesse. Mais c'est un tout autre chemin que va emprunter Carnot pour faire accomplir aux idées sur la chaleur un pas tout à fait décisif : il va partir de l'étude des « machines à feu ».

Celles-ci n'ont pas cessé de se perfectionner tout au long du XVIII^e s., à partir du cylindre à piston que Papin est le premier à avoir rempli de vapeur, mais c'est Watt, entre 1765 et 1775, qui les fait accéder à l'âge adulte, à travers une série d'inventions dont la plus importante est sans doute la première : celle du « condenseur ».

Jusque-là, la machine en usage est celle de Newcomen, où l'agent moteur est l'atmosphère, enfonçant

un piston dans un cylindre. Ce cylindre est d'abord rempli de vapeur d'eau venant d'une chaudière, puis on le refroidit, la vapeur se condense et la pression intérieure baisse : quand on débloque le piston, la pression atmosphérique peut l'enfoncer en fournissant du travail. Seulement, il faut réchauffer ce cylindre froid avant le cycle suivant, et cela gaspille beaucoup de vapeur...

Watt, « garçon de laboratoire » à l'université de Glasgow, cherche à éviter ce gaspillage, et il a l'idée d'utiliser à cet effet un deuxième récipient, constamment refroidi par arrosage. Dès que la vapeur a rempli le cylindre, on bloque le piston, puis on met le cylindre en communication avec ce « condenseur », où la pression est toujours faible : la vapeur s'y précipite et s'y condense, et la pression tombe donc dans le cylindre lui-même — sans qu'il ait dû se refroidir ! Cette seule idée multiplie la rentabilité de la machine plus que tous les perfectionnements qu'on y apporte depuis un demi-siècle ! D'autre part elle est indirectement à l'origine d'une autre idée de Watt : faire pousser sur le piston la vapeur de la chaudière, et non plus l'atmosphère... De là ses successeurs passeront à la machine à haute pression, qui ne nécessite plus de condenseur puisqu'on fait jouer ce rôle à l'air ambiant. Cela permet de construire des locomotives, mais fait perdre de vue la nécessité de la « source froide » que matérialisait le condenseur de Watt.

Or cette « source froide » est fondamentalement nécessaire : c'est la première découverte de Sadi Carnot quand celui-ci décide, peu après 1820, d'édifier une théorie permettant d'optimiser la rentabilité des machines thermiques. À travers une suite de raisonnements où il introduit en particulier la notion de cycle et celle de réversibilité, il parvient à énoncer ce qui deviendra plus tard le « second principe de la Thermodynamique » — vingt ans avant que le « premier » soit énoncé par Joule — suivant lequel le travail mécanique fourni par la machine vient de la « chute du calorique » d'une température élevée à une température basse. Carnot est en effet partisan du calorique, et dans ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824), il écrit clairement : « La production de puissance motrice est donc due [...] non à une consommation réelle de calorique, mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid. »

Malgré ce postulat erroné d'une « conservation du calorique », la théorie de Carnot permet des progrès considérables : il en tire les premières lois sur les échanges de chaleur dans les transformations isothermes des gaz, et parvient à déterminer la différence entre les chaleurs spécifiques des gaz à pression constante et à volume constant.

Pourtant, avant même la sortie de ses *Réflexions*, Carnot commence à douter de la conservation du calorique — c'est-à-dire de la matérialité de la chaleur. Mais il meurt en 1832, avant d'avoir pu résoudre l'apparente contradiction entre les succès de sa théorie et la fausseté de la base sur laquelle il l'a édifiée...

Carnot ou Joule ?

La publication du livre de Carnot passe presque inaperçue : nous ne le connaissons que grâce à Clapeyron, qui le cite dans un mémoire publié en 1834, et rapidement traduit en anglais et en allemand... C'est ainsi que Kelvin d'abord puis Clausius vont connaître le travail de Carnot.

Après ses études à Cambridge, Kelvin travaille en France en 1845, mais c'est seulement en 1848 qu'il parvient à se procurer un exemplaire des *Réflexions*. Il en tire aussitôt une échelle absolue de température, qui montre bien le caractère fondamental de la théorie de Carnot, mais sans remettre en cause, bien au contraire, l'existence du calorique. Or cette existence est sérieusement attaquée, depuis trois ans, par un autre Écossais, James Joule.

À partir de son étude des effets calorifiques du courant électrique (l'« effet Joule »...), celui-ci parvient en effet à l'idée de la nature énergétique de la chaleur, et à l'« équivalence chaleur-travail ». Il multiplie les démonstrations expérimentales, et tente d'ébranler les certitudes de ses collègues au sujet du calorique. C'est difficile, et la Royal Society, par exemple, refuse son article... De la même façon, en Allemagne, le jeune Helmholtz se voit refuser par les *Annalen der Physik*, en 1847, un article intitulé « Sur la conservation de l'énergie » !

L'un des plus irréductibles partisans du calorique est Kelvin, fort des succès de Carnot, de Clapeyron et de lui-même, tous fondés sur la « chute de température » d'une quantité invariable de calorique... Kelvin invente le mot « thermodynamique », mais celui qui va lui donner un contenu, en réconciliant Carnot et Joule, c'est Clausius.

Celui-ci publie en 1850 un article où il déclare qu'« à y regarder de plus près », il n'y a pas nécessairement de contradiction entre Carnot et Joule : la machine transforme en travail une partie de la chaleur reçue de la source chaude (et Joule a raison), mais une partie seulement, le reste étant nécessairement cédé à une source froide (et Carnot a raison) ! Dès cet instant, la thermodynamique repose sur ses deux principes, le premier affirmant la nature énergétique de la chaleur et le « second » la nécessité de la source froide pour qu'une machine donne du travail... Kelvin se rallie un an plus tard, et remanie son échelle absolue de température en tenant compte des deux principes. Maintenant, si une machine réversible reçoit de la source chaude une quantité de chaleur Q , et en cède à la source froide une quantité Q' , on peut définir une échelle absolue de température par la relation $Q/T = Q'/T'$. C'est à partir de cette relation que Clausius va faire le pas suivant.

L'entropie

En généralisant la relation de Kelvin à plusieurs sources, puis à une source à température variable, Clausius parvient à montrer que, le long de n'importe

quel chemin réversible entre un état A et un état B, l'intégrale de la quantité dQ/T a la même valeur : il existe donc une fonction d'état S telle que cette valeur soit la différence $S(B) - S(A)$. Cette fonction d'état Clausius l'appelle « entropie ».

L'intérêt révolutionnaire de l'entropie est qu'elle fait intervenir la réversibilité du processus : si on passe de l'état A à l'état B par un processus irréversible, la même intégrale – si on peut encore la définir – est inférieure à $S(B) - S(A)$. Par exemple, dans une transformation d'un système isolé (donc sans échange de chaleur), l'entropie du système reste la même si la transformation est réversible, alors qu'elle augmente si celle-ci est irréversible ! Voilà la chaleur dotée d'une notion à première vue incompatible avec la mécanique du point (où tout est réversible). C'est pour tenter de résoudre cette nouvelle contradiction que Clausius va fonder la mécanique statistique.

La thermodynamique classique, quant à elle, va acquérir de nouveaux outils, et surtout de nouveaux domaines. Mais tout cela pourra continuer à se décrire à l'aide des paramètres usuels, et des deux fonctions d'état de Clausius, énergie interne et entropie : dès 1854, la chaleur est munie de la « théorie complète » que réclamait Carnot trente ans plus tôt...

► BRUSH S.G., *The kind of Motion we call Heat*, Amsterdam, North Holland, 2 vol., 1976 – CARNOT S., *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, éd. crit. R. Fox, Paris, Vrin, 1978. – CARWELL D.S.L., *From Watt to Clausius*, Londres, Heinemann, 1971. – MAURY J.-P., *Carnot et la machine à vapeur*, Paris, PUF, 1986.

Jean-Pierre MAURY

→ Corps noir ; Énergétisme ; Énergie ; Entropie ; Fin thermique de l'univers ; Fourier ; Gaz (Théorie des) ; Phlogistique ; Travail.

CHAMP

PHYSIQUE

Le concept de champ, comme beaucoup des concepts de la physique, a pour origine une difficulté rencontrée par les physiciens à une certaine époque, difficulté résolue par l'introduction (on serait tenté de dire l'invention) d'un nouveau concept dont la nécessité s'est progressivement imposée. La difficulté qui a été résolue grâce au concept de champ, inventé par Faraday au milieu du XIX^e s., est celle qui résulte de la notion d'action à distance.

On sait que l'un des titres de gloire de Newton est d'avoir interprété la chute des corps comme une attraction. Attraction entre un corps et la Terre en l'occurrence, mais qui a valeur générale (d'où le nom d'attraction universelle) car elle se fait sentir dès lors que deux corps matériels (l'adjectif matériel est important, comme on va le voir) sont en présence l'un de l'autre, séparés par une certaine distance. Agissant sur chacun des deux corps en présence, une force (au sens

newtonien du terme, c'est-à-dire ce qui fait dévier un objet de son mouvement inertiel, mouvement qui est le sien en l'absence de force extérieure) apparaît. Elle est attractive, dirigée le long de la droite qui joint les centres de gravité des deux corps considérés et inversement proportionnelle au carré de leur distance mutuelle. Cette interaction entre les deux corps est instantanée (elle apparaît dès que les deux corps sont en présence l'un de l'autre) et opère à distance, puisque les deux corps sont séparés par une certaine distance. Tel est l'essentiel de la doctrine newtonienne, ou du moins de ce qui a été propagé sous ce nom par les émules de Newton.

De fait, cette manière de présenter sa théorie n'était pas du goût de Newton. Homme du XVII^e s., il répugnait à tout ce qui pouvait ressembler de près ou de loin aux qualités occultes dont la pensée scolastique avait usé et abusé et en opposition auxquelles la nouvelle physique (celle de Galilée et de Descartes) s'était construite. Par qualité occulte on entendait une capacité, inhérente à la matière, intrinsèque, d'agir sans qu'il y ait contact entre la matière agissante et celle qui est soumise à son « pouvoir ». Or la force de gravitation, agissant entre deux corps éloignés, n'était pas, apparemment du moins, une force de contact (choc, pression, traction). La matière semblait donc agir là où elle n'était pas. « Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, en sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance au travers du vide, sans médiation d'autre chose, par quoi et à travers quoi leur action et force puissent être communiquées de l'un à l'autre est pour moi une absurdité dont je crois qu'aucun homme, ayant la faculté de raisonner de façon compétente dans les matières philosophiques, puisse jamais se rendre coupable » (Newton, *Deuxième lettre à Bentley*, 1692). Et Newton d'ajouter (ailleurs) : je ne forge pas d'hypothèse (*hypothesis non fingo*), c'est-à-dire, je ne fais aucune hypothèse sur la manière dont l'attraction entre les corps s'effectue ; tout ce que je puis donner c'est la forme mathématique de cette loi ; à d'autres d'expliquer comment il est possible que deux corps éloignés l'un de l'autre interagissent ; seulement, je considère les forces d'attraction « non comme des qualités occultes, qui résulteraient de la forme spécifique des choses, mais comme des lois générales de la Nature, par lesquelles les choses même sont formées » (Newton, Question 31 de l'*Optique*). On remarquera que Newton, loin de prendre la matière pour une notion triviale et allant de soi, suggère que la matière elle-même pourrait être expliquée par l'attraction universelle.

C'est là une position tout à fait singulière dans le siècle de Newton. La plupart de ses disciples, éblouis par la puissance de sa théorie, manifestée en particulier par l'exactitude phénoménale des calculs astronomiques qu'elle autorise, ont soit ignoré la difficulté des forces à distance, soit opté pour une interprétation faisant intervenir la matière : l'espace entre les deux objets serait rempli d'un milieu incolore, impalpable et impondérable mais néanmoins matériel – l'éther – qui

assurait la transmission de proche en proche, par contact, de la force d'attraction d'un objet à l'autre – un peu à la manière dont une ride se propage à la surface du milieu matériel que constitue l'eau d'un bassin et, partie d'un bord du bassin, vient heurter l'autre bord. Cette interprétation était conforme à ce que plus tard on a appelé la « philosophie mécaniste », selon laquelle l'explication des phénomènes devait nécessairement faire intervenir des forces de contact agissant sur des objets matériels. La grandeur de Newton tient (entre autres) à ce qu'il était probablement le seul dans son époque à ne pas adopter cette philosophie qui, pourtant, reposait sur les succès de sa propre théorie. Cependant, on appréciera à quel point le cours des choses est complexe ; en effet, cette indépendance d'esprit était le fruit, non pas d'un anticonformisme somme toute banal, mais d'une conviction théologique savamment argumentée : pour Newton, l'espace était le *sensorium Dei*, organe sensoriel de nature divine grâce auquel Dieu assurait la transmission de l'attraction d'un corps à l'autre.

C'est également un argument fortement teinté de religion, sinon de théologie, qui permit à Faraday, un siècle et demi plus tard, d'accomplir les premiers pas dans la voie de la résolution de la difficulté signalée par Newton. Faraday, on le sait, n'était pas un savant ; c'était un ouvrier relieur autodidacte, n'ayant pas goûté aux délices enivrants des calculs effectués à partir de la théorie de Newton. Ayant acquis ses premières connaissances en physique au service d'un vrai savant, qui lui avait confié la charge de mettre au point les expériences qu'il réalisait ensuite lors de conférences publiques, Faraday était avant tout un expérimentateur très habile. Préoccupé par la notion d'action à distance que son bon sens, non obscurci par des études trop brillantes, lui présentait comme inacceptable, Faraday s'était bâti une argumentation théologique à l'encontre de l'idée de force à distance. Faraday considère un corps, le Soleil par exemple, seul dans l'espace. Il n'y a pas d'attraction puisque pour cela il faut deux corps. Il n'y a donc pas, dans les termes de Faraday, de force, le mot force ayant à l'époque un sens qui ne se réduit pas à celui que nous lui attribuons aujourd'hui mais inclut également une notion proche de ce que nous appelons énergie. « On » place la Terre à la distance qui est la sienne du Soleil. Immédiatement apparaît la « force de gravitation ». Il y a création brutale, instantanée, de « force ». Or, même Dieu n'est pas capable de produire une variation aussi brusque de « force » (le monde, après la Création, évolue de façon lente). Pousant un peu plus loin le raisonnement, Faraday conclut que de deux choses l'une : ou bien il y a création de force, ou bien cette force existait déjà, avant qu'« on » place la Terre, lorsque le Soleil était seul dans l'espace. Le premier terme de l'alternative étant exclu, ne reste que la seconde possibilité. Il y a, comme dit Faraday, dans l'espace entourant le Soleil par ailleurs seul, « une condition nécessaire à l'action », le mot « condition » étant ici à entendre non pas dans son sens logique mais

dans celui d'état (comme dans « condition ouvrière », par exemple).

Pensant que « l'expérience, de par sa nature, est plus capable [que les mathématiques] de suggérer de nouvelles pensées », Faraday entreprend d'étudier l'espace qui entoure un corps seul, à la recherche de cette « condition nécessaire à l'action ». Il est aidé dans cette tâche par le fait que la mode à cette époque est à l'exploration des forces électriques et magnétiques, forces qu'on se représente alors tout naturellement sur le modèle de la force de gravitation, c'est-à-dire, agissant à distance. Faraday constate alors qu'autour d'un aimant isolé l'espace n'est pas inactif (comme il devrait l'être en l'absence d'un autre aimant) : en chaque point de cet espace les aiguilles qui constituent la limaille de fer prennent une orientation bien précise — ce qui indique la présence en chacun de ces points d'une force qui oblige les aiguilles à s'aligner le long de cette direction. Faraday utilise les mots « ligne de force », ou « champ », pour parler de cette modification de l'espace autour de l'aimant. Il va de soi que ce qui vaut pour les forces magnétiques peut être transposé à la fois aux forces électriques et aux forces d'attraction gravitationnelles. Le Soleil seul dans l'espace modifie ce dernier ; il crée un champ défini en chaque point de l'espace (donc relevant du continu), en particulier à l'endroit où l'« on » place la Terre. La force d'attraction qui s'exerce alors sur celle-ci est l'effet produit sur elle par le champ créé par le Soleil. Inversement le Soleil subit une force l'attirant vers la Terre, effet du champ créé par cette dernière sur lui. Il n'y a plus d'action à distance puisqu'en chaque point de l'espace existe un champ que la présence d'un autre corps révèle par la force ressentie par ce dernier.

Cette conception des interactions diffère radicalement de celle véhiculée par le néstorianisme. L'action que les disciples de Newton imaginaient comme un pont joignant deux corps, jeté au-dessus de l'abîme, est conçue par Faraday comme une opération faisant intervenir chacun des deux corps séparément : chaque corps, pour son propre compte, émet un champ et subit l'action du champ créé par les autres objets matériels. Ce qu'il est convenu d'appeler l'attraction universelle (et cela vaut pour tous les autres types d'interaction, répulsive ou attractive, électrique, magnétique, etc.) est donc divisé en deux moments (au sens philosophique du terme) n'affectant qu'un seul corps à la fois : un moment actif (chaque corps émet un champ qui n'est déterminé que par les caractéristiques physiques de ce corps) ; et un autre passif (chaque corps subit le champ créé par les autres corps avec pour effet que sa quantité de mouvement, et uniquement la sienne, se trouve modifiée au cours du temps). Évidemment, les processus sont réciproques, mais il n'en reste pas moins que chaque corps agit et subit par lui-même.

Dans l'espace entre les deux corps, le champ se propage conformément à des lois bien définies : par exemple, les équations de Maxwell dans le cas du champ électromagnétique, auquel, comme on sait, Maxwell a assimilé la lumière. Ainsi se trouve résolu le

problème d'une action instantanée ; l'action ne se fait jamais sentir à distance dans l'instant, il lui faut le temps de se propager du lieu où elle est émise à celui où elle est ressentie.

Par ailleurs, comme le montrent les expériences de Faraday où une aiguille aimantée change de direction et comme l'a établi théoriquement Maxwell trente ans plus tard, le champ transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement : un corps qui émet un champ (par exemple de la lumière) perd de l'énergie, mais aussi de la quantité de mouvement : il subit un recul dans la direction opposée à celle de l'émission. De même, un corps qui subit un champ (qui reçoit de la lumière, par exemple), absorbe de l'énergie, mais aussi de la quantité de mouvement (c'est ce que dans le cas de la lumière on appelle la pression de radiation). D'où la conclusion qui s'impose : le champ, dans la mesure même où il transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement, est lui-même de l'énergie et de la quantité de mouvement localisées dans l'espace. Longtemps on a cru que cette énergie et cette quantité de mouvement avaient un support matériel : le fameux éther invisible, impondérable, indéformable, etc. On sait que c'est l'article d'Einstein fondateur de la théorie de la relativité restreinte qui en 1905 a sonné le glas de cet éther que ses prédécesseurs avaient déjà dépouillé de toute caractéristique physique à l'exception d'une seule : être absolument immobile — en contradiction avec le principe de relativité énoncé par Galilée qui exclut précisément un objet physique puisse être immobile de façon absolue. Einstein (qui n'avait alors que 26 ans) est en somme celui qui a osé dire que le roi était nu : posant au fondement de sa théorie d'une part l'existence du champ tel que l'avait décrit Maxwell (avec comme caractéristique essentielle de se propager à la vitesse dite de la lumière, vitesse qui garde la même valeur dans tous les référentiels) et d'autre part l'obligation pour la lumière (et donc le champ électromagnétique) de satisfaire au principe de relativité (dont la validité jusqu'alors ne concernait que les corps matériels), Einstein a montré que la notion d'éther était superflue, obligeant à reconnaître que ce dernier n'existe pas et que le champ est donc sans support matériel. La théorie de la relativité restreinte doit donc être regardée comme l'achèvement du concept de champ. Einstein a complété l'œuvre de Faraday et de Maxwell.

Que le champ à la fois n'ait pas besoin de support matériel et représente une certaine énergie et une certaine quantité de mouvement localisées dans l'espace oblige à se poser la question : la matière, qui elle aussi constitue une forme de localisation de l'énergie et de la quantité de mouvement, ne serait-elle pas, elle aussi, un champ, un champ dont la localisation serait poussée à l'extrême ? Se poser cette question revient en somme à renverser la perspective jusqu'alors adoptée : jusqu'à présent on cherchait à réduire le champ à des actions mécaniques portant sur des corps matériels ; on se demande maintenant si ce n'est pas l'inverse qui est vrai, c'est-à-dire si la matière n'est pas elle-même une

forme de champ — autrement dit, puisque la matière a une structure atomique, si les particules ne sont pas des concentrés de champ.

La question se pose d'autant plus que l'une des conséquences de la théorie de la relativité restreinte est l'identification de la masse à l'énergie, via un facteur de conversion universel ; c'est le fameux E (énergie) = m (masse) c^2 , où c est la « vitesse de la lumière » ou dit. Cette équivalence implique qu'un espace vide de matière et ne contenant que du rayonnement, donc du champ électromagnétique, possède une masse inertielle comme n'importe quel corps matériel. Ce qui revient à dire que l'inertie d'un corps ordinaire (sa capacité à résister au changement de mouvement imposé de l'extérieur) dépend de l'énergie qui est emmagasinée dans ce corps. De là à imaginer que la masse de l'électron, par exemple, puisse être d'origine purement (ou partiellement) électromagnétique, il n'y a qu'un pas. Bien des physiciens et non des moindres, Poincaré, Lorentz, Langevin, ont cherché, avant et après 1905, à expliquer l'existence de l'électron et sa masse par une concentration de champ (donc d'énergie dans un tout petit volume). Einstein lui-même, en 1919, ainsi qu'Hermann Weyl à peu près à la même époque, ont repris cette idée compte tenu des résultats de la théorie de la relativité générale (1916), en incluant dans la définition de l'énergie du champ celle du champ de gravitation — sans succès. À vrai dire, Einstein n'a jamais complètement abandonné l'idée d'une théorie du champ où la matière apparaîtrait comme un concentré de champ ; c'est elle qui l'a guidé dans la recherche d'une théorie unitaire, destinée dans son esprit à supplanter la théorie quantique dont on sait qu'elle ne l'a jamais complètement convaincu. Ainsi écrit-il à Schrödinger, le 22 décembre 1950 (quelques années avant sa mort) : « Maintenir que la théorie quantique est (en principe) définitive, c'est croire qu'une description plus complète serait sans objet parce qu'il ne lui correspondrait aucune loi. Dans ce cas, la physique n'aurait d'intérêt que pour les boutiquiers et les ingénieurs [...] La description complète ne peut pas être construite à partir du concept de particule. De notre outillage, il ne reste que le concept de champ ; mais seul le diable sait s'il va résister. Je pense que cela vaut la peine de s'en tenir fermement au concept de champ, c'est-à-dire au continuum [...] »

« Au concept de champ, c'est-à-dire au continuum. » Le concept de champ, en effet, s'oppose (ou du moins s'est longtemps opposé comme on va le voir) au concept de particule en ceci que l'un relève du pur continu et l'autre du pur discontinu. Les particules sont rigoureusement localisées dans l'espace, jusqu'à n'occuper souvent qu'un point géométrique (l'expression « point matériel » souvent employée pour désigner les particules de la physique classique, c'est-à-dire en l'occurrence pré-quantique, marque bien à quel point il s'agit là d'une idéalisation : un point ayant un volume nul ne peut contenir de matière et ne peut donc avoir une masse ni être qualifié de « matériel »). Le caractère

discontinu des particules se marque non seulement à leur stricte localisation, mais également au fait que leur évolution dans le temps est décrite en termes de trajectoires, c'est-à-dire de lignes dont la mesure spatiale est nulle, et, de ce fait, introduisant du discontinu dans l'espace. De plus, les particules peuvent être comptées. Toutes ces caractéristiques sont transformées en leur strict opposé lorsqu'on passe à la notion de champ : le champ est défini en tout point de l'espace (il peut avoir une valeur nulle dans certaines régions, cela n'empêche pas qu'il soit défini sur tout l'espace, y compris à l'infini) ; son évolution au cours du temps se fait sur le modèle d'une vague qui déferle ou d'une oscillation à la surface de l'eau qui se propage de façon continue ; de plus il n'est pas possible de compter les champs car en chaque point les champs se superposent de façon à ne former qu'un seul champ, celui qui règne au point considéré. Cette dernière propriété, dite principe de superposition, résume à elle seule l'opposition radicale entre champs et particules : ces dernières ne se superposent jamais en un même point de l'espace ; comme il n'y a pas de place pour deux particules en un même point de l'espace au même instant, deux particules dont les trajectoires devraient les amener à se trouver au même point au même instant se heurtent, entrent en collision, s'évitent. Les champs eux, parce qu'ils sont définis en chaque point de l'espace, et sont donc continus tout comme l'espace, se superposent algébriquement en chaque point de l'espace ; d'où la possibilité d'interférences c'est-à-dire de situations où la résultante de deux champs est un champ nul alternant avec des situations où les deux champs se renforcent l'un l'autre ; l'observation d'interférences signe pour un expérimentateur la nature ondulatoire (c'est-à-dire continue de type champ) d'un phénomène.

L'opposition entre champ et particule est en réalité, en physique classique (pré-quantique), une antinomie. Cela tient au fait que cette opposition recouvre celle qui existe entre continu et discontinu. Il est impossible de faire du continu à partir du discontinu (tout au plus peut-on obtenir un pseudo-continuum qui n'apparaît continu que parce que l'on ne l'observe pas avec des moyens suffisamment puissants, comme par exemple une étendue de sable, granulaire donc, qui paraît continue « vue de haut »). De même, il est impossible de fabriquer du discontinu avec du continu : là aussi par superposition d'un grand nombre de champs, on peut obtenir une configuration résultante où le champ n'a d'intensité repérable qu'en un tout petit voisinage ; mais ce n'est pas une particule au sens propre du terme, ce n'en est qu'une approximation. Parce que les particules et les champs sont de nature antithétique, les physiciens classiques (pré-quantiques) ont pu à juste droit se donner pour objectif d'expliquer le monde par les effets combinés des champs et des particules, les particules créant des champs, lesquels mettent en mouvement les particules, ce qui a pour effet de modifier le champ émis, et ainsi de suite jusqu'à obtenir une description auto-cohérente du monde. C'est ce dualisme champ-matière qu'Einstein a tenté par ses nombreuses

moutures de théories unitaires du champ de dépasser afin d'obtenir une description unifiée.

La théorie quantique, pour sa part, a adopté un autre point de vue conduisant également à une théorie non dualiste. En théorie quantique, la distinction entre particule et champ cesse d'être valable ; les seuls objets auxquels on a affaire dans le domaine quantique (qui peut être précisément défini) ne sont ni des champs ni des particules, ce sont des objets d'une nature inconnue jusqu'alors. Ce qui est important ici est le fait que la théorie quantique abolit (dans le domaine quantique) les notions de champ et de particule et les remplace par une seule et unique notion. À ces objets on donne souvent le nom de particules par abus de langage plus ou moins bien maîtrisé (il vaudrait mieux les désigner d'un nom spécial, parler de quantons par exemple). Ainsi continue-t-on à parler d'électron comme s'il s'agissait d'un objet localisable, alors qu'en réalité cet objet possède aussi un caractère continu, ondulatoire, en sorte que comme le dit Dirac, un électron peut interférer avec lui-même. On voit en quoi cette manière de procéder diffère de celle que l'objectif qu'il s'était fixé (une théorie unitaire) avait obligé Einstein à adopter : il ne s'agit pas de tout expliquer en termes de champs ; il s'agit de réserver les mots champ et particule au domaine classique, c'est-à-dire en dehors du fameux domaine quantique. Les deux conceptions de la nature sont « unitaires », mais le chemin adopté pour arriver à cette unité d'objet n'est pas le même et les « briques » de l'univers ne sont pas les mêmes.

La physique actuelle a depuis longtemps abandonné l'ambition d'Einstein et la théorie quantique est définitivement établie (même si elle doit subir des modifications dans l'avenir). Ironie de l'histoire, la théorie actuelle porte le nom de « théorie quantique des champs ». Les champs dont il est question n'ont en commun avec les champs de la physique classique que d'être de l'ordre du continu. Conformément aux bases mêmes de la mécanique quantique ces champs sont aussi des particules, ou plutôt ne sont ni de nature corpusculaire ni de nature ondulatoire. Ainsi, pour ne citer que cet exemple, le champ électromagnétique est-il considéré comme une collection de « photons » qui ne sont ni des particules ni des champs au sens classique de ces termes.

On pourrait penser que la dualité champ-matière sur laquelle s'était élevée la physique classique est ainsi dépassée. Il n'en est rien : cette dualité chassée par la porte revient par la fenêtre. En effet, il se trouve que les « particules » quantiques (quantons) peuvent être classées en deux grandes catégories incompatibles : les bosons et les fermions. Sans entrer dans plus de détails, signalons seulement que ce qui dans le domaine classique (en dehors du fameux domaine quantique) apparaît comme un champ (par exemple la lumière) est constitué d'une assemblée de bosons (les photons sont des bosons), alors que les fermions deviennent des particules lorsqu'on passe du domaine quantique au domaine classique.

► BOHR N., *Physique atomique et connaissance humaine* (rééd. Paris, Gallimard « Folio », 1991 (avec introd. et notes de C. Chevalley). — DARRIGOL O., « La genèse du concept de champ quantique », *Annales de physique*, 9, 1981 (EINSTEIN A., *Œuvres traduites en français*, coédition en 5 volumes (voir vol. 1 et 5), Paris, CNRS-Le Seuil, 1989-1991). — EINSTEIN A. & INFELD L., *L'évolution des idées en physique* (paru en all., Princeton, 1933), trad. fr. Paris, Flammarion « Champs », 1983. — HENDRY J., « The Development of Attitudes to the Wave-particle Duality, 1900-1920 », *Annals of Science*, 37, 1980. — WEYL H., *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1949.

→ Constantes physiques ; Élémentarité ; Équivalence (Principe d') ; Éther ; Gravitation ; Matière (PHYSIQUE) ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Quantique ; Formalisation ; Virtuel.

CHAOS ET DÉTERMINISME

« Avant tout, naquit Chaos » c'est-à-dire, l'abîme, écrit Hésiode au VIII^e s. av. J.-C. (*Théogonie*, 116). Aujourd'hui, le chaos, souvent affublé d'un adjectif contradictoire par mathématiciens, biologistes et physiciens. Dorénavant — déterministe — est devenu un ensemble d'outils, un comportement chaotique sera entendu comme et de pratiques mathématiques aux prétentions universelles et révolutionnaires. En proposant des modèles simples, mais totalement déterminés, décrivant des comportements impossibles pourtant à prédire avec précision, il apporte un éclairage nouveau à la notion de déterminisme en philosophie.

Une vieille métaphore

Pour Aristote, le chaos n'est guère que la manière préphilosophique, employée par Hésiode, de désigner l'espace, le lieu préexistant à la création du monde (*Physique*, IV, 1). Il n'acquiert sa signification usuelle que chez les Stoïciens, à la suite desquels Ovide le décrit, au I^{er} s. apr. J.-C., comme « une masse informe et confuse, rien qu'un bloc inerte, un entassement d'éléments mal unis et discordants » (*Métamorphoses*, I, 7). Ce qui donnera ensuite lieu à une lecture rétrospective de la Genèse à laquelle cette idée de chaos était à l'origine étrangère. Une conception s'impose donc : celle d'un Chaos fournissant la matière première nécessaire à la création du Cosmos, l'univers ordonné, seul soumis aux lois de la science. Ainsi, le chaos est-il chassé hors du domaine de cette dernière : « La diversité absolue d'un chaos, écrit Bachelard en 1927, ne pourrait recevoir l'occasion d'aucune action et par conséquent d'aucune pensée » (*Essai sur la connaissance approchée*, p. 277).

Pourtant, cette imagerie puissante fit du terme « chaos » une source de métaphores bien utile, en science comme ailleurs. Ainsi le savant hollandais Jan Baptist van Helmont (1577-1644) s'en servit-il pour forger le mot « gaz », alors qu'au même moment, Guy de la Brosse (1586-1641), fondateur du Jardin Botanique de Paris, considérait que l'air, constitué de plusieurs substances, ne devrait plus être appelé élément,

chaos. À la fin du XIX^e s., le physicien anglais James Jeans (1877-1946) utilisa l'expression « chaos moléculaire » en référence à l'hypothèse de désordre produite par Ludwig Boltzmann (1844-1906). Selon cette hypothèse, nécessaire pour prouver, à partir des lois de la mécanique, l'irréversibilité de l'évolution d'un gaz vers l'équilibre, les mouvements moléculaires devraient pas être corrélés après collision. En 1938, enfin, le mathématicien Norbert Wiener (1894-1964) donna le nom de « théorie du chaos » l'étude des mesures aléatoires stationnaires, conçue comme une généralisation de ses recherches sur le mouvement brownien et que, déjà, il pensait pouvoir appliquer aux problèmes de la turbulence et de la mécanique statistique. S'ensuivit donc une association constante du concept de chaos en physique avec la théorie ergodique qui ne fut pas désavouée, loin s'en faut, avec l'émergence des nouveaux sens que ce terme acquit pendant les années 1970.

Car ce n'est qu'avec la publication, en 1975, d'un article des mathématiciens appliqués James A. Yorke et Tien-Yien Li — article célèbre intitulé « Period Three Implies Chaos » — que le terme sera largement adopté par mathématiciens, biologistes et physiciens. Dorénavant — déterministe — est devenu un ensemble d'outils, un comportement chaotique sera entendu comme et de pratiques mathématiques aux prétentions universelles et révolutionnaires. En proposant des modèles simples, mais totalement déterminés, décrivant des comportements impossibles pourtant à prédire avec précision, il apporte un éclairage nouveau à la notion de déterminisme en philosophie.

Pour célébrer l'ordre trouvé dans ces comportements complexes, on osa l'oxymore « chaos déterministe ». Mais, comme le remarque le philosophe Stephen Kellert, n'était-ce pas le simple fait de baptiser certains comportements de chaotiques qui permet ensuite de prétendre avoir trouvé de l'ordre dans le chaos (*In the Wake of Chaos*, Univ. of Chicago Press, 1993) ?

Il convient donc de dégager les réelles nouveautés pratiques et philosophiques du chaos déterministe : d'abord, une large reconnaissance du fait que des systèmes simples peuvent exhiber une dynamique compliquée ; ensuite une utilisation sans précédent d'outils et de méthodes d'origine topologique en sciences ; finalement, un effort d'intégration des nouvelles opportunités offertes par le développement des outils numériques à des mathématiques abstraites, récentes ou anciennes.

Systèmes simples, dynamiques complexes

Si Li et Yorke s'étaient abstenus de formaliser leur utilisation des termes « chaos » et « chaotique », l'écologiste Robert May se saisit de cette épithète et opposa régimes chaotique et stationnaire. Étudiant l'évolution de la population d'une espèce animale d'une saison à l'autre, May considéra des systèmes où le temps t était traité comme une quantité discrète, du type $x_{t+1} = \lambda x_t (1 - x_t)$, le paramètre λ représentant le taux d'accroissement de la population. Observant le comportement asymptotique de ces suites itérées, c'est-à-dire le régime stable vers lequel le système tend pour de grands t , May s'aperçut qu'il était radicalement

différent selon la valeur du paramètre. Pour des petits λ , le système tend assez rapidement vers une population stable quel que soit son nombre d'origine ; pour des valeurs un peu plus grandes, elle oscille entre différentes quantités, tandis que pour toute une gamme de valeurs de λ encore plus grandes (mais pas toutes), la population ne se stabilise jamais. Elle saute d'une valeur à une autre, produisant une suite de nombres aussi impossibles à prévoir que s'ils étaient tirés à la loterie.

De ce résultat simple, déjà connu de divers mathématiciens, May conclut : « Non seulement en recherche, mais aussi dans le monde quotidien de la politique et de l'économie, il serait bénéfique pour tous si plus de gens réalisaient que les systèmes non linéaires simples ne possèdent pas nécessairement des propriétés dynamiques simples. » En d'autres termes, le message retentit que, pour comprendre certains phénomènes compliqués, nul n'avait nécessairement besoin de faire appel à des perturbations extérieures aléatoires, mais que la complexité pouvait souvent être expliquée à l'aide de modèles mathématiques d'une simplicité enfantine.

Sensibilité aux conditions initiales : les limites du déterminisme

Dès 1975, Li et Yorke remarquaient que cette conclusion s'appliquait tout aussi bien à des systèmes décrits par des équations différentielles non linéaires où le temps était traité comme variable continue. Ils ressuscitèrent un exemple étudié dix ans plus tôt, en 1963, par le météorologue Edward Lorenz. En étudiant sur son ordinateur les solutions non périodiques d'un système de trois équations différentielles, Lorenz fit l'observation fondamentale qu'en général, de tels systèmes étaient instables « vis-à-vis de modifications de faibles amplitudes ». Dès 1971, le physicien David Ruelle, retrouvant de manière indépendante cette propriété des systèmes non linéaires, lui attribua une étiquette qui fit fortune : la sensibilité aux conditions initiales (sci). « Ce résultat a des conséquences de grande portée, remarquait Lorenz. S'il y a quelque erreur que ce soit dans l'observation de l'état présent — et dans n'importe quel système réel, de telles erreurs semblent inévitables — une prédiction acceptable d'un état instantané dans le futur éloigné peut bien être impossible. »

Suite à cela, on prêta une attention nouvelle à certains passages des œuvres de Henri Poincaré. En 1908, ce dernier n'écrivait-il pas dans *Science et méthode* : « Il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux [...]. La prédiction devient impossible. » Ainsi la sci semble avoir été repérée dès la fin du XIX^e s. Cependant, en 1906, Pierre Duhem ne vit dans celle-ci qu'une « déduction mathématique à tout jamais inutile aux physiciens » (*La théorie physique, son objet, sa structure*). Contrairement à ce que l'on a pu prétendre, cette connaissance ne tomba

toutefois pas dans l'oubli entre Poincaré et Lorenz. Il suffira de mentionner les travaux de mécanique céleste de George D. Birkhoff (1884-1944), puis ceux connus sous le nom de « théorie KAM » (A. Kolmogorov, V.I. Arnold & J. Moser). Des études ultérieures sur les systèmes dynamiques révélèrent que le nombre minimal de degrés de liberté nécessaire à l'observation de la sci était de trois, l'exemple le plus simple étant le pendule subissant une force extérieure périodique.

Cette observation réduit donc à néant l'interprétation naïve du déterminisme de Laplace. Dans l'*Essai philosophique sur les probabilités*, ce dernier avait imaginé qu'une « intelligence » ayant une connaissance parfaite de l'état de l'univers à un instant donné serait capable d'en prédire avec exactitude l'évolution future. La croyance en des lois physiques déterministes impliquait une prédictibilité parfaite, ce qui semblait aller à l'encontre du libre-arbitre. Avec la sci, il devient nécessaire de distinguer prédictibilité (la capacité de calculer effectivement les valeurs futures d'une quantité observable) et déterminisme (l'hypothèse selon laquelle les lois de la nature dictent l'évolution de ces quantités uniquement à partir de l'état présent). De cela, on déduit que, même en connaissant assez bien un état initial, le caractère déterministe des équations ne suffit pas à permettre la prévision d'un état ultérieur.

Plus précisément, la sensibilité aux conditions initiales implique que, pour un système chaotique, il existe un « temps caractéristique » T , au bout duquel toute erreur dans la mesure de l'état initial se trouve multipliée par 10. Au bout de $2T$, l'incertitude atteint 100 fois celle de départ, et ainsi de suite. Puisqu'à ce rythme même les instabilités moléculaires peuvent devenir perceptibles si T est petit, l'indéterminisme quantique ne serait pas sans conséquence à notre échelle. On le voit donc, le chaos brouille aussi la distinction entre le microscopique et le macroscopique.

Attracteurs étranges : de nouvelles pratiques de modélisation

Plus que la reconnaissance de ces leçons philosophiques, l'émergence du chaos déterministe alla de pair avec une métamorphose des pratiques de modélisation mathématique, essentiellement due à la rencontre de deux mouvements dont le chaos représente le point d'intersection : d'une part, la disponibilité croissante de moyens de calcul électroniques, et d'autre part, l'adaptation de méthodes issues de la topologie. Ces pratiques s'incarnèrent d'abord dans l'étude de l'évolution vers la turbulence d'un liquide soumis à des contraintes croissantes (gradient de température, par exemple). Il n'est d'ailleurs pas anodin que l'adjectif « chaotique » fut d'abord employé, dès 1969, par René Thom en relation avec la turbulence. Dans leur fameux article de 1971, Floris Takens et David Ruelle, un collègue de Thom à l'Institut des Hautes Études Scientifiques de Bures-sur-Yvette, reprirent le terme. Pourtant, la généalogie, si elle existe, entre cet usage informel et l'article de Li et Yorke n'est pas évidente.

En revanche, il est clair qu'il revient à Ruelle et Takens d'avoir introduit un nouveau langage dans l'étude de phénomènes physiques tels que la turbulence. En effet, ils s'inspirèrent d'ambitieuses et puissantes théories mathématiques : la théorie des catastrophes de Thom et celle des systèmes dynamiques de Stephen Smale. Bien qu'élaborées en parallèle pendant les années 1960 par des topologues, ces deux théories retissaient les fils de plusieurs traditions éparses, remontant à Poincaré et attachées à l'étude qualitative des équations différentielles. En particulier, elles s'appuyèrent sur la notion de « stabilité structurelle » introduite dès les années 1930 par Aleksandr Andronov (1901-1952), qui eut l'idée d'appliquer à des problèmes d'ingénieur étudiés notamment par Balthasar van der Pol (1889-1959) certaines techniques mathématiques imaginées par Poincaré pour la mécanique céleste. Ainsi Andronov définira-t-il les systèmes « grossiers, » aujourd'hui appelés structurellement stables, comme étant ceux pour lesquels une petite perturbation de l'équation n'entraîne pas de changement qualitatif dans les trajectoires admissibles. À cause des incertitudes expérimentales et des fluctuations quantiques, Andronov avait estimé que seul ce genre de systèmes était apte à décrire les problèmes d'ingénieurs. Ce type de stabilité globale n'était pourtant pas incompatible avec l'instabilité désignée par la sensibilité aux conditions initiales, ce dont se rendirent compte Smale, puis Ruelle.

Théories des catastrophes et des systèmes dynamiques offrirent donc à Ruelle et Takens, non seulement de nombreux concepts qu'ils surent adapter avec brio, mais aussi des exemples de nouvelles approches de modélisation mathématique. Il s'agissait de concevoir les outils topologiques et la manière de les utiliser afin de comprendre la nature dynamique de certains phénomènes sans nécessairement passer par l'étude quantitative d'une dynamique sous-jacente complexe dont on ne pouvait prétendre qu'à une connaissance approchée. C'est ce que firent Ruelle et Takens en introduisant la notion « d'attracteur étrange, » intimement liée au chaos dans les systèmes dissipatifs (où l'énergie n'est pas conservée). En effet, dans les systèmes de ce type, la dynamique est telle qu'à partir d'un ensemble de conditions initiales les trajectoires convergent vers un équilibre appelé « attracteur ». Si celui-ci se réduit à un point ou à une courbe simple fermée, on est en présence de comportements stationnaires ou périodiques. Un attracteur étrange possède une structure plus compliquée, appelée « fractale » par Benoît Mandelbrot. Si le système est structurellement stable, il ne s'agit pas d'une rare pathologie : même si le système lui-même est perturbé, il garde sa dépendance sensible des conditions initiales et la dynamique est chaotique.

L'hypothèse fondamentale de Ruelle et Takens fut de considérer que l'équation de Navier-Stokes dictant l'évolution des fluides pouvait, dans les cas de turbulence faible, se réduire à un système structurellement stable à quelques degrés de liberté pour lequel les seuls attracteurs stables étaient étranges. Ceci les conduisit

donc à prédire que les fréquences d'oscillation détectables expérimentalement ne pourraient se multiplier indéfiniment comme on le pensait précédemment, ce qui fut ultérieurement observé, sans que cette observation ne soit aucunement due à un quelconque bruit extérieur. Puis, le système de Lorenz devint l'exemple paradigmatique d'une dynamique associée à un attracteur étrange. L'étude numérique de systèmes de ce genre fut entreprise par des topologues et des physiciens. Pour interpréter ces résultats obtenus numériquement et expérimentalement, les outils topologiques de la théorie des systèmes dynamiques se révélèrent assez adaptés, grâce aux ambitions originales (pour autant déçues) de Thom et Smale. Mentionnons toutefois l'utilisation d'outils de statistique et de mécanique statistique. Bien que devant être adaptées, ces théories abstraites formèrent donc le langage de base dans lequel s'articula la compréhension théorique des comportements chaotiques, permettant ainsi d'incorporer à la science classique les nouveaux acquis dus à l'utilisation massive de l'ordinateur.

► AUBIN D., « From Catastrophe to Chaos : The Modeling Practices of Applied Topologists », in *Changing Images in Mathematics : From the French Revolution to the New Millennium*, dir. A. Dahan Dalmedico and U. Bottazini, Routledge, 2001, p. 255-279. — AUBIN D. & DAHAN DALMEDICO A., « Writing the History of Dynamical Systems and Chaos : Longue Durée and Revolution, Disciplines and Cultures », *Historia Mathematica* 29, (2002), 273-339. — BERGÉ P., POMEAU Y. & VIDAL C., *L'Ordre dans le chaos*, Paris, Hermann, 1984. — BERGÉ P., POMEAU Y. & DUBOIS-GANCE M., *Des rythmes au chaos*, Paris, Odile Jacob, 1994. — DAHAN DALMEDICO A., CHABERT J.-L. & CHEMLA K. dir., *Chaos et déterminisme*, Paris, Le Seuil « Points Sciences », 1992. — EKELAND I., *Le Calcul et l'imprévu*, Paris, Le Seuil, 1984. — GLEICK J., *La Théorie du chaos* (1987), Paris, Albin Michel, 1989. — LORENZ E.N., *The Essence of Chaos*, Seattle, Univ. of Washington Press, 1993. — MANDELBROT B., *Les Objets fractals : forme, hasard et dimension* (1975), Paris, Flammarion « Champs », 4^e éd., 1995. — POMIAN K. dir., *La Querelle du déterminisme*, Paris, Gallimard, 1990. — RUELLE D., *Hasard et Chaos*, Paris, Odile Jacob, 1991. — SMALE S., *The Mathematics of Time*, New York, Springer, 1980. — THOM R., *Stabilité structurelle et morphogénèse* (1972) Paris, InterÉditions, 2^e éd., 1977 ; *Modèles mathématiques de la morphogénèse* (1974), Paris, Christian Bourgois, 2^e éd., 1980. — On retrouvera plusieurs articles originaux dans *Chaos II* (sous la dir. de Hao B.-L.), Singapour, World Scientific, 1990, et *Universality in Chaos* (sous la dir. de P. Citanovic), Bristol, Adam Hilger, 1989.

David AUBIN

→ Déterminisme ; Singularité.

CHIMIE PHYSIQUE

L'expression « chimie physique » apparaît dans des ouvrages dès la deuxième moitié du XVIII^e s. mais, la discipline chimie physique s'est développée vers la fin du XIX^e et se constitue institutionnellement en 1887 avec la création du *Zeitschrift für Physikalische Chemie* par Ostwald et Van't Hoff. Au début du XX^e s., c'est une

discipline « chic et excitante ». En introduction à une série de conférences de « chimie physique moderne » données à l'université de Yale, en 1911, Svante Arrhenius (1859-1927) la définit de la manière suivante : « La chimie travaille avec un nombre énorme de substances, mais s'intéresse seulement à quelques-unes de leurs propriétés ; c'est une science extensive. La physique, au contraire, travaille en général avec quelques substances telles que le mercure, l'eau, le verre, l'air, mais analyse les résultats expérimentaux à fond ; c'est une science intensive. La chimie physique est la fille de ces deux sciences ; elle a hérité son caractère extensif de la chimie. D'où le fait qu'elle englobe tout, ce qui lui a valu tant d'admiration. Mais, d'autre part, elle a un caractère profondément quantitatif qu'elle tire de la physique » (Arrhenius, 1912, p. XIX).

Cette définition souligne le caractère hybride de cette science, entre physique et chimie et le fait qu'elle traite autrement des sujets de chimie. C'est cet « autrement » qui va générer l'indifférence ou l'indignation des scientifiques traditionnels ; c'est cet « autrement » qui va faire que « la chimie physique est la chimie de l'avenir » (Émile du Bois-Reymond, lors de la séance « Leibnitz » du 29 juin 1882) ; c'est cet « autrement » qui explique la passion et l'enthousiasme de jeunes chercheurs qui trouvent là un espace de liberté pour exprimer leur caractère indépendant et leur esprit innovant, voire contestataire. Ils refusent de s'investir dans des travaux de recherche traditionnels qui consistent à accumuler des résultats expérimentaux dont on ne déduit jamais de loi générale pour la réaction chimique.

Dans l'introduction de ses *Études de dynamique chimique*, Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911) pense qu'il est grand temps pour la chimie de passer à la seconde phase, qui advient dans l'évolution de toute science, celle de la « découverte des relations de causalité » (p. 1). Scion lui, la première phase de la recherche, « d'ordre descriptif ou systématique », a porté ses fruits et si elle a permis « l'étude des relations entre les propriétés des corps différents ou entre leur composition chimique, cela a été uniquement pour les besoins de la classification ». En 1869, Dimitri Ivanovitch Mendéléïev (1834-1907) semble conclure cette période d'observation et d'accumulation de résultats en inaugurant ce qui va devenir, dans un premier temps, l'objectif des chimistes : énoncer des lois générales par la mise en relation de propriétés de la matière. De sa loi périodique émerge le concept d'élément. Les éléments « sont caractérisés non seulement par leur existence indépendante, par leur incapacité à se transformer les uns en les autres, etc., mais aussi par le poids de leur atome ». Van't Hoff note que « comme le poids a conduit à l'idée d'atome, de même une autre propriété physique, celle du volume et de la densité a conduit à notre idée des molécules » (1905, « The relation of Physical Chemistry to Physics and Chemistry », *Journal of Physical Chemistry*, 9, p. 81-89). Ces molécules deviennent en fait le sujet de la chimie physique.

Elles ne sont ni ce qu'elles étaient pour les chimistes traditionnels ni celles des physiciens. Pour les

premiers, la molécule est soit l'expression du résultat d'un bilan de proportions massiques, soit une formule dont il faut réaliser la synthèse. Pour les seconds, c'est une particule à laquelle on associe une masse, qui se déplace à une certaine vitesse sur un parcours moyen avant d'en percuter une autre. L'ensemble de ces chocs représente la pression du gaz, l'énergie cinétique de ces particules est liée à la température du gaz et l'on sait calculer combien il y a de particules dans un volume donné, sous une pression donnée, sans jamais se préoccuper de la nature de ces particules. En revanche, ce qui intéresse les chimistes que l'on appellera physico-chimistes, c'est la nature individuelle de ces molécules et leurs actions réciproques qui caractérisent une substance et son comportement dans un « système ». Sa transformation n'est plus pensée en termes de bilan de masses avant et après mais en termes de comportement des molécules pendant.

Surgissent alors une foule de questions : pourquoi deux substances de constitution analogue cristallisent-elles de façon isomorphe (Mitscherlich) ? Pourquoi la formule plane du carbone, avec sa valence quatre, n'explique-t-elle pas l'isométrie optique de certains composés organiques (Le Bel et Van't Hoff) ? Pourquoi lorsqu'on met une molécule de sucre (saccharose) dans de l'eau mesure-t-on un abaissement du point de congélation du dissolvant correspondant à une molécule alors que si l'on dissout une molécule de sel (chlorure de sodium) on mesure la même propriété correspondant à 1,7 molécule (Raoult) ? Pourquoi certaines réactions s'arrêtent-elles quand il reste encore des réactifs alors que d'autres se poursuivent jusqu'à l'épuisement des réactifs (Berthelot et Pean de Saint Gilles) ? Pourquoi plus on dilue un acide faible plus sa solution devient conductrice (Ostwald) ? Pourquoi certaines solutions sont-elles conductrices, indépendamment du passage du courant, tandis que d'autres ne le sont pas (Arrhenius) ? Pourquoi un système chimique auquel on impose le changement d'une variable (température, pression, volume ou quantité de matière) réagit-il de manière à ce que cette grandeur ne varie pas (Le Châtelier) ? Quelle relation existe-t-il entre la force électromotrice d'une pile et la réaction chimique qui s'y produit (Nernst) ? Les sujets de recherche ne sont pas forcément nouveaux mais la façon de les aborder est innovante.

Au niveau expérimental, elle implique l'utilisation d'appareils de mesure utilisés jusque-là par les physiciens et l'obtention de résultats quantitatifs précis. Au niveau théorique, elle implique l'utilisation d'outils empruntés aux mathématiques (dérivées partielles, équations différentielles) et à la physique (lois de la thermodynamique, loi d'Ohm). Cette façon de penser la chimie s'inspire en partie de la philosophie d'Auguste Comte, dont certains nouveaux chimistes (Van't Hoff notamment) sont adeptes. Pour exprimer des lois pour une chimie générale il faut forger de nouveaux concepts propres à cette science. Faire de la chimie une science positive ne signifie pas lui appliquer les concepts de masse et de force empruntés à la

mécanique. Si la conception mécaniste de l'atome est rejetée, il ne s'agit pas non plus d'appliquer la théorie énergétique sans discernement mais de lui emprunter les grandeurs applicables aux transformations chimiques. Ainsi, grâce à leur maîtrise des mathématiques, les jeunes chimistes étudient les publications du physico-mathématicien américain Josef Willard Gibbs (« On the Equilibrium of Heterogeneous Substances », *Transaction of the Connecticut Academy of science*, 1876-1878), que leurs aînés qualifient d'obscur travaux mathématiques. Apercevant la puissance de la notion de potentiel appliquée à la réaction chimique, ils l'intègrent à leurs résultats. Ceci leur permettra « d'atteindre le Graal », le sens profond de l'affinité chimique et son expression mathématique.

La considération du choix des sujets d'étude des scientifiques et du choix des méthodes avec lesquelles ils les réalisent est un élément d'identité de l'histoire d'une discipline scientifique. « Dans la construction d'une discipline, comme dans sa délimitation, ceux qui la pratiquent se réfèrent à un ensemble de problèmes communs qu'ils cherchent à résoudre par un ensemble de méthodes appropriées, éventuellement flexibles et pragmatiques, dont ils pensent qu'elles donneront des solutions bien adéquates ou exactes » (Nye, 1993, p. 20).

On peut suivre l'émergence spatiale et temporelle graduelle de la chimie physique en faisant le « tour » de quelques universités et des publications qui en sont issues du début des années 1870 à la fin des années 1920.

À l'origine, une synergie en Europe

De 1870 à 1887 divers scientifiques de par l'Europe, qui ne se connaissent pas avant 1884, font de la chimie physique comme M. Jourdain faisait de la prose. Ils n'ont pas négligé l'approche historique de l'apprentissage de la chimie et ils maîtrisent plusieurs langues, ce qui leur donne accès à toutes les publications. Ils ont une formation en mathématique et des techniques expérimentales de physiciens qui leur permettent de comprendre les résultats de ces derniers. Ils seront tous prix Nobel mais dans les années 1870 ils n'ont rien à perdre et vont s'attaquer à des sujets considérés alors comme marginaux. Le Suédois Svante Arrhenius est scandalisé d'entendre son professeur Per Theodor Cleve déclarer qu'il est impossible de connaître le poids moléculaire du sucre de canne car celui-ci n'est pas volatil. En 1882, il commence sa thèse avec l'idée d'utiliser des méthodes électriques pour résoudre le problème du poids moléculaire de ces substances. Un an et demi après il présente un mémoire, rédigé en français, à l'Académie des sciences de Suède. Il est composé de deux parties intitulées « Détermination de la conductivité des solutions infiniment diluées au moyen du dépolarisateur » et « Théorie chimique des électrolytes ». La conclusion qui sera la plus contestée est : « La solution aqueuse de n'importe quel hydrate (c'est-à-dire acide ou base) est composée, par addition

d'eau, de deux parties, une active (électrolytique), l'autre inactive (non électrolytique). Ces trois substances (eau, hydrate actif et hydrate inactif) sont en équilibre chimique, de telle façon que la partie active croît et la partie inactive diminue. »

L'originalité du sujet, qui est considéré comme relevant de la physique par les chimistes et comme de la chimie par les physiciens, laisse les membres du jury perplexes. Selon l'opinion du chimiste Otto Pettersson « il était préférable de considérer le mémoire comme une preuve de compétences en physique, et il n'y avait pas de doute sur le souhait d'Arrhenius de devenir *docent* dans cette discipline. [...] Mais Thalén (physicien) pouvait refuser la seconde partie théorique comme preuve de compétences dans son sujet car c'était de la chimie et non de la physique » (Crawford, 1996, p. 41). En conséquence, ils n'accordent pas à Arrhenius la mention qui lui permettrait d'obtenir un poste à l'Université. En revanche, on lui donne une bourse pour étudier où il veut sur le continent, une façon élégante d'éloigner cet empêcheur de tourner en rond. À partir de 1883, traiter un scientifique de « physicien d'Uppsala » sera la pire injure dans la bouche d'Arrhenius, homme affable, bon vivant, ayant des amis partout.

Cependant Arrhenius n'a pas résolu la question de la détermination des poids moléculaires que l'on ne peut pas obtenir par des mesures de densité gazeuse. Le Français François Marie Raoult (1830-1901) va le faire méticuleusement, après une thèse sur les piles soutenue à Paris en 1863. Professeur de chimie à Grenoble, il appartient à la génération de Mendéléïev qui précède celle de Van't Hoff et d'Arrhenius. Alors que d'autres de leur génération font systématiquement la synthèse de multiples colorants ou des mesures de longueur d'ondes, Raoult détermine des poids moléculaires. Il met au point deux types de mesures fondées sur les propriétés colligatives de la matière, l'une liée à l'abaissement du point de congélation des dissolutions qu'il appelle « cryoscopie », l'autre à leur tension de vapeur qu'il appelle « tonométrie ». Il arrive ainsi à l'expression d'une loi empirique : « Une molécule d'un composé quelconque, en se dissolvant dans 100^{mol} d'un liquide quelconque, de nature différente, abaisse le point de congélation de ce liquide d'une quantité à peu près constante, et voisine de 0,62 » (1882, « Loi générale de congélation des dissolvants », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 95, p. 1030-1033). Mais très attentif à ses résultats, il note en 1885 : « Pour les solutions salines, contrairement à ce que j'avais cru jusqu'ici, la loi générale de congélation ne s'applique pas aux sels dissous dans l'eau [...] ; par contre, les faits tendent à montrer qu'elle s'applique aux radicaux constitutifs des sels, à peu près comme si ces radicaux étaient simplement mélangés dans les dissolutions. » Raoult met ici en évidence une propriété additive des particules en solution qu'il appelle radicaux comme on l'a fait jusqu'ici. En fin expérimentateur, il observe qu'il ne peut exprimer la loi, désormais associée à son nom, qu'à condition

d'exprimer les quantités de corps dissous et de dissolvant en nombre de molécules. Il est important de connaître le rapport entre le nombre de molécules de corps dissous et le nombre de molécules contenu dans la dissolution. La grandeur qu'il mesure est l'abaissement moléculaire c'est-à-dire pour une concentration du corps dissous égale au poids moléculaire exprimé en gramme dans un litre de dissolution.

Le physiologiste Wilhelm Pfeffer publie des résultats expérimentaux liés à un autre phénomène dû aux propriétés colligatives des dissolutions, la pression osmotique. Ne comprenant pas l'origine de ce phénomène, il en parle à Van't Hoff. Ce dernier, après des études à l'université de Bonn, sous la direction du chimiste organicien Friedrich August Kekulé, a passé une année à Paris dans le laboratoire d'Adolphe Wurtz. En 1874, il a 22 ans et publie *La chimie dans l'espace*, un mémoire où il propose une représentation spatiale de l'atome de carbone tétravalent. Ce travail, qui lui vaudra de partager le prix Nobel avec Joseph Achille Le Bel en 1901, est ignoré des chimistes organiciens qui dominent la chimie de l'époque et même tourné en dérision par Hermann Kolbe. Aussi la même année, celui qui intitulera son discours inaugural « Le rôle de l'imagination en science », présente-t-il une thèse sur un sujet classique. On lui accorde une très bonne mention et il obtient un poste d'assistant à l'école vétérinaire d'Utrecht l'année suivante. En 1885, Van't Hoff présente un mémoire sur les « Lois de l'équilibre chimique dans l'état dilué, gazeux ou dissous » (*Kongliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar*, Bandet 21, n° 17). La partie intitulée « Une propriété de la matière diluée » commence ainsi : « En étudiant les propriétés de la matière diluée, en vue de connaître les lois dominant l'équilibre chimique, j'ai été frappé de l'identité presque absolue qu'offrent, dans leurs propriétés physiques, les solutions et les gaz à l'état de dilution suffisante » (p. 42). A condition de considérer les gaz et les solutions dans un état de dilution assez grand, que Van't Hoff appelle « état idéal », « la pression osmotique se trouve assujettie aux deux lois fondamentales qui dominent la pression dans l'état gazeux » (lois de Boyle et de Gay-Lussac). Van't Hoff en infère « la loi d'Avogadro pour les solutions : La pression exercée par les gaz à une température déterminée, si un nombre de molécules en occupe un volume donné, est égale à la pression osmotique qu'exerce dans les mêmes conditions la grande majorité des corps dissous dans des liquides quelconques » (p. 43). L'analogie est parfaite si le nombre de molécules contenues dans la solution, c'est-à-dire si l'on exprime la concentration non pas en grammes par litre mais en quantité moléculaire, « le poids moléculaire exprimé en kilogramme dans le mètre cube ». Cette nouvelle unité utilisée par les physico-chimistes, la molécule-gramme, sera par la suite notée « mole ».

Van't Hoff travaille dans le sillage de Friedrich Horstmann le premier qui a appliqué les lois de la thermodynamique aux phénomènes chimiques et qui a

montré la nécessité de substituer à la masse une quantité moléculaire pour obtenir une standardisation de la constante des gaz (R). En appliquant ces lois aux « solutions idéales », Van't Hoff démontre la loi de Raoult et la relation $PV = iRT$ dans laquelle P est la pression osmotique, V le volume de la dissolution qui referme une molécule-kilogramme de substance dissoute, T la température absolue et i un certain coefficient pouvant varier avec la nature du dissolvant et du corps dissous. Il montre aussi que le coefficient isotonique i est lié à la solubilité des corps gazeux, à la tension de vapeur, à la pression osmotique et au point de congélation des dissolutions. Le calcul théorique donne des résultats en parfait accord avec les résultats expérimentaux, qu'il s'agisse de corps dissous « normaux » ($i = 1$) ou « anormaux » pour lesquels i est voisin de 2 ou 3.

Entre-temps, Arrhenius a envoyé son mémoire de thèse à Rudolf Clausius, Julius Lothar Meyer, Wilhelm Ostwald (1853-1932) et Van't Hoff qu'il estime ouverts aux idées nouvelles. Il y est fait référence aux théories antérieures d'Alexander Williamson et de Clausius sur la conductivité des électrolytes. Selon Williamson (1857) dans une solution il y a un perpétuel échange de radicaux entre les molécules ce qui explique que lorsqu'on mélange deux sels, il est possible d'en obtenir rapidement quatre, ce qui avait déjà été noté par Joseph-Louis Gay-Lussac (1839). Ces radicaux ne sont pas libres au sein de la solution, ils forment des chaînes qui assurent la conduction, c'est la thèse des chimistes. Clausius est physico-mathématicien, il pense que s'il n'y a pas en solution au moins quelques radicaux « libres », on ne peut pas expliquer que les électrolytes obéissent à la loi d'Ohm. Pour lui, sous la violence des chocs moléculaires, quelques molécules se décomposent et assurent le passage du courant, ce qui est conforme avec l'accroissement de la conductivité avec la température. Au début des années 1830, Michael Faraday a appelé électrolytes, les solutions qui conduisent le courant, elles contiennent des particules en mouvement, les ions. Faraday ne se préoccupe pas de ce qui se passe dans le voltamètre, il ne connaît ni la nature des ions, ni l'origine de leur formation à partir des substances mises en solution. Dans sa thèse, Arrhenius ne va pas beaucoup plus loin puisqu'il ne précise pas la nature de ses molécules actives et inactives. En revanche, en 1887, dès qu'il a connaissance des travaux de Van't Hoff et de Raoult, son attention est attirée par les solutions qui, selon eux, ont un comportement anormal. Ce sont des solutions d'électrolytes et conduisant bien le courant. Il ose alors l'hypothèse hardie de l'existence d'ions libres en solution, transportant de grandes charges électriques de signe opposé. À cette époque on ne connaît que la dissociation qui se produit à haute température. Comment la seule action de l'eau peut-elle dissocier un corps stable, comme le chlorure d'hydrogène, dont la dissociation à l'état gazeux requiert une énergie considérable ? Arrhenius écrira en 1912 qu'à l'époque où il

a présenté sa thèse « cette idée semblait absolument impossible ; elle ne pouvait pas être acceptée » (*Journal of the American Chemical Society*, 34, p. 353). Le terme i, calculé par Van't Hoff et mesuré par Raoult, est le nombre d'ions formés lors de la dissociation, c'est-à-dire spontanément au contact du dissolvant. Le résultat fut publié sous le titre de *La théorie chimique des électrolytes* mais pour Oliver Lodge c'est « en réalité une tentative d'une théorie électrolytique de la chimie » (1928, « Arrhenius Memorial lecture », *Journal of the Chemical Society*, 182, 1390). C'est surtout le résultat de la mise en synergie des performances expérimentales de Raoult, de l'aptitude de Van't Hoff « à isoler les sujets de chimie pure des associations traditionnelles qui les obscurcissaient » et de la vivacité d'esprit d'Arrhenius. Lui qui s'est toujours considéré comme un physicien a tenu ici le rôle du chimiste parce qu'il décèle le phénomène où la nature des espèces chimiques en solution intervient, ce qui n'est pas le cas pour les propriétés colligatives où seul le nombre des particules intervient.

L'énoncé de la loi de dilution, qui portera le nom d'Ostwald, a émergé de l'espace commun de recherche qui s'est constitué entre Arrhenius, Van't Hoff, Raoult et Ostwald. Ce dernier étudiait les solutions d'acides faibles quand il reçut le mémoire de la thèse d'Arrhenius. Il saisit aussitôt l'avantage qu'il en peut tirer. Si la mesure de la conductivité est une mesure de l'activité chimique, comme le montre Arrhenius, de deux acides celui qui est le meilleur conducteur est aussi le plus fort. Dans le même temps, Van't Hoff s'appuyant sur les travaux de L. Pfundler sur l'équilibre chimique, propose de remplacer dans l'écriture de l'équation d'une réaction le signe « = » par une double flèche. Ce changement formel signifie que l'équilibre chimique ne résulte pas de l'addition de deux forces qui s'annuleraient mais de l'addition de deux vitesses d'égale intensité et de sens contraire. L'idée est de donner une expression générale de la constante d'équilibre, qui exprime l'affinité chimique, déduite des lois de la thermodynamique. Il faut pour cela remplacer la notion de masse active, introduite en 1867 par Peter Waage et Cato Maximilien Guldberg avec ce qu'on appelle « la loi d'action de masse », par celle de quantité moléculaire. Pour Van't Hoff, l'étude de l'équilibre chimique ne se conçoit pas en terme de statique, comme le faisaient Guldberg et Waage, mais en terme de dynamique. Ces *Études*, considérées comme le premier ouvrage de cinétique chimique, sont surtout les premières qui montrent comment on infère des lois chimiques à partir d'études expérimentales exclusivement quantitatives. Le livre est publié en français car Van't Hoff pense qu'il intéressera plus des scientifiques tel que Wurtz, dont il a apprécié l'esprit de l'école à Paris, que les mentors allemands de la chimie des colorants. En effet, alors qu'un résumé de son opuscule « La chimie dans l'espace » a été publié sous ce titre dans le *Bulletin de la Société chimique*, il n'avait aucune chance, d'après Ostwald, de l'être dans

les *Annales der Chemie und Pharmazie* de von Julius Liebig. Alors « qu'autrefois on pouvait y lire, de temps à autre, une étude de physique, notamment sur des sujets confinants à la fois à la chimie et à la physique, ces annales étaient devenues si « purement chimiques » qu'elles refusaient les études de physique » (Ostwald, 1912, p. 199-200). C'est ainsi qu'Ostwald justifie la création, en 1887, du *Zeitschrift für Physikalische Chemie Stöchiometrie und Verwandtschaftslehre*. Fondé par Ostwald et Van't Hoff, il affiche un comité de rédaction représentant l'ensemble des places d'Europe où la chimie physique se développe. Plus que ses résultats scientifiques, le charisme d'Ostwald fait de lui « le grand protagoniste » de la chimie physique mais cela va aussi briser l'europhéisme des origines. De 1887 à la fin du siècle, la chimie physique s'affirme comme telle mais elle devient une science allemande, qui s'exprime en allemand et s'étudie en Allemagne.

L'essor allemand, une source de controverse

En 1887, Ostwald est nommé professeur à Leipzig, sur la première chaire de chimie physique au monde. Arrhenius, qui l'avait rejoint à Riga, le suit à Leipzig et lui conseille de prendre comme assistant Walther Nernst (1864-1941). Le nombre des étudiants croît exponentiellement et les locaux deviennent insuffisants. Attirés par la renommée du maître et par l'étendue des champs de recherche qu'offre la chimie des solutions, les étudiants affluent. Les premiers Américains sont Morris Leob et Arthur Amos Noyes beaucoup d'autres suivront dans le vieux « Landwirtschaftliches Institut » de la Brüderstrasse jusqu'à ce qu'en 1898 un nouvel Institut de chimie physique soit mis en service au 2 Linné Strasse. « Dès janvier 1898, tout allait sur des roulettes dans le nouveau laboratoire et les étudiants anglophones arrivèrent en masse si rapidement qu'on raconte que les maîtres assistants oublièrent leur allemand avant même d'avoir appris l'anglais » (W.D. Bancroft, « Wilhelm Ostwald, The great protagonist » 1933, *Journal of Chemical Education*, 10, p. 539-542, 609-613). Nernst fait une brillante carrière et obtient son propre institut de recherche à Göttingen en 1896. Van't Hoff accepte un statut privilégié au *Kaiser Gesellschaft* à Berlin la même année. Après avoir obtenu, assez facilement, leur titre de docteur en Allemagne les Américains retournent dans leur pays. D'où une spectaculaire école de « ionistes » outre-Atlantique. « Comme il n'y avait pas d'opposition initiale au contenu ou à la respectabilité de la nouvelle chimie physique, et parce que beaucoup d'universités américaines cherchaient à représenter l'ensemble de la chimie moderne, une niche académique se trouvait disponible en chimie, pour les physico-chimistes, dans l'essor de la science américaine » (Dolby, 1976, p. 299).

En Europe les physico-chimistes, nommés « ionistes » par Friedrich Horstmann, suscitent de vives réactions de la part de ceux qui ont des réponses

différentes aux questions posées. La personnalité d'Ostwald n'est pas étrangère à cette opposition. À sa politique éditoriale du *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, Pierre Duhem fait le reproche de publier exclusivement en allemand et Lothar Meyer regrette le choix partisan des articles. À ses manuels on reproche de ne présenter aux étudiants qu'un aspect de la chimie, de ne faire aucune place aux théories différentes des siennes et aux critiques qui leur sont adressées. Certains chimistes perçoivent cela comme une véritable dictature et l'Anglais Henry E. Armstrong prend la tête de l'opposition. La controverse se noue au sujet de la théorie des solutions. Elle oppose les « ionistes », le camp germanophone, et les « hydratationnistes », essentiellement les Anglais et Mendéléïev. Pour les premiers, lors de la dissolution d'une substance se produit une dissociation spontanée en ions ; pour les seconds, il y a agrégation avec les molécules d'eau et formation d'hydrates. En 1889, dans son article « Electrolytic Dissociation versus Hydratation » (*Philosophical Magazine*, 28, p. 30-38), Arrhenius attaque ses adversaires sur leur manière d'utiliser une représentation graphique censée prouver l'existence des hydrates. À l'Anglais S.U. Pickering, il reproche de réaliser de façon abusive et sans fondement des dérivations mathématiques. Il s'étonne du choix des unités du « distingué professeur russe Mendeleïeff », car « toutes nos expériences modernes tendent à montrer que l'on obtient des meilleurs résultats quand, au lieu de la composition en pourcentage, on prend le nombre de molécules-grammes par litre en abscisse ; et par conséquent le dernier mode de représentation est le plus scientifique ». Mendéléïev connaît la molécule-gramme, Arrhenius, qui reprochait à Cleve de ne pas parler des travaux de Mendéléïev dans son enseignement, le sait bien, alors qu'Armstrong, lui, demande : « Qu'est-ce que la molécule-gramme ? » Mais les méthodes expérimentales de Mendéléïev appartiennent à un autre style de recherches. Il a trouvé sa loi périodique en remarquant une répétition des propriétés des corps simples, et non en faisant des expériences pour la trouver.

Ions ou hydrates ? Pour tenter de trancher le débat, le Comité de l'électrolyse de la British Association for Advancement of Science (BAAS) organise, en 1890, à Leeds une rencontre européenne sur « The theory of solution and its connection with osmotic pressure ». Au niveau théorique, la thèse des ionistes n'est pas beaucoup plus argumentée que celle des hydratationnistes : on ne sait ni ce que sont réellement les ions ni comment ils se forment. Quant à la confrontation des résultats expérimentaux, elle est impossible parce que les hydratationnistes en sont encore à accumuler des résultats peu précis sur un grand nombre de faits alors que les ionistes conçoivent des expériences bien choisies pour vérifier leur théorie. Ostwald a toujours une expérience à proposer et, bricoleur chevronné, les moyens de la réaliser. Arrhenius, amoureux des chiffres, n'a pas son pareil pour tirer une conclusion de l'examen

d'un tableau de valeurs numériques. Van't Hoff, réfléchi et prudent, veille à l'exactitude et à la précision des mesures. Il est intriguant sur l'utilisation des unités standardisées. Les ionistes ont dépassé le stade de la découverte des faits et en sont au stade de la preuve expérimentale. Leurs opposants ne comprennent pas ce que veut dire « nous avons la preuve expérimentale de la dissociation » ou « vos expériences ne prouvent rien ». Quand les premiers disent « la loi d'action de masse s'applique aux solutions idéales d'acides faibles » les autres répondent « cela ne marche pas avec des solutions concentrées d'acides forts » ! La mésestimation est parachevée par le fait que les scientifiques des deux camps n'utilisent pas les mêmes unités. À Leeds comme à Karlsruhe, 30 ans plus tôt, aucune thèse ne triomphe et les protagonistes de chaque camp repartent convaincus d'avoir bien défendu leur cause. Mais de même qu'après 1860 les idées sur la théorie atomique n'ont plus été considérées de la même manière qu'avant, après 1890 les idées sur la théorie des solutions ont été perçues de part et d'autre plus sérieusement. Ostwald qui parle encore « d'hypothèse atomique » peut se résigner à entendre ses adversaires parler d'hypothèse de la dissociation électrolytique car sa réussite est ailleurs. Pour lui « la théorie des ions libres a bouleversé certaines habitudes de pensée ; on ne peut lui comparer à cet égard que la théorie de l'oxygène. Lorsqu'on abandonna la théorie du phlogistique pour celle de l'oxygène, on dut cesser de regarder les métaux comme des corps composés et les oxydes comme des corps simples, pour adopter des idées opposées ; de même, lorsqu'eut prévalu la théorie des ions libres, on dut considérer les composés qui passaient pour les mieux cimentés comme n'ayant aucune cohésion, et les composés dits fragiles, par exemple ceux de la chimie organique, comme étant les plus cohérents ». Au niveau de l'étude expérimentale, Lavoisier a « systématisé l'usage de la balance », Arrhenius celui du pont de Wheatstone. Les « ionistes » ont introduit le concept de mesure physique en chimie et par leurs voyages et échanges inauguré la mise en réseau des compétences. Sur ces bases, une deuxième génération de chercheurs va poursuivre le travail des pionniers.

Une discipline reconnue en Amérique

Conçue presque clandestinement dans des universités qui, à l'époque, n'étaient pas renommées pour l'étude de la chimie (Riga avec Ostwald, Uppsala avec Arrhenius, Leyde avec Van't Hoff et Grenoble avec Raoult), la chimie physique devient une discipline reconnue, et se développe en même temps que les grandes universités américaines dont la renommée sera grandie par les chercheurs dans ce domaine. Au début du XX^e s., l'Amérique découvre la chimie physique, qui s'écrit maintenant en anglais. « Le champ entier de la chimie physique est si fructueux lorsqu'on le traite par des méthodes modernes que l'on peut difficilement y

trouver une partie particulièrement improductive. N'importe quel sujet peut être l'objet d'une recherche ; une question plus importante est l'esprit dans lequel la recherche est entreprise » écrit l'un d'entre eux, Theodore W. Richard (1898, *Science*, 8, p. 726). À Cornell University, Bancroft, grand admirateur d'Ostwald, n'a pas compris cela. Il focalise ses recherches sur la règle de phases, s'éloigne de la chimie pure, manque de rigueur mathématique, et s'en tient à une chimie physique qualitative. Il ne transmettra à la postérité que sa proposition d'appeler « soluté » le corps mis en solution. En revanche, Noyes au Massachusetts Institut of Technology (MIT) travaille dans l'esprit des ionistes et forme rapidement une école de recherche. Ils montrent que lorsqu'on met une substance en solution il se produit une dissociation puis une solvation ; ils résolvent le problème des électrolytes forts ; ils établissent des tables d'énergie libre ; ils mesurent les constantes fondamentales. Gilbert N. Lewis définit la liaison chimique comme une mise en commun de deux électrons ; il établit le concept de liaison covalente qui permet d'atteindre la structure des molécules. « Noyes, Lewis et leurs collègues ont découvert que, pour comprendre les solutions, il est nécessaire de comprendre les solides, et que pour comprendre les lois qui gouvernent les processus chimiques, il est nécessaire d'étudier les structures chimiques » (Servos, p. 137). Leurs recherches sont dans la continuité de celles de Van't Hoff qui, exposant la genèse de son premier livre (1877, *Antichchen über die organische chemie*, brauschweig : Vieweg), déclarait : « À l'époque, j'étais jeune et je désirais connaître les relations entre la constitution et les propriétés chimiques. »

À « la cour du roi Arthur » (Noyes) le prince, Linus Pauling, est un génie. D'une part, il explique par la théorie de l'hybridation des orbitales moléculaires ce que Le Bel et Van't Hoff avaient imaginé un demi-siècle plus tôt, la structure tétraédrique de l'atome de carbone, et calcule le rayon des ions dont Arrhenius avait eu l'intuition dans sa thèse. D'autre part, il transforme une grande quantité de données expérimentales en un répertoire d'énergies de liaisons covalentes. À l'instar des travaux de Mendéléïev qui réalisent la transition entre la chimie descriptive et la chimie générale, ceux de Pauling articulent deux espaces de recherche : d'un côté, la recherche de relations entre les grandeurs mesurables au laboratoire et les grandeurs abstraites de la thermodynamique ; de l'autre, l'application de la mécanique quantique ou ondulatoire aux problèmes de la chimie. Dans les années 1926-1927, ce sont les Européens qui traversent l'océan Atlantique et le continent américain pour étudier au Caltech à Pasadena. Niels Bohr arrive de Copenhague, Arnold Sommerfeld de Munich, Erwin Schrödinger de Zurich et Max Born de Göttingen. Ils ne réalisent pas de mesures physiques, ils résolvent des équations : le règne des chimistes théoriciens a commencé.

- **ABERDAM H.**, *Chimie Physique*, Paris, Dunod, 1957.
 - **ARRHENIUS S.**, *Theories of solutions*, New Haven, Yale Univ. Press, 1912. - **BARKAN D.**, *Walther Nernst and the transition to modern physical chemistry*, Harvard Univ., 1990 (Ph. D.).
 - **CRAWFORD É.**, *Arrhenius, From Ionic Theory to the Greenhouse Effect*, USA, Science History Publications, 1996.
 - **DOLBY R.G.A.**, « The Transmission of Two New Scientific Disciplines From Europe to North America in the Late Nineteenth Century » (1976a), *Annals of Science*, 34, 1977, 287-310 ; « Debates over the Theory of Solution : A Study of Dissent in Physical Chemistry in the English-Speaking World in the Late Nineteenth and Early Twentieth Centuries » (1976b), *H.S.P.S.*, 1976, vol. 7, 297-404. - **MOORE W.J.**, *Physical Chemistry*, New York, Prentice Hall, Inc., 2^e éd., 1955.
 - **NYE M.J.**, *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry*, Berkeley, Univ. of California Press, 1993 ; *Before Big Science*, New York, Twayne Publ., 1996. - **OSTWALD W.**, *Évolution de l'électrochimie*, trad. E. Philippi, Paris, L. Félix Alcan, 1912. - **ROOT-BERNSTEIN R.S.**, *The Ionists : Founding Physical Chemistry*, 1872-1890, Princeton Univ., 1980 (Ph. D.).
 - **SERVOS J.W.**, *Physical Chemistry from Ostwald to Pauling*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1990. - **VAN'T HOFF H.J.**, *Études de dynamique chimique*, Amsterdam, Frederik Muller, 1884 ; « Leçons de Chimie Physique », trad. M. Corvisy, Paris, Lib. Sc. Hermann, 1898-1900 ; *Physical Chemistry in the Service of the Sciences*, trad. A. Smith, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1903.

Christiane BUES

→ Arrhenius ; Electrochimie ; Mole.

CHURCH Alonzo, 1903-1995

Mathématicien et logicien américain. A. Church est né à Washington (DC) et mort à Hudson. L'influence de ses travaux est à la mesure de l'étendue de sa production scientifique, s'échelonnant sur 72 ans d'activité. Ses travaux portent sur la logique mathématique, ainsi que les ramifications de cette branche en mathématiques, informatique et philosophie. Il réalisa ses études à Princeton où il obtint son doctorat en 1927 avec une thèse sur *Les alternatives à l'hypothèse de Zermelo*. Après son doctorat, il continua ses recherches à Harvard, Göttingen et Amsterdam, avant de revenir à Princeton en 1929 où il réalisa l'essentiel de sa carrière en recherche et enseignement. En 1936 paraissent deux articles fondateurs : la thèse désormais connue comme « Thèse de Church », identifiant la notion intuitive de calculabilité à la théorie des fonctions lambda-définissables, et le théorème montrant l'indécidabilité dans le calcul de prédicats, résultat connu comme « Théorème de Church-Turing ». Ce dernier article parut dans le premier numéro de *The Journal of symbolic logic*, duquel il demeura le rédacteur en chef jusqu'en 1979. D'autres aspects de ses travaux concernent le lambda-calcul et, vers la fin de sa carrière la logique intensionnelle.

La longue liste de ses distingués étudiants, parmi lesquels S.C. Kleene, J.B. Rosser, A.M. Turing, D. Scott, et R. Smullyan, témoigne du rôle séminal de ses recherches dans la logique moderne. Forcé de se retirer par son âge en 1967 de Princeton, il continua à

enseigner jusqu'en 1990, à l'université de Californie à Los Angeles (UCLA).

- *Introduction to mathematical logic*, Princeton, Univ. Press, vol. 1, 1958.

- **QUINE W. v. O.**, « Completeness of the propositional calculus », *The Journal of Symbolic Logic*, 3, 1938, 37-40.

Pablo ARCON

→ Computation ; Informatique ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Monisme ; Récurrence.

CLAIRAUT Alexis Claude, 1713-1765

A.C. Clairaut est un enfant prodige. Il commence ses études mathématiques à l'âge de neuf ans, et est élu membre de l'Académie royale des sciences à 18 ans. Il devient membre de plusieurs des plus importantes académies européennes et est en contact avec les plus grands mathématiciens de son temps, tels que Leonhard Euler, Jean Bernoulli, et son ami Maupertuis. Ses travaux portent principalement sur le calcul intégral, la mécanique céleste, la mécanique des fluides et la géodésie, et il est aussi l'auteur de quelques ouvrages plus généraux à but didactique.

Sa *Théorie de la figure de la terre* paraît en 1743. Il y fonde l'étude analytique des lois de l'équilibre d'un fluide en rotation, domaine de grand avenir, et donne plusieurs formules de géodésie qui portent son nom. Ses travaux participent de l'école française, privilégiant les méthodes et les calculs analytiques aux considérations métaphysiques.

Il est un adepte convaincu du système de Newton, à la diffusion duquel il participe en France, et qu'il défend contre les cartésiens dans des controverses scientifiques aujourd'hui légendaires. Il participe à des expéditions lointaines pour mesurer un arc de méridien, mesure dont dépend la démonstration de l'aplatissement de la terre aux pôles soutenu par Newton. Il sera pourtant accusé par Buffon de porter atteinte aux newtoniens, à propos du mouvement de l'apogée de la lune, parce qu'il ajoutait aux équations de l'Anglais un terme correctif qui lui semblait mieux rendre compte des observations. Une discussion s'ensuit sur la simplicité et le nombre de termes d'une équation décrivant une loi simple. Le cartésianisme profita de cette querelle jusqu'à ce que Clairaut annonce avoir corrigé son calcul pour le faire coïncider avec les mouvements qu'avaient établis Newton.

- **BOURBAKI N.**, *Éléments d'histoire des mathématiques*, Paris, Hermann, 1969. - **DAHAN-DALMEDICO A. & PEIFFER I.**, *Une histoire des mathématiques*, Paris, Le Seuil, 1986. - **DIEUDONNÉ J.**, **LOI M. & THAU R.** dir., *Penser les mathématiques*, Paris, Le Seuil, 1982.

Jean-Pierre SUTTO

→ Champ ; Force ; Newton.

CLASSIFICATION

BOTANIQUE

Comme pour toute science de la Nature, le travail en biologie comporte deux étapes. Il est tout d'abord indispensable de faire l'inventaire et de dresser le catalogue des entités sous étude, ce qui nécessite de les nommer et de les classer. Ensuite intervient l'étape de théorisation ; suivant Thom (1980), « Il s'agit cette fois de réduire l'arbitraire de la description, en mettant en évidence dans les agrégations de formes cataloguées, celles qui sont nécessaires ou probables ». Ces deux étapes sont-elles véritablement séparées dans le temps ? Ou plutôt, peut-on construire un catalogue définitif avant le passage à la théorisation ? L'histoire de la biologie permet de répondre par la négative, en montrant que l'établissement d'une classification nécessite une théorie sous-jacente. C'est en ce sens que A.-P. de Candolle a forgé en 1813 le terme taxinomie (ou taxonomie ; *τασις*, ordre, arrangement, et *νομος*, loi).

Mais que classe-t-on, et pourquoi ? A. de Jussieu (1848) précise que « la nature nous présente les végétaux comme autant d'individus. Ce nom même indique un tout indivis, des parties liées les unes aux autres sans discontinuités ». Puis il précise : « On est donc autorisé à reconnaître aux espèces végétant sur notre globe [...] un degré de fixité suffisant pour nous assurer qu'en cherchant à les classer, nous ne nous fondons pas sur une base mobile comme elle le serait pour une classification appliquée à des êtres incessamment variables. » Ainsi, même s'il n'y a pas immuabilité des espèces, une stabilité relative existe au moins pendant les temps historiques ; établir une classification a donc un sens par rapport à l'échelle de l'humanité.

Les premières classifications artificielles

Si, d'après Adanson (1763), Orphée a été le premier qui, de mémoire d'homme, ait parlé de Botanique, il convient de rappeler qu'Aristote doit être considéré comme le véritable fondateur de la Biologie en tant que discipline scientifique. Suivant A. de Candolle (1835), il a tenté de donner une classification des organismes vivants, et principalement des animaux, tandis que Théophraste, son successeur à la direction du Lycée, crée la Botanique en écrivant deux traités. A. de Jussieu ne remonte pas si loin, et cite Dioscoride (I^{er} s. apr. J.-C.) et Pline l'Ancien dont la vaste *Historia Naturalis* contient des chapitres traitant des Animaux et des Plantes. Jusqu'au XV^e s., on se contente de reprendre et de commenter de telles œuvres. Quelles étaient les bases de ces anciennes classifications ? Dioscoride, par exemple, partage son traité en six livres, consacrés successivement aux plantes aromatiques, alimentaires, médicinales (deux volumes), vénéneuses et enfin aux poisons. Un tel classement visait avant tout un but utilitaire.

Au Moyen Âge puis à la Renaissance, tout en

commentant ces traités, les naturalistes se rendent compte au fur et à mesure des limites de ces derniers. Ainsi ils ajoutent des figures au texte. Mais la notion de critère de reconnaissance n'étant pas encore bien précisée, une même plante pouvait se trouver sous plusieurs noms, et inversement un même nom pouvait recouvrir plusieurs espèces. Ces points témoignent d'une difficulté théorique de base non résolue, et la nécessité de concepts commence à se faire sentir.

Le caractère « non philosophique » des classifications apparaît alors. Mais trouver les bases permettant d'en construire une nouvelle n'était pas évident. Ici, l'utilisation du langage naturel tendit un double piège aux biologistes. L'habitude avait été prise d'utiliser la signification étymologique des noms pour comparer les plantes entre elles et pour diagnostiquer leurs « vertus ». Le mot n'est pas la chose, et ce ne sera pas l'un des moindres mérites de Pitton de Tournefort que de briser en 1694 plusieurs siècles d'hypnotisme en constatant que les critères des Anciens n'avaient rien de scientifique. Ainsi, au lieu de revenir à la Nature, et par là-même à l'étude de l'objet étudié, les botanistes s'arrêtaient au mot utilisé par les anciens pour désigner ce dernier. Ils firent donc éclater les classifications artificielles, et classèrent les plantes... par ordre alphabétique. Ce constat d'échec fut bénéfique. En effet, pour se servir d'un tel catalogue, suivant A. de Candolle (1835), « il faut connaître déjà, d'une autre manière, ou le nom de la plante, ou ses qualités, pour pouvoir faire usage des livres qui en traitaient spécialement ». Celui qui connaît les plantes peut utiliser le livre, mais il n'en a pas besoin ; celui qui ne connaît pas les plantes ne peut utiliser le livre dont il a besoin. Réaliser les dessins illustrant les traités a permis de faire des progrès substantiels. De plus, le nombre des espèces connues s'étant rapidement accru, il s'est trouvé un moment où la mémoire d'un seul homme ne pouvait suffire ; alors « les botanistes ont senti davantage la nécessité de les nommer régulièrement, et de les classer de manière à retrouver facilement les noms. C'est le but des méthodes artificielles ». Un système hiérarchisé devenait alors obligatoire, suivant A. de Jussieu (1848) : « De même qu'on avait naturellement réuni d'abord en une espèce tous les individus semblables entre eux, on cherche pour les réunir sous un même nom et sous une définition commune, toutes les espèces qui offraient entre elles une certaine ressemblance manquant aux autres. C'est ainsi que de plusieurs de ces unités nommées espèces, on composa des unités d'un ordre plus élevé auxquelles on donna le nom de genre. »

Ainsi le fondement même d'une véritable taxinomie réside tant dans la définition de l'espèce que dans celle du genre. Ce n'est pas que le concept de l'espèce soit simple, mais une première approche est intuitivement évidente. Le concept du genre est, lui, beaucoup plus ardu. C'est ainsi que Tournefort (1694) écrivait : « La découverte du genre est sans doute ce qu'il y a de plus beau et de plus certain, mais c'est aussi ce qu'il y a de plus difficile. » La construction du genre étant

entrevue, réitérer le processus, c'est-à-dire grouper les genres en familles, devenait tout à fait normal, comme le remarque A. de Jussieu (1848) : « Les genres devaient se multiplier en même temps que les espèces, et leur multiplication faire sentir la nécessité de divisions nouvelles dont chacune réunit un nombre limité de ces genres. » On arrivait donc à une classification hiérarchisée.

Les systèmes et méthodes des XVII^e et XVIII^e s.

Y a-t-il une grande différence entre « système » et « méthode » ? Adanson (1763) fait un long commentaire sur leur comparaison : « Un système est un arrangement qui réduit nombre de notions éparses ou compliquées à une seule notion simple et générale, fondée sur des principes qui ne sont pas démontrés absolus ni vrais, et qui ne peuvent l'être, mais qu'on suppose tels pour parvenir, par leur moyen, à la connaissance de ce qu'on ignore, et qu'il importe de connaître. » Ainsi il fut possible de se munir d'hypothèses et de règles, d'en tirer des conclusions, puis de procéder à la vérification de celles-ci. On peut alors distinguer le vrai du faux. Par contre : « Une méthode est un arrangement quelconque d'objets ou de faits, rapprochés par des convenances ou des ressemblances quelconques, que l'on exprime par une notion générale et applicable à tous ces objets, sans cependant regarder cette notion fondamentale ou ce principe comme absolu, ni invariable, ni si général, qu'il ne puisse souffrir d'exception. Ainsi la méthode ne diffère du système que par l'idée que l'auteur attache à ses principes, en les regardant comme variables dans la méthode, et comme absolus dans le système. »

En rapport avec cette époque, Lamarck cite alors Gesner comme celui qui « le premier sentit qu'il fallait diviser les plantes en classes, en genres et en espèces, et qui a la gloire d'avoir établi, avant qui que ce soit, la nécessité de chercher dans la fleur et dans le fruit, les caractères distinctifs les plus essentiels des classes et des genres ». Apparaît alors l'élément-clé, le (les) caractère(s) choisi(s) et la manière dont on s'en sert. Ainsi, à la fin du XVII^e s., de nombreux systèmes et méthodes apparaissent, pêchant les uns par des erreurs de botanique, les autres par des confusions théoriques. Mais une conséquence importante émerge à ce moment-là : c'est en manipulant tous ces catalogues plus disparates et approximatifs les uns que les autres que prend forme la notion fondamentale de classification naturelle.

L'intuition de la classification naturelle

Si les classifications artificielles se définissent principalement par la recherche de différences, l'idée de la classification naturelle survient après le constat que de nombreuses ressemblances ne peuvent être le fruit du hasard. « Il [le botaniste] s'apercevait qu'il est plus aisé de reconnaître, dès le premier coup d'œil, ces groupes naturels, que de rechercher en détail leurs caractères à

chaque fois qu'on en trouve un nouvel individu. » En fait, A.-P. de Candolle nous explique que deux possibilités s'offrent alors au naturaliste. Il peut analyser tous les détails, les décrire, les classer en se référant uniquement à la raison, à sa propre pensée, ou bien saisir d'un coup d'œil l'ensemble de la plante, en avoir une vision globale : « Il concevra alors qu'il serait possible de ranger tous les végétaux bien connus en groupes naturels, c'est-à-dire déterminés par l'ensemble de leurs ressemblances anatomiques, et qu'un pareil ordre donnerait à celui qui le connaîtrait l'image la plus fidèle de tout ce que nous savons sur la structure et par conséquent sur l'histoire des végétaux. »

Ainsi une alternative se présente au botaniste. Il peut adopter la position de l'analyste qui, quelles que soient les difficultés, doit donner un catalogue des entités observées, ou bien avoir une vision intégrée des choses, de type analogique, comme l'expose Adanson (1763) : « La [méthode] naturelle est celle qui conserve dans sa distribution toutes les classes naturelles, c'est-à-dire des classes où il n'entre aucunes plantes qui ne conviennent entre elles. C'est la nature qui prescrit ici à l'auteur méthodiste la marche qu'il doit suivre, et d'après ce guide sûr, l'analogie le conduit à juger de la possibilité de l'existence de certaines plantes, et de l'impossibilité de l'existence de quelques autres, et par là à discerner sûrement le vrai du faux. » Il y a néanmoins ici un grave problème de méthode ; en effet, dire que c'est la nature qui prescrit la marche à suivre est la porte ouverte à une bonne dose de subjectivité.

Linné, le « législateur » de la botanique

Après Tournefort, Linné est le deuxième botaniste moderne à avoir mis son empreinte sur sa discipline. Il reste à tout jamais célèbre pour avoir codifié l'appellation d'un organisme vivant, végétal ou animal, par une dénomination binominale, à savoir un nom de genre suivi d'un nom d'espèce. Suivant A.-P. de Candolle (1813) : « Tournefort semble être le premier qui ait réellement senti l'utilité de fixer le sens des termes de manière à employer toujours le même mot dans le même sens, et à exprimer la même idée par le même mot ; mais c'est Linné qui a réellement créé et fixé cette langue botanique, et c'est là son plus beau titre de gloire, car par cette fixation de la langue, il a répandu sur toutes les parties de la science la clarté et la précision. »

Pour mieux comprendre la méthode de Linné, voyons par exemple la construction de son *Methodus sexualis* – *Systema a staminibus et pistillis* de 1737. Il y adopte une méthode descendante, en partant de la classe pour aller vers l'espèce, en subdivisant au fur et à mesure les taxons : « Les classes ou familles sont la première division d'une méthode ; cette première division est établie sur le caractère le plus saillant, le caractère le plus général qu'on a adopté pour elle. L'ordre ou section subdivise chaque classe par la considération d'un caractère moins apparent, mais aussi général que celui

qui constitue la classe ; c'est une classe subalterne. [...] Le genre subdivise l'ordre en considérant dans les plantes, indépendamment du caractère particulier de l'ordre et de la section, les rapports qui semblent rapprocher un certain nombre de plantes : ces rapports portent sur toutes les parties de la fructification [...]. Les espèces subdivisent le genre ; leurs différences font le vœu du botaniste ; il compte autant d'espèces qu'il y a de différences bien établies entre les plantes du même genre. » Linné construit donc une hiérarchie en divisant à chaque fois le taxon de rang supérieur, avec l'ordre suivant : classe → ordre → genre → espèce. C'est donc une option différente de celle utilisée par Tournefort pour la construction du genre. En effet, celui-ci, agissant dans un sens différent de Linné, rassemble les espèces en genres : « Pour avoir une idée claire du mot genre au sens qu'on doit le prendre dans la Botanique, il faut remarquer qu'il est absolument nécessaire dans cette science de ramasser, comme par bouquets, les plantes qui se ressemblent, et les séparer d'avec celles qui ne se ressemblent pas. [...] de sorte que nous appellerons un genre de plante l'amas de toutes celles qui auront ce caractère commun qui les distingue essentiellement de toutes les autres plantes. » Le genre est donc ici construit par agglomération. De plus, Tournefort propose de réitérer le processus et de rassembler les genres en classes. Le mouvement est donc ici : classe ← genre ← espèce. En réalité, Linné traite souvent les deux taxons terminaux à la manière de Tournefort. C'est ainsi qu'il propose : « C'est la nature qui a formé les genres, et il est bien rare que les espèces du même genre ne s'écartent dans quelques-unes de leurs parties. » C'est d'ailleurs ce qui l'a mené à la nomenclature binominale, pensant que seuls le genre et l'espèce sont naturels. Mais, comme le remarque A.P. de Candolle (1835) : « Dans le système de Linné et dans tous les systèmes artificiels, il y a un désaccord qui résulte de ce que les espèces et les genres étant naturels, les classes sont artificielles. » Il convient donc d'arriver à une classification naturelle complète.

La classification naturelle, une révolution

Dès Tournefort, la classification naturelle est citée, désirée, mais souvent présentée comme un but ultime qui ne sera jamais atteint, un paradis à jamais refusé aux botanistes. Avec les Jussieu, ce rêve semble devenir réalité. Avec eux, on quitte le tâtonnement pour trouver une méthode synthétique embrassant l'ensemble de la classification.

De la célèbre famille de botanistes des Jussieu, Bernard a sans doute été le plus inventif, le plus révolutionnaire. Pourtant il a très peu publié, et c'est son neveu, Antoine-Laurent, qui a exposé les grandes idées de son oncle dans son *Genera plantarum* de 1789, ouvrage dont Cuvier dira que c'est « un ouvrage fondamental, qui fait, dans les sciences d'observation, une époque peut-être aussi importante que la chimie de Lavoisier dans les sciences d'expérience ».

Le travail de Bernard de Jussieu a été au départ

éminemment pratique, étant donné qu'en 1758, il entreprend, à la demande de Louis XV, d'arranger le jardin du Trianon de manière la plus « naturelle » possible. Or le fait de classer un jardin impose, pour des raisons évidentes, une classification bidimensionnelle, et, comme Linné l'écrivait en 1751 dans sa *Philosophia botanica* : « *Plantae omnes utriusque affinitatem monstrant uti : territorium in mappa geographica* » (Les plantes montrent entre elles une affinité similaire à celle des territoires sur une carte géographique). Cette notion de bidimensionalité est conceptuellement considérable, étant donné qu'elle introduit plus une idée de réseau que de série, chaque espèce ou chaque genre ayant divers voisinages.

Il est bien clair, à lire Antoine-Laurent, que la comparaison avec une carte géographique a constamment guidé les Jussieu. L'idée est simple : lorsque l'on dispose les plantes dans un jardin, c'est-à-dire sur une surface, on peut observer des groupements possibles emboîtés, comme les départements, provinces, pays, continents, de la géographie. Ce seraient les espèces, genres, familles... de la botanique. En continuant l'analogie, l'importance apparaît immédiatement : pour un géographe, citer le département du Finistère sous-entend que l'on parle d'un territoire qui se trouve en Bretagne, en France, en Europe... Dans cette hiérarchie, ce ne sont pas des critères de même type qui différencient le Finistère du Morbihan, et la France de l'Allemagne. Il y a donc une subordination de ces critères, car ils n'ont pas tous la même valeur. Suivant la distribution de Bernard de Jussieu du jardin du Trianon, l'emplacement d'un genre (correspondant à un élément de surface contenant différentes espèces) définit implicitement la famille, la classe, ... auxquelles ce genre appartient : ce sont les territoires de plus en plus vastes qui l'englobent. Les botanistes ont très vite adopté les idées des Jussieu, et les zoologistes comme Cuvier les appliquèrent au règne animal.

Les diverses interprétations de la classification naturelle

La caractéristique peut-être la plus remarquable de la classification naturelle est son unicité. Dans un monde à culture judéo-chrétienne, l'interprétation fut, pour beaucoup, immédiate, étant donné que selon la Bible il n'y a eu qu'une Création. La classification reflète donc l'ordre donné par le Créateur. Cette interprétation mène évidemment à une vision fixiste du vivant. Mais, dès le XVIII^e s., l'idée du transformisme commence à se répandre, en particulier chez les Encyclopédistes. Elle devient grandissante avec Lamarck dès 1809, puis avec Geoffroy Saint-Hilaire en 1825. Ce fut Darwin qui, dans son *Origine des espèces* de 1859, arrive à la solution. Il propose le concept essentiel de descendance avec modification, ce qui veut dire que les organismes, en passant d'une génération à une autre, peuvent se transformer. Ainsi, les caractères que les naturalistes ont considérés comme montrant de réelles affinités entre différentes espèces sont ceux qui sont hérités d'un ancêtre commun. Pour Darwin, toute vraie

classification doit être généalogique ; elle doit refléter les relations de parenté entre espèces. Avec un tel concept, réaliser une classification ou retrouver l'histoire du vivant sont deux opérations identiques. La classification devient donc phylogénétique.

L'unicité de la classification naturelle prend donc un tout autre sens : il y a une classification parce qu'il y a une histoire du vivant sur Terre.

D'un point de vue opérationnel, on peut se contenter de l'acquis. Le principe de subordination des caractères peut continuer à être appliqué, mais avec une signification nouvelle. Un caractère unit des organismes dans un taxon donné parce que ces derniers l'ont hérité d'un ancêtre commun. Un tel caractère – appelé homologue – est donc maintenant utilisé comme une mémoire, comme la trace d'un passé plus ou moins lointain. De cette manière, la biologie devient une discipline historique. Ceci implique 1) que le nombre de taxons ne peut être déterminé à l'avance (on ne peut savoir le nombre d'ancêtres communs) ; 2) que la bonne méthode est agglomérative, c'est-à-dire qui remonte du passé proche vers le passé lointain. Comme la méthode était opérationnelle, il faudra attendre le milieu du XIX^e s. pour qu'une logique, véritablement inspirée des idées de Darwin et appliquant réellement le principe de descendance avec modification, puisse être trouvée.

Les méthodes actuelles en taxinomie

Au cours de ces trente dernières années, les progrès de la taxinomie ont concerné d'une part le domaine expérimental, d'autre part le traitement des caractères. Par la biologie moléculaire, on a accès directement au génome, et les séquences d'acides nucléiques fournissent des caractères supplémentaires qui viennent s'ajouter aux caractères morphologiques.

La systématique phylogénétique – ou cladistique –, fondée par Willi Hennig en 1950, se propose de retrouver les parentés évolutives entre espèces en les rassemblant en groupes monophylétiques, c'est-à-dire en groupes comportant un ancêtre commun et l'ensemble de ses descendants. Pour cela, elle exploite avec un maximum de rigueur le concept darwinien de descendance avec modification. Un caractère héréditaire qui varie présente deux états, un état ancestral, le plus ancien, et un état dérivé, résultat de la mutation, le plus récent. Le partage d'un état ancestral ne doit pas être pris en compte, car il n'apporte pas d'information sur les relations de parenté. Seul le partage par plusieurs espèces d'un état dérivé résultant d'un événement évolutif chez un ancêtre commun détermine un groupe monophylétique. Il peut y avoir des difficultés dans l'application d'une telle logique, car tout élément de ressemblance n'est pas obligatoirement un caractère homologue, ce qui brouille l'information phylogénétique. En effet, il peut se produire des convergences, résultats d'acquisitions indépendantes d'un même caractère au cours de l'évolution. On est donc amené

au début de l'étude à faire des hypothèses d'homologie sur les caractères, en sachant que, dans le nombre, il peut y avoir des caractères convergents. On construit alors tous les arbres possibles, sur lesquels on met en place les événements évolutifs, et on ne retient que l'arbre le plus parcimonieux, c'est-à-dire celui qui présente le plus petit nombre d'étapes évolutives. Enfin, on revient sur les hypothèses d'homologie qui, dans ce cadre explicatif, se trouvent confirmées ou infirmées. Retenir l'arbre le plus parcimonieux revient à retenir le modèle le plus simple. Mais rien ne prouve que ce soit lui qui représente la véritable histoire du groupe. On conclura à la vraisemblance du modèle proposé après beaucoup de résultats concordants.

La deuxième approche possible, la phénétique, est souvent menée parallèlement à la cladistique pour les caractères moléculaires. Cette fois-ci, après avoir établi la liste des caractères, il convient de s'intéresser à leur nature, pour ne tenir compte que de leur nombre. On compte les différences trouvées lors de la comparaison des espèces étudiées deux à deux. Ces nombres sont alors interprétés comme des distances, et vont pouvoir être utilisés pour construire un arbre. Un arbre phénétique n'a pas la même signification qu'un arbre cladistique. Le raisonnement sur les caractères est ici plus pauvre. Un ancêtre commun n'est pas inféré à l'aide de caractères homologues, mais les espèces sont seulement regroupées selon leur similitude globale. Alors que la notion de temps est à la base de la démarche cladistique, elle n'apparaît pas immédiatement en phénétique. Elle peut simplement être ajoutée *a posteriori* après avoir orienté l'arbre obtenu. La phénétique a tout d'abord été appliquée aux caractères morphologiques vers les années 1970. Ce fut un échec, dû principalement au fait que, en l'absence de retour aux caractères, homologues et convergences n'étaient pas distinguées. En effet, on comprend intuitivement que cladistique et phénétique conduisent à des résultats identiques si tous les caractères sont homologues, c'est-à-dire s'il n'y a pas de convergence. Mais plus la description morpho-anatomique des organismes est fine, plus le nombre de convergences augmente. La phénétique menait alors à des résultats aberrants. Lorsque le séquençage des protéines et des acides nucléiques a pu être réalisé à grande échelle, les techniques phénétiques se trouvèrent être d'une grande utilité. Cette fois, globalement, les arbres obtenus par la méthode de distances ou la méthode de parcimonie conduisent à des résultats très voisins. Ceci est principalement dû au fait que, dans la plupart des cas, en ce qui concerne les caractères moléculaires, le nombre d'homologies excède de loin le nombre de convergences.

L'arbre universel du vivant

L'utilisation des caractères moléculaires a permis d'étendre le champ de l'analyse phylogénétique. En effet, l'analyse des caractères morpho-anatomiques

demande qu'on puisse au moins reconnaître entre les organismes une certaine similitude pour définir des états morphologiques. Mais comment trouver des caractères morphologiques homologues entre une bactérie et un éléphant ? Au niveau des molécules, cette homologie existe, par exemple pour certains gènes nécessaires au fonctionnement de toute cellule vivante (gènes dits « de ménage »). Ce sont les gènes qui codent pour les enzymes du métabolisme intermédiaire (glycolyse, cycle de Krebs, ...).

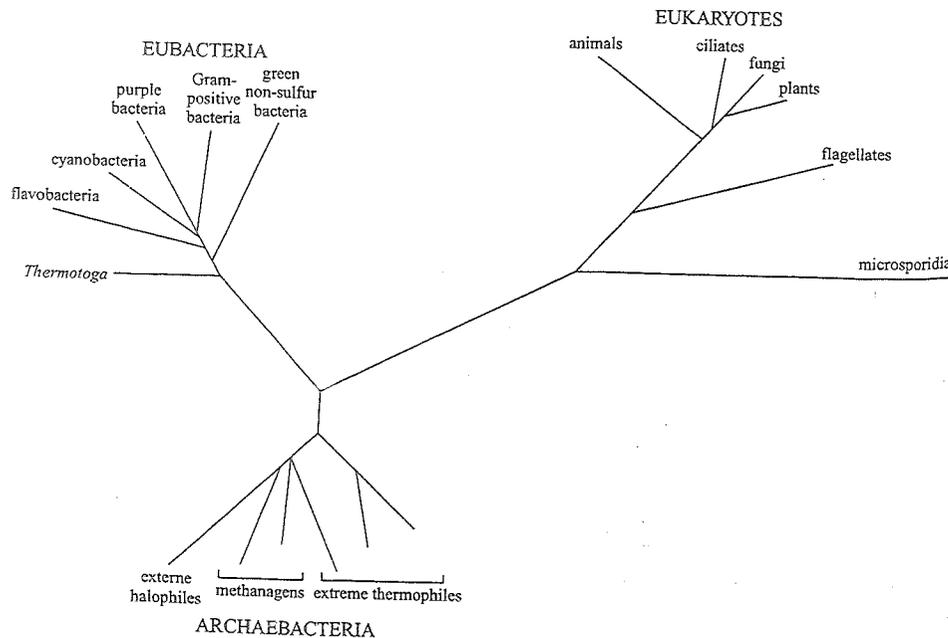
On peut également prendre les gènes qui codent pour les molécules indispensables à la traduction, c'est-à-dire à la synthèse des protéines à partir de l'information génétique transmise du noyau au cytoplasme par l'intermédiaire de l'ARN messenger. Le ribosome est l'organite cellulaire qui permet cette synthèse. Or le ribosome est composé de protéines et de deux ARN, dits ARN ribosomiques ou ARNr. Ces ARNr se retrouvent chez tous les organismes, et leurs séquences peuvent servir de source d'information phylogénétique pour comparer des organismes très différents par leur plan d'organisation. En d'autres termes, ces ARNr sont universels, et il est alors possible, à partir de leurs séquences, de retracer l'histoire du monde vivant dans sa totalité, d'esquisser ce que l'on appelle « l'arbre universel du vivant ».

Ainsi, les cellules sans noyau individualisé (les « procaryotes », principalement les bactéries) ne

forment pas un monde unique, monophylétique, mais deux ; les eubactéries et les archéobactéries forment deux des trois « empires » qui, avec les eucaryotes, composent le vivant. La cellule eucaryote, celle qui dispose d'un noyau, se retrouve chez des organismes comme les champignons, les végétaux et les animaux... Elle est structurée de manière complexe : en plus du noyau, elle est peuplée d'organites, en particulier les mitochondries et, chez les végétaux, les chloroplastes. Une hypothèse déjà ancienne supposait que ces organites avaient une origine bactérienne. Grâce à l'analyse moléculaire, cette théorie a pu être solidement établie. De plus, on a pu préciser l'origine des bactéries symbiotes.

La méthode cladistique d'une part, l'analyse moléculaire de l'autre, ont renouvelé nos idées sur l'évolution, en particulier sur la signification du concept de règne.

Il est pourtant un point qui, pour le moment, reste non résolu. Il s'agit de l'arbre réunissant les principaux embranchements des animaux. La méthode cladistique peine à définir les relations de parenté entre des animaux présentant des plans d'organisation aussi différents qu'un oursin, un oiseau, un ver, une huître ou une abeille. La phylogénie moléculaire bute sur ses limites de résolution. La génétique comparée du



L'arbre universel du vivant, selon Woese, arbre non raciné construit à partir des séquences de l'ARN ribosomique ; le vivant est partagé en trois domaines, les eubactéries, les archéobactéries et les eucaryotes.

développement n'en est encore qu'à ses débuts, et n'a, pour le moment, pas apporté de résultat décisif dans ce domaine.

Si nous n'avons pas la solution, nous pouvons tenter une explication rationnelle à cet échec : la genèse de la grande majorité des phylums de métazoaires (les triploblastiques, ceux qui présentent trois feuilletts embryonnaires au cours de leur développement) s'est réalisée au début de l'ère primaire, il y a environ 540 millions d'années, au cours d'une période de temps très brève à l'échelle géologique – peut-être une dizaine de millions d'années seulement. C'est ce que l'on appelle l'explosion cambrienne. Les données moléculaires ne permettent pas de résoudre l'ordre des branchements, c'est-à-dire l'ordre d'émergence des groupes qui ont survécu jusqu'à maintenant. C'est donc l'un des exemples les plus cruels pour lequel les approches tant morpho-anatomique que moléculaire présentent un échec. Pourtant, ce résultat négatif peut être interprété comme une confirmation de la rapidité de l'explosion diversificatrice soupçonnée par les paléontologistes. La situation est actuellement faste ; les méthodes de reconstruction sont relativement efficaces, et les caractères disponibles sont très variés (morpho-anatomiques, biochimiques, moléculaires...). Pourtant les résolutions ne sont pas parfaites. Ne serait-ce pas dû au fait que les mémoires sont effacées au fur et à mesure des temps géologiques, amenant une impossibilité de fait nous interdisant à tout jamais l'accès au passé lointain ? Les prochaines décennies devront répondre à cette question cruciale.

► ADANSON M., *Familles naturelles des plantes*, Paris, Masson, 1847. – CANDOLLE A.-P. DE, *Théorie élémentaire de la Botanique ou exposition du principe de la classification naturelle et de l'art de décrire et d'étudier les végétaux*, Paris, Déterville, 1813 ; *Introduction à l'étude de la Botanique*, Paris, Librairie de Roret, 1835. – DARLU P. & TASSY P., *La Reconstruction phylogénétique. Concepts et méthodes*, Paris, Masson, 1993. – DARWIN C., *L'Origine des espèces* (1859), rééd. Paris, GF-Flammarion, 1992. – GOULD S.J., *La vie est belle. Les surprises de l'évolution*, Paris, Le Seuil, 1989. – HENNIG W., *Phylogenetic Systematics*, Univ. of Illinois Press, 1966. – JUSSIEU A. DE, « Principes de la méthode naturelle des végétaux », *Extrait du Dictionnaire des Sciences Naturelles*, Paris, Levrault, 1824 ; « Taxonomie », *Extrait du Dictionnaire des Sciences Naturelles*, Paris, Levrault, 1848. – MAYR E., *The Growth of Biological Thought*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1982. – THOM R., « Connaissance et métaphore », *Séance publique annuelle des cinq académies*, 24, Paris, Firmin-Didot, oct. 1980. – TORT P., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996. – TOURNEFORT J.P. DE, *Éléments de Botanique ou méthode pour connaître les plantes*, Paris, Imprimerie royale, 1694. – WOESE C.R., KANDLER O. & WHEELIS M.L., « Towards a natural system of organisms : proposal for domains archaea, bacteria and eucarya », *Proc. natl. Acad. Sci.*, 1990, vol. XC VII, 4576-4579.

Hervé LE GUYADER

→ Biogéographie ; Écologie ; Espèce ; Évolution ; Taxinomie ; Vivant (Théorie du).

CLASSIFICATION

CHIMIE

De même que les voyageurs naturalistes du XVIII^e s. rapportent dans les jardins botaniques d'Europe des collections de plantes ou d'animaux qu'il faut étiqueter et ranger, de même les chimistes du siècle des Lumières collectent dans leurs laboratoires une population nombreuse de substances matérielles individuelles, extraites des terres gisant dans les mines, des sels qu'on mélange, de plantes qu'on distille... Pour produire un savoir à partir de spécimens accumulés, naturalistes et chimistes doivent nommer et classer. La nomenclature et la classification, deux opérations distinctes quoiqu'étroitement solidaires, supposent toutes deux la comparaison, l'établissement de degrés d'analogies ou de parentés.

Si naturalistes et chimistes affrontent le même problème de gestion d'une multiplicité d'individualités, la manière de systématiser diffère néanmoins. Il s'agit moins de ranger des collections, ou d'identifier des spécimens que d'agir. Par des opérations de la nature ou de l'art, le chimiste agit sur la matière. Contrairement au naturaliste, il peut combiner les substances qu'il étudie, les composer et les décomposer. La nature essentiellement opératoire du savoir chimique oriente la classification vers la prévision. Au siècle des Lumières, à l'époque où Linné classe les végétaux, les chimistes dressent des tables d'affinités permettant de prévoir l'issue des réactions chimiques. Ils ne classent pas des substances mais leurs relations, ou rapports, déterminées par l'observation des déplacements d'une substance par une autre dans l'expérience. Dans les années 1770, Tornbern Bergman publie des tables « d'attraction élective » qui comportent 49 colonnes systématisant les résultats de milliers d'expériences, effectuées par la « voie sèche » et la « voie humide » avec des cases vides attendant d'être remplies par de nouvelles expériences. Les premières tables qui systématisent la chimie s'inscrivent donc dans la lignée d'une science empirique qui accumule des résultats sans pouvoir subsumer la diversité sous l'unité d'une loi générale, un peu comme l'astronomie avant Newton.

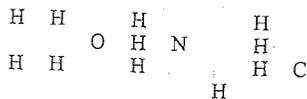
Tout autre est l'épistémé qui inspire la célèbre classification des éléments chimiques. Mendeleev la présente comme une conséquence de la découverte d'une loi générale, la loi périodique, qu'il compare à celle de Newton (« Faraday Lecture », trad. fr. in *Le Moniteur scientifique*, 3, 1889, p. 888-904). C'est parce qu'il estime qu'une loi de la nature doit être absolument générale, sans exception, que Mendeleev n'hésite pas, aussitôt entrevue la loi périodique, à laisser des cases vacantes dans le tableau pour respecter la périodicité des propriétés. La prévision de trois éléments nommés eka-silicium, ekabore, eka-aluminium ressemble à la prévision de la planète Neptune par l'astronome Urbain le Verrier. Si la mécanique céleste sert de modèle épistémologique à Mendeleev, sa démarche diffère cependant de celle d'un Newton. Son problème est celui de tous les

professeurs de chimie du XIX^e s. Comment présenter à des étudiants de chimie le savoir accumulé sur des milliers de substances aux propriétés individuelles. Faut-il apprendre la chimie sans comprendre, mémoriser des centaines, des milliers de propriétés et de réactions ? La difficulté se pose d'abord pour les éléments car le développement des techniques d'analyse a provoqué une inflation de la population des corps simples. Avant la classification périodique, les professeurs de chimie adoptent des solutions de compromis dans leurs cours et manuels : tout en aspirant à une « classification naturelle » – définie par André-Marie Ampère comme celle qui tiendrait compte de l'ensemble des propriétés des substances (*Annales de chimie*, I, 1816, p. 259-308, 373-390), ils adoptent une « classification artificielle » qui privilégie certaines propriétés. Les corps sont divisés en deux catégories métaux et non-métaux (ou métalloïdes) ; les premiers sont classés en fonction de leurs réactions avec l'oxygène, suivant le principe adopté par Louis Thenard. Les manuels insistent tant sur l'arbitraire de ces divisions, comme sur la relativité des notions de simples et de composés, que Flaubert dépeint la chimie comme un savoir incertain et contradictoire dans le parcours encyclopédique de ses deux héros autodidactes Bouvard et Pécuchet.

Pourtant un projet de classification des éléments sur la base de leur poids atomique parcourt tout le XIX^e s. qui, à l'instar des classifications naturalistes, s'articule sur une hypothèse évolutionniste. Il s'agit de former des familles d'éléments dont les valeurs de poids atomiques présentent des relations arithmétiques remarquables et dont les propriétés chimiques présentent des analogies. C'est ainsi que, dès 1817, Johan Döbereiner, professeur à Iéna, a formé des triades d'éléments : $Br = Cl + 1/2$; $Na = Li + K/2$; $Se = S + Te/2$. Plus tard, Leopold Gmelin distingue trois familles plus larges : les éléments qui ont un poids atomique voisin ; les éléments qui ont des poids atomiques multiples entre eux ; et ceux dont les poids atomiques forment des moyennes arithmétiques à la manière des triades de Döbereiner. Dans tous ces essais, inspirés par l'hypothèse de Prout selon laquelle tous les corps simples dériveraient d'un élément primordial, l'hydrogène, les relations numériques et les analogies chimiques sont traitées comme des indices de liens de parenté. La classification est l'analogue d'un arbre généalogique. Les éléments sont assimilés à des « radicaux » de la chimie minérale, c'est-à-dire à des substances agissant comme des individus, potentiellement composés. C'est ainsi que Jean-Baptiste Dumas établit un parallèle entre des familles de corps simples et des familles de radicaux sur la base de régularités dans la progression des poids atomiques. Tout autre est la stratégie de Mendeleev qui refuse catégoriquement l'hypothèse de Prout. Au lieu de chercher des liens de parenté pour former des familles, comme ses prédécesseurs, il considère l'ensemble des éléments et les range par ordre de poids atomiques croissants. En se référant aux deux familles si contrastées des métaux alcalins et des halogènes, il commence par classer les éléments qui ont des

propriétés caractéristiques Li, Be, B, C, N, O, F qu'il utilise comme « types » ou guides pour remplir peu à peu les cases d'un tableau incluant l'ensemble des éléments connus et à découvrir. Cette démarche procédant à partir d'éléments « typiques » est, en fait, inspirée de celle des chimistes organiciens.

La classification des composés constitue, en effet, un problème central vers 1840 car les chimistes ont identifié des milliers de composés aux propriétés différentes quoiqu'ils soient tous formés des mêmes éléments, carbone et hydrogène, plus oxygène et azote dans certains cas. On ne peut donc plus les nommer ni les classer en fonction de la nature et proportion de leurs éléments constituants. La solution de ce problème, trouvée vers 1850, repose sur la notion de « types », c'est-à-dire des structures moléculaires de base d'où dériveraient par substitution d'atomes les autres composés (Charles Gerhardt, *Traité de chimie organique*, Paris, 4 vol., 1853-1856). Cette notion, introduite par Alexander Williamson, est reprise par Gerhardt qui classe les composés par rapport à quatre types – le type hydrogène, le type eau, le type ammoniac et le type méthane, qu'il écrit avec des formules verticales.



Par exemple, les acides dérivent du type eau par substitution de radicaux à l'hydrogène. Pour Gerhardt, les types sont des idéaux abstraits, des schèmes de classification qui n'ont pas d'existence physique réelle dans le composé. Mais en déplaçant l'attention des éléments vers l'architecture moléculaire, cette classification a constitué la chimie organique au sens moderne de chimie du carbone.

► BÉNSAUE-VINCENT B., « L'éther, élément chimique : un essai malheureux de Mendeleev en 1904 », *British Journal for the History of Science*, 15, 1982, 183-187 ; « Mendeleev's periodic system of chemical elements », *British Journal for the History of Science*, 19, 1986, 3-17. – BRUSH S., « The Reception of Mendeleev's Periodic Law in America and Britain », *Isis*, 87, 1996, p. 595-628. – SPRONSEN J.W.V., *The Periodic System of Chemical Elements, A History of the First Hundred Years*, Amsterdam, Elsevier, 1969. – STENGERS I., « L'affinité ambiguë : le rêve newtonien de la chimie du XVIII^e siècle », in SERRÉS M. éd., *Éléments d'histoire des sciences*, Paris, Bordas, 1989, p. 297-320.

Bernadette BÉNSAUE-VINCENT

→ Affinité ; Chimie physique ; Sel.

CLONAGE

Le terme de clonage désigne l'opération par laquelle un clone est obtenu ou produit. Un clone est un ensemble de cellules provenant d'une cellule unique par suite

d'une série de divisions cellulaires successives. En deux occasions déjà, ce terme s'est trouvé impliqué dans des discussions publiques suscitées par les progrès de la biologie : clonage moléculaire dans les années 1970, clonage de mammifères à partir d'un noyau de cellule d'organisme adulte, plus récemment.

Le clonage moléculaire

Le clonage moléculaire désigne l'opération par laquelle un segment d'ADN d'origine quelconque peut être amplifié dans une bactérie après avoir été « recombiné » avec des segments d'ADN bactérien. L'opération de clonage proprement dite consiste dans l'isolement et la multiplication de la bactérie porteuse du gène qu'on cherche à amplifier. Le gène recombiné est extrait de la population de bactéries, laquelle constitue un clone (qui provient d'une unique bactérie). On se reportera à l'article « Biotechnologies » pour plus de détails sur la technique. Nous mentionnerons ici simplement les deux conférences d'Asilomar qui ont été organisées dans le but d'évaluer les risques que pourraient comporter de pareilles expériences : la première, en 1974, a décrété un moratoire (arrêt des recherches) sur les expériences comportant des recombinaisons d'ADN ; la seconde, en 1975, a levé ce moratoire moyennant un certain nombre de précautions et de règles. Dans son livre *Les secrets du gène*, François Gros a retranscrit l'esprit de ces débats : « Cette technologie [...] commence à avoir autant d'adeptes que de détracteurs. Le ton monte de part et d'autre. D'un côté, on trouve les défenseurs de la liberté scientifique inconditionnelle qui s'insurgent contre toute volonté normative, de l'autre les chantres de la responsabilité collective qui, quelle que soit l'origine de leurs réserves, estiment immoral de poursuivre ces travaux sans que s'instaure un débat public, une consultation internationale. »

Les développements scientifiques

Le mot « clonage » s'est trouvé une nouvelle fois au centre d'une discussion publique dans le courant de l'année 1997 à la suite de la publication, dans le numéro de la revue *Nature* daté du 27 février 1997 d'un article signé de Ian Wilmut *et al.* qui rapporte le premier développement complet d'un mammifère (brebis) obtenu à partir d'un noyau de cellule adulte transplanté dans un ovocyte énucléé (dont le noyau propre a été préalablement extrait). Les manipulations qui ont conduit à la naissance de la brebis 6LL3, mieux connue sous le nom de « Dolly », y sont décrites en détail ainsi que des expériences similaires réalisées à partir de noyaux de cellules embryonnaires et fœtales. Les noyaux sont extraits de cellules en culture établies à partir d'un fragment de tissu (lequel provient selon les cas soit d'un embryon soit d'un fœtus soit d'un organisme adulte). La technique de transplantation des noyaux proprement dite, qui demande un appareillage relativement simple mais requiert une certaine précision et une grande

dextérité manuelle, consiste à prélever sur les cellules ainsi mises en culture des noyaux et à les introduire dans des ovocytes préalablement énucléés. La réimplantation de l'œuf ainsi reconstitué dans une mère porteuse conduit (avec une fréquence variable selon les tissus dont dérivent les noyaux transplantés) au développement complet d'un nouvel organisme.

Ni le mot clone ni le mot clonage ne figurent dans cette publication. Le terme employé est « descendance dérivée de » suivi d'une désignation de la cellule dont on a extrait le noyau pour le transplanter dans un ovocyte énucléé. Cette dénomination est plus exacte que celle de « clonage » : il ne s'agit pas d'un clonage au sens strict, lequel aurait impliqué que l'ovocyte utilisé comme cellule receveuse de noyau soit lui-même issu de la brebis donneuse de noyau. Réaliser une telle opération aurait sans doute présenté des problèmes techniques supplémentaires (surtout que, on le verra, l'animal était mort entre-temps). Mais en outre, le fait d'utiliser comme ovocyte receveur des ovocytes de brebis de race différente (ovocytes issus d'une femelle « scottish blackface » – face noire – énucléés, noyaux issus de cellules d'une brebis « Finn Dorset » – blanche) constituait une subtilité expérimentale permettant de s'assurer que le noyau transplanté était bien à l'origine de la descendance obtenue. Voici donc le principe de l'expérience : transplanter dans des ovocytes de brebis à face noire, des noyaux de brebis à face blanche prélevés à différents stades de leur développement puis réimplanter ces ovocytes manipulés dans une mère porteuse. Des animaux viables sont obtenus que les noyaux proviennent de cellules embryonnaires, fœtales ou encore, dans un cas unique, adulte.

C'est cependant sous le nom de « clonage » que s'est fait connaître cette technique qui soulève plusieurs types de questions que nous aborderons successivement. Tout d'abord, nous rapporterons le contexte scientifique dans lequel s'inscrivent les expériences de Wilmut *et al.* (la problématique dans laquelle elles s'insèrent et les expériences similaires qui les ont précédées) ; ensuite, nous envisagerons les discussions et les controverses qui ont pu naître autour des expériences elle-mêmes. Finalement nous examinerons les discussions sur le clonage qui ont pu être menées par la suite dans la perspective de son extension à l'homme.

Questions fondamentales soulevées par les expériences de clonage

Le résultat rapporté par l'équipe écossaise – pour autant qu'il puisse être considéré comme fermement établi (les réserves à faire à ce sujet seront développées un peu plus loin) – est d'une grande importance théorique. Il montre en effet qu'un noyau de cellule adulte, une fois transplanté dans un environnement cellulaire adéquat, est capable de conduire un développement complet de l'organisme chez un mammifère. Le problème des capacités de développement potentiel des noyaux, pour être ancien, n'a pas cessé

d'être actuel, faute d'avoir été résolu de manière satisfaisante.

Au cours du développement, les cellules s'engagent dans des voies de différenciation spécifiques pour prendre part à la constitution des tissus : foie, muscle, intestin, etc. Les cellules qui manifestent des spécificités tissulaires sont dites « différenciées ». Mais en quoi consiste cette différenciation au niveau du noyau de la cellule ? On sait que le noyau contient l'intégralité du génome de l'organisme, mais on ignore si l'engagement dans une voie de différenciation donnée implique ou non qu'il subisse des modifications irréversibles.

Le terme de « totipotence » a été introduit pour qualifier le potentiel de différenciation d'une cellule : une cellule totipotente (qui a toutes les potentialités) est une cellule capable de produire tous les types cellulaires de l'organisme. Une cellule non totipotente est, par contraste, une cellule qui n'est plus capable de produire tous les types cellulaires mais seulement un nombre restreint d'entre eux. La totipotence rapportée au noyau (non plus à la cellule entière) exprime la capacité qu'a celui-ci, une fois transplanté dans le milieu cellulaire convenable (ovocyte énucléé ou inactivé) de produire la totalité des types cellulaires, évalué à partir de la capacité qu'il manifeste à conduire un développement normal. C'est dans le but d'éclaircir la question de la totipotence des noyaux qu'ont été menées depuis les années 1950, un grand nombre d'expériences de transfert de noyaux. La cellule receveuse est toujours un ovocyte énucléé ou inactivé. La cellule donneuse de noyau diffère en revanche d'une expérience à l'autre. C'est en particulier le stade de développement de cette cellule qui est à prendre en compte. Les cellules faiblement différenciées (comme les cellules embryonnaires) ne sont pas, à cet égard, équivalentes à des cellules fortement différenciées (comme les cellules de tissu adulte).

Bring et King, à Philadelphie en 1952, réalisent sur la grenouille (*Rana pipiens*) des expériences de transfert de noyaux de cellules embryonnaires dans des ovocytes énucléés (l'amphibien est utilisé notamment en raison des facilités qu'il offre pour la manipulation des ovocytes : ceux-ci sont de taille relativement importante et pondus dans l'eau). Ils observent un développement jusqu'au stade du têtard, mais pas au-delà (Bring R. & King I.J., *Transplantation of living cell nuclei from blastula cells into enucleated frog's eggs*).

John Gurdon, à Cambridge (Angleterre), publie en 1962 des expériences similaires réalisées sur le xénope (*Xenopus laevis*) : des noyaux de cellule prélevés à différents stades de développement (embryon et jeune têtard) sont transplantés dans des ovocytes irradiés aux rayons ultra-violet (cette opération a pour effet d'inactiver le noyau et évite ainsi la délicate manipulation que nécessite son extraction). Il observe un développement complet jusqu'au stade adulte (Gurdon J.B., *Adult frogs derived from the nuclei of somatic cells*). En 1964, il publiera des résultats rapportant l'obtention d'individus adultes (xénopes) à partir de noyaux de

cellules de têtard tardif (largement différenciées) transplantés dans des ovocytes irradiés (Gurdon J.B. & Vohring V., « Fertile » intestine nuclei), mais ces résultats seront controversés, notamment par King, l'auteur des études menées sur *Rana pipiens* rapportées plus haut.

En 1975, Gurdon réalise des transferts dans des ovocytes irradiés de noyaux prélevés sur des cellules de xénope adulte (cellules épithéliales maintenues en culture). Un début de développement est observé. Mais aucun des embryons ne parvient à dépasser le stade du têtard. Ce résultat suggère que les noyaux de cellules épithéliales (adultes) sont trop engagés dans leur voie de différenciation spécifique pour permettre la formation de tous les types cellulaires. Ils ont perdu leur totipotence (Gurdon J.B., Laskey R.A. & Reeves O.R., *The developmental capacity of nuclei transplanted from keratinized skin cells of adult frogs*).

Les mammifères, à la différence du xénope, présentent un développement intra-utérin (dans l'organisme de la mère). Cette situation rend les interventions expérimentales (sur les premiers stades du développement) plus délicates. Celles-ci furent néanmoins réalisées, en premier lieu chez la souris, par Illmensee et Hoppe. L'expérience consiste à transférer dans des ovocytes énucléés des noyaux de cellules prélevés au stade blastocyste. À ce stade l'embryon est déjà composé de deux types de cellules : celles (cellules du trophoblaste) qui sont destinées à former des annexes embryonnaires (placenta et sac vitellin) et celles (cellules de la masse cellulaire interne) qui sont destinées à former l'embryon proprement dit. Les auteurs observent un développement d'organismes viables, mais uniquement lorsqu'ils utilisent des cellules de masse cellulaire interne (Illmensee K. & Hoppe P.C., *Nuclear transplantation in Mus musculus : developmental potential of nuclei from preimplantation embryos*).

L'ensemble de ces résultats a attiré l'attention sur le fait que le concept de totipotence devait s'entendre dans un sens assez large. En particulier les résultats publiés en 1975 par Gurdon *et al.* (têtard obtenu à partir de cellules adultes de xénope) montraient qu'un développement jusqu'à un stade avancé (stade du têtard) pouvait être obtenu à partir d'un noyau de cellule adulte transplanté dans un ovocyte inactivé ; mais ils indiquaient aussi que ce développement ne paraissait pas pouvoir se poursuivre au-delà de ce stade. Les expériences menées par Wilmut *et al.* semblent indiquer au contraire qu'un développement complet est possible à partir d'un noyau de cellule adulte (chez un mammifère). Les auteurs n'excluent pas cependant que le noyau ayant permis ce développement puisse provenir d'une cellule souche faiblement différenciée. Cette nuance est importante pour les embryologistes pour qui la différenciation cellulaire et surtout la manière dont elle est déterminée au niveau de la cellule est, ainsi que nous l'avons signalé, un objet d'interrogations et de recherches. Toutefois, elle n'affecte pas la possibilité générale qui se trouverait ouverte par ce genre d'expérience de réaliser un clonage à partir d'un

organisme mammifère adulte. Elle indiquerait éventuellement l'existence d'une restriction du type de cellule devant être utilisé pour une telle manipulation.

Intérêt pratique du clonage animal

Outre leur intérêt fondamental, ces résultats permettent d'envisager un mode de reproduction inédit qui, chez l'animal, présente deux intérêts importants : d'une part la possibilité de multiplier les individus d'un génotype donné en s'affranchissant partiellement des contraintes de temps liées à la reproduction sexuée, d'autre part la possibilité de réaliser des manipulations génétiques, relativement aisées sur des cellules en culture. Nous avons signalé que l'obtention de noyaux pour le transfert dans un ovocyte comportait une étape de culture cellulaire *in vitro*. Au cours de cette étape, des modifications génétiques sur les cellules en culture (insertion, remplacement ou destruction de gène) sont envisageables par des techniques devenues routinières dans les laboratoires (Angelika, E. *et al.*, *Human factor IX transgenic sheep produced by transfer of nuclei from transfected fetal fibroblast*). L'obtention d'animaux viables à partir de ces noyaux génétiquement modifiés constitue un précieux outil génétique. Ce type de manipulation est possible depuis quelques années chez la souris grâce à l'existence dans cette espèce de cultures de cellules-souches embryonnaires (cellules pouvant être manipulées en culture avant d'être réimplantées dans l'embryon pour participer au développement). En dépit d'efforts répétés, les tentatives pour obtenir des cellules similaires dans d'autres espèces sont demeurées infructueuses. Le clonage représenterait un moyen de pallier cet inconvénient. Tout comme chez la souris, une modification génétique obtenue sur des cellules en culture pourrait être introduite de manière héréditaire dans le génome de mammifères tels que la brebis.

Controverse au sujet de ces résultats

En janvier 1998, l'hebdomadaire scientifique *Science* a ouvert ses colonnes à une controverse née au sujet des résultats qui viennent d'être rapportés. Plus précisément, au sujet de l'unique résultat qui concerne l'obtention d'une descendance viable à partir d'un noyau de cellule adulte (les résultats concernant les transplantations de noyaux de cellules embryonnaires et fœtales ayant, eux, été reproduits plusieurs fois, ne sont pas contestés). L'article intitulé « Dolly confirmation » fait état d'un doute grandissant à l'endroit de ce résultat (Sgaramella V. & Zinder N.D., « Dolly confirmation », *Science*, 279, 635-636). Les scientifiques qui signent cet article remarquent deux choses : la première vient d'être mentionnée, elle a trait à l'absence de reproduction de l'expérience. Ils s'étonnent que près d'un an après la publication initiale, aucune reproduction de l'expérience n'ait encore été publiée. La seconde concerne l'expérience elle-même. Ils soulignent en particulier l'absence de preuve définitive

permettant d'affirmer que la brebis 6LL3 (Dolly) est bien un clone de cellule adulte. Pour comprendre cet argument, il faut revenir sur les conditions de l'expérience. Celle-ci a été menée à partir de cellules de glandes mammaires entretenues en culture. Or, ces cellules avaient été obtenues à partir d'une brebis gestante (qui contenait donc des cellules fœtales). Dans leur lettre de réponse à ces critiques, Campbell, Colman et Wilmut (les auteurs de l'article initial) expliquent que ces cellules avaient en fait été prélevées de longue date dans la perspective d'expériences étrangères à celles rapportées dans leur article, ce qui explique (mais ne supprime pas) cette circonstance malencontreuse. Sgaramella et Zinder font remarquer qu'il n'est pas impossible que quelques-unes de ces cellules (fœtales) aient été mises en culture lors du prélèvement. Certes, en tant qu'elles proviendraient d'un prélèvement effectué sur une glande mammaire, elles devaient être nettement minoritaires dans la culture de départ. Mais les conditions de culture pourraient avoir favorisé précisément ces cellules au détriment des cellules adultes (compte tenu, en particulier, des propriétés de croissance rapide des cellules fœtales). La culture cellulaire utilisée comme source de noyaux pour les expériences de transplantation, quoique provenant d'une biopsie de glande mammaire, pourrait ainsi contenir une proportion non négligeable de cellules fœtales. La preuve du contraire aurait pu être tirée d'un examen de l'identité génétique de la brebis Dolly comparée à la brebis donneuse, mais cette dernière est morte entre-temps de sorte que la comparaison ne peut être effectuée qu'à partir des cellules en culture elles-mêmes. Ces tests ont été effectués, mais Sgaramella et Zinder objectent que, pour les raisons déjà indiquées (contamination par des cellules fœtales), les cellules en culture ne constituent pas un matériel parfaitement probant pour ce genre de test. En outre, ils font remarquer que chez les animaux de ferme, hautement consanguins, les tests génétiques ne sont discriminants que s'ils font apparaître une différence (permettant alors d'affirmer que deux animaux n'ont pas la même origine), mais non lorsqu'ils font apparaître une similitude (car celle-ci peut être fortuite). L'ensemble de ces arguments tend à faire apparaître le résultat de l'équipe écossaise concernant la brebis 6LL3 comme un artefact : la brebis Dolly serait en fait issue d'un noyau de cellule fœtale, ce qui annulerait une part importante de la nouveauté annoncée par l'article de Wilmut *et al.* et singulièrement celle qui a donné lieu à la discussion publique sur laquelle nous aurons à revenir.

À cela Campbell, Colman et Wilmut répondent, dans le même numéro de la revue *Science*, en insistant sur la faible probabilité des hypothèses imaginées par leurs contradicteurs : il est extrêmement improbable, écrivent-ils, que dans la culture de cellule de glande mammaire conservée dans leur laboratoire une population de cellules fœtales (dont la présence est déjà hypothétique) se soit multipliée de telle sorte que ces dernières deviennent majoritaires dans la population

cellulaire. Ils jugent très improbable également que les tests génétiques ne suffisent pas à affirmer une différence d'origine. Et, à leur tour, ils remarquent qu'une année s'est écoulée depuis la publication initiale, mais pour mettre l'accent cette fois sur le fait que ce délai est court en regard du temps de gestation de ces animaux (5 mois).

Nous retranscrivons cette controverse afin de souligner le fait qu'aucun argument décisif ne peut être apporté avant qu'une reproduction de l'expérience, réalisée dans des conditions contrôlées, soit apportée. Celle-ci a été plusieurs fois annoncée, mais n'est pas disponible à ce jour.

Le débat dit éthique autour de ces questions

Ces réserves, qui ont trait à la teneur scientifique de résultats publiés, n'ont nullement empêché le développement rapide d'un débat public autour des applications imaginables (plausibles ou non) du clonage. Celles-ci étaient presque toujours placées dans la perspective d'un clonage humain.

Nous avons rappelé ce qui, dans les expériences publiées par Wilmut *et al.*, importait du point de vue de la biologie fondamentale : le fait de savoir si au cours de la différenciation cellulaire les noyaux subissent ou non des altérations irréversibles. Nous avons souligné l'intérêt de ces résultats du point de vue de leur application pratique : les manipulations génétiques héréditaires, jusqu'ici réalisables uniquement chez la souris, qu'elles permettent d'envisager chez d'autres mammifères. C'était dans les deux cas comme élément de réponse à une question scientifique ou pratique qu'était regardé le résultat. On va voir – et l'un des objectifs de cet article est de le montrer – que le point qui a été retenu dans les discussions publiques qui sont nées autour de ce sujet est différent. Ce changement de point de vue sur un même objet constitue le point où s'articulent la position scientifique et la position publique (politique) d'une question. On raisonne alors à peu près de la manière suivante : s'il est possible d'initier un développement complet à partir de cellules adultes de brebis, cela signifie qu'il est possible de réaliser la même opération chez l'homme. Il s'agirait alors d'un nouveau mode de reproduction s'affranchissant en particulier de la sexualité et reproduisant un organisme génétiquement identique à un organisme déjà connu. Tout ceci n'a pas manqué de frapper les imaginations et de les engager à produire des scénarios futuristes plus ou moins attractifs ou funestes avec un appareillage spéculatif (de concepts et de connaissances, de références et de doctrines) plus ou moins sophistiqué. Si la position scientifique du problème débouche elle-même sur la controverse que nous avons mentionnée, ici la question n'est presque plus uniquement que controverse.

Diverses instances consultatives (comités d'éthique) ont été sollicitées pour donner leur arbitrage. Elles n'ont pas prononcé d'avis favorable au clonage humain. Le Comité consultatif national d'éthique pour

les sciences de la vie et de la santé français, dans son rapport au président de la République du 22 avril 1997, écrit que le clonage humain « ne peut susciter qu'une condamnation éthique véhémement, catégorique et définitive. Une telle pratique, mettant en cause de manière générale l'autonomie et la dignité de la personne, constituerait une grave involution morale dans l'histoire de la civilisation. Aussi y a-t-il lieu de se demander s'il ne conviendrait pas de le qualifier juridiquement, en vue de son interdiction universelle ». Dans le même esprit, la « Déclaration universelle sur le génome humain et les droits de l'homme », adoptée en séance plénière par l'UNESCO le 11 novembre 1997, stipule, dans son article 11, que « des pratiques qui sont contraaires à la dignité humaine, telles que le clonage à des fins de reproduction d'êtres humains, ne doivent pas être permises ». Le Parlement européen dans une résolution du 12 mars 1997, déclare semblablement que « le clonage des êtres humains, que ce soit à des fins expérimentales (traitement de la stérilité, diagnostic avant implantation, transplantation de tissus) ou à toute autre fin, ne saurait, en aucune circonstance, être justifié ou toléré par aucune société humaine, quelle qu'elle soit, car il équivaut à une violation grave des droits fondamentaux de l'homme ». Le Conseil pour l'éthique auprès de la commission européenne, dans un avis rendu le 29 mai 1997, a pris également position sur la question : « Des considérations qui reposent sur l'instrumentalisation ou l'eugénisme rendent chacun de ces actes [ceux qui ont trait au clonage reproductif] inacceptable sur le plan éthique. » La commission consultative nationale américaine sur la bioéthique, dans un rapport remis en juin 1997 au président des États-Unis, a déclaré pour sa part : « Il est moralement inacceptable pour quiconque dans le secteur public comme privé, aussi bien dans la recherche que dans les applications médicales, de tenter de créer un enfant par clonage, selon la méthode du transfert de noyau de cellules somatiques. » L'Organisation mondiale de la santé, à la suite d'un vote organisé lors de la cinquantième assemblée mondiale de la santé a adopté une résolution affirmant que « l'utilisation du clonage des êtres humains n'est pas acceptable sur le plan éthique ». L'Académie nationale (française) de médecine a adopté le 5 juin 1997 la résolution selon laquelle le clonage « constituerait une atteinte à la dignité humaine, non plus considérée comme une fin mais comme un moyen, non comme une personne mais comme un objet manipulable, il s'opposerait par ailleurs à cette loi biologique fondamentale reposant sur la diversité qui fait la richesse évolutive de l'humanité ». Ce n'est en tout cas pas par la diversité des opinions exprimées que se distinguent ces avis émanant de différentes instances consultatives. L'avis de l'Académie de médecine qui veut d'être rapporté présente d'ailleurs l'intérêt de mentionner d'une manière relativement explicite les deux arguments principaux qui motivent ces positions : la distinction de la personne considérée comme fin et non comme moyen d'une part, et le respect de la diversité d'autre part.

Dans les commentaires consacrés à ces prises de position, en effet, on évoque fréquemment une éthique dérivée de la morale kantienne. On cite en particulier la distinction qui selon Kant fonde le principe de dignité de la personne : le fait que celle-ci ne doive jamais être seulement traitée comme un moyen, mais toujours aussi comme une fin en soi. La raison pour laquelle on invoque Kant en cette occasion n'est cependant pas indiquée. La cohérence avec d'autres aspects de la doctrine de Kant n'est pas non plus examinée.

La notion d'« altérité » est elle aussi très souvent mobilisée. Tantôt il s'agit d'insister sur la diversité génétique qu'assure la sexualité (dont on laisse entendre qu'elle serait mise en péril par les techniques de clonage reproductif qui permettraient de s'en affranchir) ; tantôt il s'agit de méditer sur le type de relation qu'aurait un éventuel clone avec l'individu d'où provient la cellule dont il serait un clone (on remarque à ce propos que cette relation serait semblable à celle qu'ont entre eux deux jumeaux, avec cette différence que ceux-ci sont, pour ainsi dire, synchronisés – ils naissent à un court intervalle de temps l'un de l'autre –, le clone serait une sorte de jumeau désynchronisé) ; tantôt enfin il s'agit de s'interroger sur le degré de ressemblance qu'entreprendraient entre eux les deux jumeaux désynchronisés (on remarque en particulier que selon l'ordre biologique, si deux jumeaux ont entre eux une ressemblance frappante, ils diffèrent néanmoins, en particulier par leur personnalité – ceci s'interprète pour partie comme un effet de la part épigénétique du développement du cortex cérébral et pour partie comme un effet de l'histoire singulière de chacun des jumeaux – : on cherche à souligner par là le caractère illusoire que comporterait l'idée d'une reproduction à l'identique d'êtres humains). Ces arguments ont été mobilisés pour motiver les positions de refus évoquées plus haut (parfois d'une manière paradoxale, ainsi que le remarque David Shapiro, *Nature*, 388, p. 511) puisque « le déterminisme génétique, si justement combattu par ailleurs » est bien souvent pré-supposé par ceux qui craignent qu'on cherche à utiliser le clonage comme moyen de reproduction à l'identique). Ils sont largement développés par Axel Kahn (Kahn A. & Papillon F., *Copies conformes*).

Les comités d'éthique, dans leurs avis, n'ont généralement pas distingué une autre application du clonage : la possibilité qu'il pourrait offrir de produire des organes en vue d'une greffe. Cet usage a le plus souvent été confondu dans la même réprobation que les hypothétiques manipulations orientées vers la reproduction d'individus (c'est alors précisément le fait qu'on n'envisage pas de laisser se développer l'individu intégralement qui fait surgir un nouveau problème : « Ces êtres seraient-ils voués à être des sacs d'organes ? » demande-t-on, avant de condamner un tel usage). Même lorsque l'argument est examiné en détail (par exemple, par Axel Kahn, *op. cit.*), il est finalement rejeté au nom de la morale kantienne qui prescrit de ne pas traiter un embryon comme un moyen.

Une position plus nuancée aurait permis de considérer avec davantage d'attention les problèmes posés par les greffes d'organes.

Les personnes en attente de greffe sont fréquemment confrontées à une pénurie d'organes qui peut rendre leur situation très pénible et même dangereuse. Du côté du donneur potentiel les choses ne sont pas moins incommodes. La question de l'autorisation de prélèvement se pose (d'ailleurs d'une manière différente selon les pays). En France, et pour les adultes, le principe du consentement présumé prévaut (loi Caillaud, 1976). La loi sur la bioéthique de 1994 a créé un registre national des refus de prélèvement. Des difficultés particulières se présentent dans le cas où la question du prélèvement doit être tranchée par des proches.

Enfin, même quand ces difficultés ont été surmontées, des problèmes d'immunocompatibilité peuvent encore surgir de manière inattendue. Le clonage, en tant qu'il pourrait permettre la production d'organes (et non plus d'organismes), pourrait constituer une réponse à l'ensemble de ces problèmes. C'est ainsi que Harold Varmus, directeur de l'Institut national de la santé américain (National Institute of Health, NIH), s'est inquiété des risques d'une législation anticipée qui pourrait ralentir ou arrêter les recherches dans ce domaine (cité dans *Nature*, 386, p. 8).

Face à ce type de critiques, les comités d'éthique font valoir que leur rôle est simplement consultatif. Mais on fait remarquer que dans les faits, ceux qui prennent connaissance des conclusions du comité et s'appuient éventuellement sur elles pour légiférer ne sont, le plus souvent, pas en mesure de les discuter. Serait-ce, à côté de ses formes traditionnelles (exécutif, législatif), une nouvelle forme de pouvoir qui serait en train d'apparaître, un pouvoir « consultatif » ? C'est en tout cas ce que paraît penser l'éditorialiste de la revue scientifique *Nature* lorsqu'il écrit : « Le poids politique accordé à de tels comités [d'éthique] nécessite un réexamen à la fois de leur action et de leur place dans le processus démocratique de prise de décision. De tels comités ne sont finalement constitués que d'un petit nombre d'individus qui n'ont pas été élus » (*Nature*, 387, p. 321).

Mais de plus virulentes attaques ont aussi été formulées. Ainsi, par exemple, le biologiste Lewis Wolpert, après avoir affirmé que les « éthiciens » s'étaient investis dans ces débats à seule fin de se rendre célèbres, qualifie-t-il l'ensemble de leurs réflexions de « sentimental bullshit ». Peut-être veut-il signifier par là que pour garder au sentiment toute sa grandeur, il convient de ne pas le considérer seulement sous l'espèce du « bon sentiment », derrière lequel se réfugie bien souvent l'hypocrisie. C'est en tout cas l'idée que paraît avoir cet autre scientifique lorsqu'il déclare : « Je trouve surprenant que des personnes expriment des craintes au sujet d'atteintes possibles à la dignité humaine en relation avec les progrès de la biologie, lorsqu'ils peuvent voir tout autour d'eux un nombre considérable d'insultes à cette même dignité

sans qu'il semble leur venir seulement à l'idée de les dénoncer » (cité dans *Nature*, 386, p. 9).

La teneur critique de ces propos n'a pas échappé à ceux dont la réflexion avait nourri les avis des comités d'éthique. Ils y ont vu l'expression d'une tendance qui leur paraissait pouvoir être qualifiée philosophiquement par le terme de « pragmatisme ». Comme parmi leurs contradicteurs, un nombre important de ceux qui s'étaient exprimés publiquement se trouvaient être anglo-saxons, ils ont estimé avoir affaire à une manifestation du « pragmatisme anglosaxon ». C'est peut-être négliger (ou préférer ne pas voir) une part importante de ce que ces critiques cherchaient à exprimer : une dérision face au sérieux et à la solennité avec lesquels sont traitées ces questions, étant donné le caractère hypothétique de leur objet.

Qu'elles soient ainsi l'occasion d'intenses controverses, c'est peut-être là un signe supplémentaire indiquant que ces questions relèvent davantage de la politique que de l'éthique. Le domaine dit « bioéthique » serait peut-être bien mieux nommé « biopolitique ». Et de fait, il se situe à l'articulation entre le domaine scientifique et le domaine politique et a vocation à déboucher sur des lois édictant des règles du permis et de l'interdit. Ce qu'une société interdit ou autorise est directement en rapport avec les espoirs ou les craintes que peuvent susciter les pratiques qu'elle tente de réglementer. Et c'est pourquoi Steve Jones, professeur de génétique à Londres, a sans doute raison de remarquer que dans les questions relatives au clonage, « les politiciens et les médias ont montré leur incapacité à distinguer ce qui est plausible de ce qui est impossible » (cité dans *Nature*, 386, p. 8). Mais seraient-ils encore des politiciens ceux qui sauraient établir une telle distinction ?

► ANGELIKA E. et al., « Human factor IX transgenic sheep produced by transfer of nuclei from transfected fetal fibroblast », *Science*, 1997, 278, 2130-2133. — ATLAN H., « Transfert de noyau et clonage : aspects biologiques et éthiques », *L'actualité humaine*, n° 8, Paris, diff. PUF, déc. 1997. — BRING R. & KING J.J., « Transplantation of living cell nuclei from blastula cells into enucleated frog's eggs », *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 1952, 38, p. 455-463. — GROS F., *Les secrets du gène*, Paris, Odile Jacob, 1986. — GURDON J.B., « Adult frogs derived from the nuclei of somatic cells », *Developmental Biology*, 1962, 4, p. 256-273. — GURDON J.B. & VEHLING V., « "Fertile" intestine nuclei », *Nature*, 1966, 210, p. 1240-1241. — GURDON J.B., LASKEY R.A. & REEVES O.R., « The developmental capacity of nuclei transplanted from keratinized skin cells of adult frogs », *Journal of embryology and experimental morphology*, 1975, 3, p. 43-112. — ILLMENSEE K., HOPPE P.C., « Nuclear transplantation in *Mus musculus* : developmental potential of nuclei from preimplantation embryos », *Cell*, 1981, 23, p. 9-18. — KAHN A. & PAPILLON F., *Copies conformes*, Paris, Nil Éditions, 1998. — WILMUT I., SCHNIEKE A.E., MCWHIR J., KIND A.J. & CAMPBELL, « Viable offspring derived from fetal and adult mammalian cells », *Nature*, 385, 1997, p. 810-813.

Pascal NOUVEL

→ Bioéthique ; Biotechnologies ; Embryogenèse ; Gène ; Génétique.

COGNITION ET SCIENCES COGNITIVES

Le présent article est un survol général de la notion de cognition telle qu'elle a été élaborée dans le cadre des sciences cognitives contemporaines, qui ne sont âgées que d'un demi-siècle. Il ne s'agit pas encore d'une science à orientation unifiée ayant atteint sa pleine maturité, bien qu'elle ait attiré (et continue d'attirer aujourd'hui) un grand nombre de chercheurs. Ainsi, à l'heure actuelle, l'avenir des sciences cognitives est loin d'être clair : l'impact des résultats atteints jusqu'à présent a, certes, été considérable, mais tout progrès dans ce domaine dépend encore d'hypothèses conceptuelles osées. L'association de disciplines que je conçois ici comme formant les sciences cognitives aujourd'hui comprend principalement : les neurosciences, l'intelligence artificielle, la psychologie cognitive, la linguistique, l'anthropologie et la philosophie de l'esprit. L'objectif principal de cet article étant de fournir une radioscopie de la situation actuelle des sciences cognitives, il semble préférable de commencer par souligner le fait que les sciences cognitives sont un ensemble composite de disciplines, de théories et de méthodes partiellement compatibles, et non pas un seul champ monolithique. En outre, comme toute science, les sciences cognitives ont certains pôles sociaux et intellectuels dominants ; l'influence des travaux effectués en Amérique du Nord a été primordiale.

Cet exposé se déroulera en quatre étapes qui correspondent approximativement à des périodes historiques. Étape 1 : Les années de genèse (1943-1953). Étape 2 : Le cognitivisme : le paradigme du calcul numérique. Étape 3 : Le connexionnisme : les alternatives à la manipulation de symboles. Étape 4 : L'incarnation : des alternatives aux représentations.

Les années de genèse : le mouvement cybernétique

Les racines des sciences cognitives remontent à la décennie de 1943-1953. Pratiquement tous les sujets ardemment débattus aujourd'hui avaient déjà été introduits dans ces années de formation, ce qui montre à quel point ils sont profonds et épineux. Les « pères fondateurs » des sciences cognitives avaient parfaitement conscience que les questions qu'ils posaient relevaient d'une science nouvelle ; aussi la baptisèrent-ils d'un nom nouveau : la cybernétique. Ce nom n'est plus en usage actuellement, et peu de chercheurs en cognition seraient même prêts aujourd'hui à reconnaître ce lien de parenté. Ce n'est pas une simple curiosité : cela montre qu'avant de s'affirmer en tant que science dans sa phase cognitiviste bien délimitée (voir l'Étape 2 de ce texte), la future science cognitive devait se servir de ses racines, plus complexes et plus floues mais également plus riches (J.P. Dupuy, *Aux origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1995).

Outre son influence (souvent sous-jacente) à long terme, la phase cybernétique des sciences cognitives produisit un éventail extraordinaire de résultats concrets. En voici quelques-uns : l'application de la

logique mathématique dans la compréhension du fonctionnement du système nerveux ; l'invention des machines à traitement d'information (telles que les ordinateurs numériques), qui allaient servir de base à l'intelligence artificielle ; la création de la théorie systématique, métadiscipline dont l'empreinte a marqué de nombreuses branches de recherche telles que le génie civil (l'analyse systémique, les théories du contrôle), la biologie (la physiologie régulatoire, l'écologie), les sciences sociales (la thérapie familiale, l'anthropologie des structures, la gestion, l'urbanisme), l'économie (les théories du jeu) ; l'utilisation des théories de l'information en tant que théories statistiques des signaux et des voies de communication ; enfin, les premiers exemples de systèmes auto-organisés complexes.

La liste est impressionnante : nous avons tendance aujourd'hui à considérer beaucoup de ces notions comme une partie intégrante de notre vie ; pourtant, aucune d'elles n'existait avant ces dix années de formation des sciences cognitives, et elles ont toutes été le résultat d'échanges intensifs entre des spécialistes de domaines extrêmement divers. Ce fut un effort de travail interdisciplinaire exceptionnellement réussi. Mais l'intention déclarée du mouvement cybernétique était de créer une science de la pensée. Aux yeux de ses initiateurs, les phénomènes mentaux avaient été laissés bien trop longtemps aux mains des psychologues et des philosophes, et ils ressentaient un devoir d'exprimer les processus qui sous-tendaient les phénomènes mentaux par des mécanismes explicites et des formalismes mathématiques. L'une des plus belles illustrations de cette manière de penser fut l'article de W.S. McCulloch et W. Pitts, qui fit école (« A logical calculus immanent in nervous activity », *Bull. Math. Biophysics*, vol. 5, 1943). Cet article eut plusieurs pas de géant : tout d'abord, la proposition de la logique comme la seule discipline adéquate pour comprendre le cerveau et l'activité mentale ; deuxièmement, la vision du cerveau comme un dispositif qui incorpore des principes de logique dans les éléments qui le composent, à savoir les neurones. Chaque neurone est perçu comme un dispositif-seuil, soit actif, soit inactif. Ces neurones simples peuvent ensuite être reliés l'un à l'autre, leurs interconnexions fonctionnant à la manière d'opérations logiques ; ainsi, le cerveau tout entier peut être considéré comme une machine à faire des déductions.

Ces idées furent déterminantes pour l'invention des ordinateurs numériques (A. Hodges, *Alan Turing : The Enigma of Intelligence*, New York, Touchstone, 1984). Cette percée technologique importante jetait également les bases de l'approche dominante dans l'étude scientifique de la pensée qui allait se cristalliser, dans les dix années suivantes, autour du paradigme cognitiviste. Cette décennie fertile connut évidemment bien d'autres innovations. On posa notamment la question de savoir si la logique, qui négligeait les propriétés distributives du cerveau, pouvait réellement suffire à comprendre celui-ci. Des théories et modèles alternatifs furent avancés, laissés pour la plupart en sommeil jusqu'à ce qu'ils soient ranimés, dans les années

1970, pour former une alternative importante aux sciences cognitives (Étape 3). En 1953, par contraste avec leur vitalité et leur harmonie initiale, les principaux acteurs de la phase cybernétique s'étaient distancés les uns des autres et beaucoup d'entre eux moururent peu après. L'idée de la pensée comme processus de calcul logique allait être poursuivie.

Le cognitivisme : le paradigme du calcul numérique

Les cognitivistes entrent en scène. — Ce fut l'année 1956 qui vit naître la première phase des sciences cognitives en tant que discipline visible (H. Gardner, *The Mind's New Science : A History of the Cognitive Revolution*, New York, Basic Books, 1985). L'intuition de départ est que la cognition est avant tout une question d'intelligence, et ceci ressemble à tel point aux caractéristiques essentielles d'un ordinateur que la cognition peut être définie comme un ensemble de calculs portant sur des représentations symboliques. Il est évident que ce courant de pensée n'aurait pu naître sans les éléments de base introduits lors de la décennie précédente ; mais la différence essentielle ici est que parmi les nombreuses idées originales et incertaines qui avaient été émises alors, l'une d'elles se trouve désormais promue au rang d'hypothèse à part entière. Le « computationalisme » ou cognitivisme (J. Haugland éd., *Mind Design*, Cambridge, MIT Press, 1981) sont parmi les appellations les plus commodes pour désigner ce courant de pensée, large mais bien délimité, qui a servi de moteur à de nombreuses évolutions scientifiques et technologiques depuis 1956 dans tous les domaines des sciences cognitives.

Le programme de recherche cognitiviste peut se résumer ainsi : la cognition est un « traitement d'information », c'est-à-dire une manipulation de symboles selon un ensemble de règles. Elle peut être effectuée par n'importe quel dispositif capable d'entretenir et de manipuler des éléments physiques discrets appelés symboles. Le système n'appréhende que la forme des symboles (c'est-à-dire leurs attributs physiques), et non leur signification, mais c'est la signification des symboles qui leur donne leur raison d'être. Ainsi, le critère d'adéquation est que les symboles doivent représenter de manière juste au moins un aspect du monde réel, et que le traitement de l'information doit déboucher sur une bonne solution au problème posé au système. Ce programme de recherche est devenu classique et, aujourd'hui encore, il est souvent assimilé à la science cognitive en tant que telle, bien que ceci soit en train de changer rapidement.

L'œuvre et les ravages du cognitivisme. — Le domaine où les manifestations du cognitivisme sont les plus visibles est sans doute celui de l'intelligence artificielle, qui est une construction littérale de l'hypothèse cognitiviste. D'année en année, de nombreuses avancées théoriques et applications technologiques intéressantes ont été réalisées dans cette branche, telles que les systèmes experts et le traitement d'images. La

branche complémentaire de l'intelligence artificielle est l'étude de systèmes cognitifs biologiques, et tout spécialement de l'être humain. Ici aussi, les représentations de type computationaliste ont été pendant longtemps les principaux outils d'explication. Les représentations mentales sont considérées comme les manifestations d'un système formel, et l'activité de la pensée est ce qui donne à ces représentations leur couleur comportementale : les croyances, les désirs, les projets, etc. Nous trouvons ici, contrairement à l'intelligence artificielle, un souci de comprendre les systèmes cognitifs naturels tels qu'ils sont réellement, et l'on suppose au départ que leurs représentations cognitives sont faites à propos de quelque chose pour le système : elles sont intentionnelles (J. Searle, *Intentionality*, New York, Cambridge Univ. Press, 1983). Par exemple, lorsqu'on présente à des sujets des figures géométriques et qu'on leur demande de les faire pivoter dans leur « œil mental », ils réagissent systématiquement en disant que la difficulté de la tâche dépend du nombre de degrés de liberté à l'intérieur duquel il fallait faire pivoter la figure. Ainsi, tout se passe comme si nous étions dotés d'un espace mental dans lequel nous pourrions faire pivoter des figures, comme sur un écran d'ordinateur. Notre « œil interne » est généré de façon conjointe par une interaction entre des opérations de type « langage » et des opérations de type « image » (S. Kosslyn, *Psychol. Rev.*, 88 : 46-66, 1981 ; également *Beh. Brain Sci.*, 2 : 535-81, 1979). L'étude des images est un exemple idéal de la manière dont fonctionne l'approche cognitiviste dans l'analyse des phénomènes mentaux.

Le cognitivisme a également exercé une influence importante sur la formation des idées actuelles concernant le cerveau. D'année en année, la quasi-totalité de la neurobiologie (avec son immense cortège de preuves empiriques) est devenue imprégnée de la perspective du traitement de l'information. Dans la plupart des cas, les origines et les postulats de départ de cette perspective ne sont pas même discutés. Le meilleur exemple de cette approche est sans doute l'ensemble des célèbres études sur le cortex visuel, où il est possible de détecter des réactions électriques provenant de neurones lorsqu'on présente une image visuelle à l'animal. On a très tôt conclu qu'il était possible de classer ces neurones corticaux comme des détecteurs de « traits caractéristiques » qui réagissent à certains attributs de l'objet traité : son orientation, son contraste, sa vitesse, sa couleur, etc. (D. Hubel & T. Wiesel, *J. Physiol.*, 160 : 106, 1962). Étant conformes à l'hypothèse cognitiviste ces résultats furent interprétés comme apportant une consistance biologique à l'idée selon laquelle le cerveau recueille des informations visuelles à partir de la rétine et par l'intermédiaire des neurones du cortex qui réagissent à tel ou tel trait, et selon laquelle l'information est ensuite transmise vers l'intérieur du cerveau pour passer aux étapes ultérieures du traitement (catégorisation conceptuelle, associations mnémoniques, et enfin, action).

Le connexionnisme : les alternatives à la manipulation de symboles

Les prémisses des idées auto-organisationnelles. – Des alternatives à la domination écrasante de la logique avaient déjà été proposées et largement débattues au cours de la première décennie. Lors des conférences de Macy, par exemple, on avait fait valoir que dans un cerveau réel il n'existait, de fait, aucune règle, ni de logiciel central, ni de stockage de l'information dans des boîtes aux lettres bien précises. Le cerveau semble plutôt fonctionner d'une manière distribuée, grâce à des agglomérats d'interconnexions, de sorte que le nombre et la structure de ces connexions (connectivité) changent avec l'expérience. Pour résumer, le cerveau présente une capacité d'auto-organisation que l'on ne trouve nulle part en logique. En 1958, F. Rosenblatt inventa le « Perceptron », un appareil simple possédant une certaine capacité de reconnaissance fondée exclusivement sur les changements de connectivité parmi des composants de type neuronal (*Principles of Neurodynamics : Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms*, Spartan Book, 1962). Mais il fallut attendre la fin des années 1970 pour assister à une véritable explosion de ces idées, ramenées à la vie après 30 ans de prédominance de l'orthodoxie cognitiviste. Sans aucun doute, l'un des facteurs qui contribuèrent à ce renouveau d'intérêt fut la redécouverte, à la même époque, des idées sur l'auto-organisation ou la complexité dans le domaine des mathématiques non linéaires.

La motivation pour une nouvelle lecture de l'auto-organisation provient de deux défauts du cognitivisme, largement reconnus. Premièrement, le traitement de l'information symbolique repose sur des règles séquentielles, appliquées l'une après l'autre ; et si la recherche pour des mécanismes parallèles a jusqu'à présent rencontré peu de succès, c'est parce que la philosophie informatique tout entière va précisément à son encontre. La seconde limite importante du cognitivisme est que le traitement des symboles est localisé : la perte d'une partie, quelle qu'elle soit, des symboles ou des règles du système entraîne une défaillance grave. Au contraire, il est très important d'avoir une opération distribuée afin d'assurer une équipotentialité et une immunité aux mutilations au moins relatives.

Qu'est-ce que l'émergence ? – Tout ceci semble suggérer qu'au lieu de se concentrer sur des symboles comme point de départ, on pourrait commencer par des composantes simples (non cognitives) qui seraient connectées les unes aux autres par des liens denses. Dans cette approche, chaque composante fonctionne uniquement dans son environnement local, mais du fait que le système entier possède les caractéristiques d'un réseau, il se produit une coopération globale entre les composantes qui émerge spontanément lorsque les états de toutes les composantes qui font partie du réseau atteignent un état mutuellement satisfaisant,

sans que l'opération entière ait besoin d'être guidée par un dispositif de traitement central (P. Dumouchel & J.P. Dupuy éd., *L'auto-organisation : De la physique au politique*, Paris, Le Seuil, 1983). Selon les préférences individuelles, on parle de propriétés émergentes ou globales, de dynamique de réseau, ou même parfois de synergetique. Il ne s'agit pas des propriétés d'une composante individuelle, mais de celles du système tout entier, même si chaque composante contribue à son émergence et à ses caractéristiques.

Des travaux récents ont mis au jour des faits détaillés qui démontrent le rôle fondamental des propriétés d'émergence pour le fonctionnement du cerveau. Ceci n'est guère surprenant lorsqu'on observe de près l'anatomie cérébrale. Par exemple, s'il est vrai que les neurones du cortex visuel ont des réactions distinctes à tel ou tel « trait » des stimuli visuels, comme on l'a décrit précédemment, cela reste vrai chez un animal anesthésié dont l'environnement (interne et externe) se trouve extrêmement simplifié. Il a également été démontré que lorsqu'on autorise un environnement plus normal et que l'animal est observé dans un état éveillé et actif, les réactions neuronales stéréotypées que nous avons décrites plus haut deviennent extrêmement sensibles au contexte, y compris celles de neurones situés loin de leurs champs réceptifs (J. Allman, F. Miezen & E. McGuiness, *Ann. Rev. Neurosci.*, 8 : 407-430, 1985). Ainsi, il est devenu de plus en plus nécessaire d'étudier les neurones en tant que membres d'ensembles plus larges qui apparaissent et disparaissent constamment du fait de leurs interactions coopératives, et à l'intérieur desquels chaque neurone présente des taux de réactivité à la stimulation visuelle multiples et variables, selon les différents contextes. Même aux extrémités les plus éloignées du système visuel, les influences reçues de l'œil par le cerveau rencontrent d'autres activités qui proviennent du cortex. C'est de la rencontre entre ces deux ensembles d'activités neuronales que naît une nouvelle configuration cohérente, qui elle-même dépend de la correspondance, ou la non-correspondance, entre l'activité sensorielle et la configuration « interne » au niveau du cortex. De manière générale, chaque neurone individuel participe à d'innombrables mosaïques globales de ce type et n'a que peu d'importance pris isolément (W. Freeman, *Mass Action in the Nervous System*, New York, Academic Press, 1975).

Le cerveau lui-même a été la source principale de nombreuses métaphores et idées dans d'autres champs de recherche en sciences cognitives adhérant à cette direction alternative. Au lieu de descriptions symboliques abstraites, on choisit comme point de départ une armada entière de composantes simples qui, lorsqu'elles sont connectées de manière adéquate, peuvent avoir des propriétés d'ensemble intéressantes. Ces propriétés d'ensemble sont précisément celles qui incarnent, ou expriment, les capacités cognitives que l'on explore. Par exemple, parmi les nombreux schémas utilisés, des changements peuvent intervenir dans la connectivité en fonction du degré d'activité

coordonnée entre les composantes simples (c'est ce que l'on appelle parfois la règle de Hebb) : si elles ont tendance à être actives ensemble, leur connexion est renforcée ; dans le cas contraire, elle s'affaiblit. L'action réelle se produisant donc au niveau des connexions, on a proposé le nom de connexionnisme pour désigner ce courant de recherche (D. Rumelhart & J. McClelland éd., *Parallel Distributed Processing : Studies on the Microstructure of Cognition*, Cambridge, MIT Press, 1986 ; R. Port & T. van Gelder éd., *Mind as Motion : Explorations in the Dynamics of Cognition*, Cambridge, MIT Press, 1996). Par exemple, « NetTalk » est un appareil connexionniste de type graphique-phonème qui fonctionne comme suit : dans sa phase d'apprentissage, on lui présente quelques pages de texte en anglais ; en conséquence, « Net-Talk » est capable de lire à voix haute un texte nouveau dans un anglais que beaucoup d'auditeurs considèrent insuffisant mais compréhensible. Les modèles connexionnistes, d'une élégance remarquable, sont très utiles pour un grand nombre de capacités cognitives de base telles que la reconnaissance rapide, la mémoire associative et la généralisation catégorielle.

Ce courant de pensée alternatif (connexionniste, d'émergence, auto-organisationnel, associatif, de dynamique de réseau) est jeune et composite. La plupart de ceux qui se considéreraient comme en faisant partie ont des positions très divergentes sur la définition et l'avenir des sciences cognitives. Tout en gardant cette réserve à l'esprit, on peut, dans ses grandes lignes, formuler l'approche générale comme suit : la cognition est l'émergence, dans un réseau de composantes simples, d'états globaux par le fait de règles locales sur le fonctionnement individuel des éléments et de règles concernant les changements dans la manière dont ces éléments sont connectés entre eux. Lorsqu'on peut constater que les propriétés émergentes (et la structure qui en résulte) correspondent à telle ou telle capacité cognitive ou apportent une bonne solution à un problème donné, on sait que cette explication est valable.

Les symboles quittent la scène. – L'un des aspects les plus intéressants de cette approche alternative aux sciences cognitives est que les symboles, pris au sens traditionnel, ne jouent ici qu'un rôle mineur. C'est là une déviation radicale par rapport à l'un des principes fondamentaux du cognitivisme, selon lequel la structure physique des symboles, leur forme, est séparée pour toujours de ce qu'ils représentent, c'est-à-dire de leur signification. Cette séparation entre forme et signification avait été le coup de maître d'où était née l'approche computationnelle ; mais elle implique aussi une faiblesse dès que l'on tente de comprendre les phénomènes de la cognition à un niveau plus profond. En effet, comment les symboles acquièrent-ils leur signification ? Dans des situations où l'univers d'objets possibles à représenter est restreint et nettement délimité (par exemple, lorsqu'on mène une expérience avec une série de stimuli prédéfinis), la manière dont s'effectue l'attribution de significations est claire. Mais dès que

l'on supprime ces restrictions, il ne reste du symbole que la forme : toute signification devient fantôme. Dans l'approche connexionniste, la signification est liée à l'action tout entière (par exemple, dans une séance de reconnaissance ou d'apprentissage). Par conséquent, la signification est liée à l'état global du système et n'est localisée dans aucun symbole particulier. La distinction forme/signification au niveau symbolique disparaît, et elle réapparaît sous un jour nouveau : c'est l'observateur qui fournit la correspondance entre l'état global du système et le monde que celui-ci est censé gérer. C'est donc là une manière radicalement différente de travailler sur les représentations.

À ce stade, la question qui paraît s'imposer est celle de la relation entre l'approche symbolique et l'approche d'émergence lorsqu'on aborde l'origine des propriétés cognitives. La réponse la plus évidente est que ces deux approches devraient soit être utilisées de manière complémentaire, l'une pour aller du haut vers le bas et l'autre de bas en haut, soit, de manière plus pragmatique, être associées dans une manière de pensée mixte, soit, enfin, être appliquées à différentes étapes. Une manière typique d'appliquer cette dernière stratégie est de décrire les premiers stades de la vision en termes connexionnistes, mettons, jusqu'au niveau du cortex visuel primaire, tout en sachant qu'à partir du cortex inférotemporel, la description devra s'appuyer sur des programmes symboliques. Mais le statut conceptuel d'une telle synthèse, qui fait actuellement l'objet de recherches actives, est encore loin d'être clair. Une telle stratégie est, à l'évidence, inadmissible d'un point de vue cognitiviste strict ou orthodoxe (J. Fodor & S. Plossyn, « Connexionism and cognitive architecture : A critical review », *Cognition*, 28 : 3-71, 1988).

L'incarnation : des alternatives aux représentations

Les problèmes posés par la théorie des représentations. — La plupart des analyses de l'état des sciences cognitives aujourd'hui s'arrêtent aux deux approches discutées ci-dessus. Pourtant, la nécessité d'élargir encore davantage l'horizon théorique de la cognition devient de plus en plus évidente. L'insatisfaction qui est au cœur de ce que nous appelons ici l'alternative de l'incarnation vient tout simplement de l'absence totale de bon sens dans la manière de penser la cognition jusqu'à ce jour. Dans le cognitivisme (de par ses fondements mêmes) comme dans le connexionnisme d'aujourd'hui, le critère de la cognition est encore et toujours le degré d'adéquation entre une représentation et un monde extérieur préalablement donné — il s'agit habituellement d'une situation comportant un problème à résoudre. Pourtant, la plus grande capacité de toute cognition vivante est, dans des limites très larges, de poser les problèmes pertinents qui doivent être résolus à chaque instant de notre vie. Loin d'être donnés au préalable, ils sont accomplis ou amenés à exister à partir d'un arrière-plan, et ce qui est validé comme pertinent est ce que notre bon sens sanctionne

comme tel, toujours de façon contextuelle. En d'autres termes, ceci est une critique de l'emploi de la notion de représentation prise dans son sens fort, c'est-à-dire de l'affirmation d'une correspondance de type sémantique entre le monde et les états internes d'un système cognitif. Si le monde dans lequel nous vivons est amené à exister plutôt que donné d'avance, le rôle des liens de type représentationnel devient purement accessoire. On ne devrait pas sous-estimer la profondeur des postulats auxquels nous touchons ici, car notre tradition rationaliste entière a toujours été en faveur d'une manière de penser la connaissance comme un miroir de la nature. Cette approche alternative aux sciences cognitives est aujourd'hui connue sous les noms de cognition incarnée ou située (angl. : *embodied or situated cognition*), ou d'*enaction* (angl., *to enact*, faire émerger) (F. Varela, E. Thompson & E. Rosch, *The Embodied Mind*, Cambridge, MIT Press, 1993; E. Thelen & L. Smith, *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*, Cambridge, MIT Press, 1994; A. Clark, *Being There : Putting brain, body and world together again*, Cambridge, MIT Press, 1997).

Depuis toujours, les sciences cognitives ont postulé que le monde se divise en zones d'éléments et de tâches discrets auxquels le système cognitif s'adresse, agissant à l'intérieur d'un « domaine » de problèmes donné : la vision, le langage, le mouvement. Mais s'il est relativement aisé de définir tous les états possibles dans le « domaine » du jeu d'échecs, il s'est révélé beaucoup moins efficace de transposer cette approche, par exemple, au « domaine » des robots mobiles. Bien sûr, on peut ici aussi isoler certains éléments discrets (tels que les structures d'acier, les roues, les fenêtres dans le montage d'une automobile). Mais il est également clair que si le monde du jeu d'échecs s'arrête net à un certain point, ce n'est pas le cas pour le monde du mouvement parmi des objets. Nous devons sans cesse faire appel à notre bon sens pour configurer notre monde d'objets. En fait, ce que le bon sens a d'intéressant est qu'il ne se laisse d'aucune manière envelopper dans la connaissance : c'est plutôt un « outil sous la main » ou un « savoir-faire » fondé sur une expérience vécue et sur une vaste quantité de situations qui entraînent une histoire incorporée. Ainsi, le rêve cognitiviste, au début des années 1960, de découvrir une solution-miracle à tous les problèmes a dû être ramené à des domaines de connaissance locaux avec des problèmes à résoudre clairement posés. De la même manière, la stratégie connexionniste appliquée habituellement s'appuie sur une restriction de l'espace des éléments susceptibles d'exercer une attraction, à l'aide de postulats sur les caractéristiques connues du monde que l'on incorpore comme contraintes supplémentaires pour une régularisation (T. Poggio, V. Torre & C. Koch, *Nature*, 317 : 314-319, 1985). Dans un cas comme dans l'autre, la question du bon sens toujours présent à l'arrière-plan, ambiguïté impossible à gérer, est laissée aux frontières de l'enquête, dans l'espoir qu'une explication lui sera apportée en temps voulu.

Pour toute une nouvelle école en intelligence artificielle et en robotique, les représentations d'un monde préalablement donné sont, au contraire, un obstacle (Ph. Agre & S. Rosenschein éd., « Computational research on interaction and agency », *Artificial Intelligence*, vol. 72, n° 1-2, 1995).

Les problèmes soulevés par l'enaction font écho, de toute évidence, à la phénoménologie d'E. Husserl et de M. Merleau-Ponty (S. Gallagher, « Phenomenology and cognitive science », *J. Consc. Studies*, 4 : 195-124, 1997). Selon cette perspective, connaître (ou savoir) c'est exister dans un monde qui est inséparable de notre corps, de notre langage et de notre histoire sociale. C'est un processus constant d'interprétation qui ne peut être isolé de manière adéquate comme une série de règles et de postulats, puisqu'il dépend de nos actions et de notre histoire ; c'est une manière de comprendre acquise par imitation et par le fait d'adhérer à une manière de comprendre qui existe déjà. En outre, nous ne pouvons nous placer hors du monde dans lequel nous nous trouvons pour observer à quel point son contenu correspond ou non aux représentations qui en sont faites : nous nous trouvons toujours plongés dans ce contenu. Postuler l'activité mentale comme un ensemble de règles, c'est mettre entre parenthèses le pivot central dont dépend le caractère vivant de la cognition. Cela n'est réalisable qu'à l'intérieur d'un contexte extrêmement limité, dans un état généralisé de *ceteris paribus*, où presque tout demeure constant. Le contexte et le bon sens ne sont pas des artéfacts résiduels que l'on peut progressivement éliminer en découvrant des règles plus élaborées. Ils sont en fait l'essence même de la cognition créative.

Pour parler de manière plus positive, l'approche de l'incorporation ou de l'accomplissement comporte deux aspects complémentaires : 1) d'une part, le couplage continu de l'agent cognitif, un couplage permanent qui s'effectue par le biais fondamental des activités sensorimotrices ; 2) de l'autre, les activités autonomes de l'agent dont l'identité est élaborée à partir de configurations émergentes, endogènes (ou de mosaïques auto-organisées) d'activité neuronale. L'enaction implique que le couplage sensorimoteur module (mais sans toutefois la déterminer) une activité endogène qu'il configure en un flux continu d'objets du monde significatifs. Ces idées s'inscrivent, naturellement, dans le cadre des outils tirés de l'étude des systèmes dynamiques, par contraste net avec la tradition cognitiviste. D'un point de vue de cognition incarnée, tout acte mental est caractérisé par une participation convergente de plusieurs régions du cerveau fonctionnellement distinctes et distribuées topographiquement, et de leurs incorporations sensorimotrices. Ainsi, le défi réel que cette manière de penser représente pour les sciences cognitives est de remettre totalement en question le postulat le plus profondément ancré dans notre tradition scientifique, selon lequel le monde tel que nous le vivons est indépendant de l'être connaissant. Au contraire, la conclusion inévitable est que connaissant et connu, sujet et objet, sont liés par une

relation de spécification mutuelle : ils viennent à exister ensemble, ils se définissent mutuellement, ils sont corrélatifs.

Citons, par exemple, le monde des couleurs que nous percevons dans notre vie quotidienne. On présuppose habituellement que la couleur est un attribut de la longueur d'ondes de la lumière réfléctée par un objet, et que nous l'assimilons et la traitons comme une information pertinente. En fait, comme le montrent désormais de nombreux documents, la couleur perçue d'un objet est pour une large part indépendante de la longueur d'onde qui pénètre l'œil : c'est un processus complexe de comparaison coopérative entre de multiples ensembles de neurones à l'intérieur du cerveau qui spécifie, selon l'état global qui est atteint, la couleur d'un objet, c'est-à-dire un espace chromatique de perception (E. Thompson *et al.*, « Ways of coloring », *Beh. Brain Sci.*, 15 : 1-45, 1992). Par exemple, chez l'oiseau, l'espace chromatique est apparemment tétrachromatique (il utilise quatre couleurs fondamentales), contrairement à nous qui sommes trichromates (notre espace ne fait appel qu'à trois couleurs fondamentales). Les couleurs apparaissent ici non pas comme un corollaire des caractéristiques du monde, mais comme des régularités qui sont codéfinies avec une certaine manière d'être une espèce vivante ; en ce sens, cet espace de couleurs n'est pas une représentation, mais une alternative viable. De la même manière, l'espace physique autour de nous semblerait naître non pas de simples perceptions de « traits », tels que le volume, les arêtes, le mouvement, qui conduisent à des synthèses de représentations plus complexes. Des résultats récents mettent en valeur l'importance du flux sensorimoteur ; ainsi, l'espace extérieur est inextricablement lié à nos schémas et gestes corporels (G. Rizzolatti *et al.*, *Science*, 277 : 190-192, 1997).

Pour résumer, donc, les sciences cognitives de l'incarnation considèrent que les capacités cognitives sont inextricablement liées à une histoire vécue, tout comme le chemin qui n'existe pas mais qui est tracé lorsqu'on marche. La cognition est une succession de couplages structurels qui amènent à exister un monde par le biais de réseaux d'éléments interconnectés, capables de changements structurels qui font l'objet d'une histoire ininterrompue ; elle devient une partie d'un monde de significations déjà existant et continu (dans le cas d'une ontogénie), ou bien elle en forme un nouveau (comme dans une phylogénie). Il existe donc un lien naturel entre la cognition enactive et le connexionnisme, puisque tous deux s'appuient sur des émergences dynamiques ; mais ils divergent quant au rôle des représentations.

Des perspectives d'avenir

Nous sommes partis du socle rigide des sciences cognitives pour aller vers ses évolutions les plus récentes. Ceci montre que les sciences cognitives ne sont pas un domaine unifié, qu'elles sont encore aujourd'hui en croissance continue, et que de nouvelles

questions et idées se posent sans cesse. L'une des plus grandes gageures à l'heure actuelle est la question de l'extension des sciences cognitives à l'étude du phénomène de la conscience (S. Hameroff, A. Kaszniak & A. Scott éd., *Towards a Science of Consciousness*, Cambridge, MIT Press, 1996). À mon sens, ces trois vagues consécutives (cognitivism, connexionisme et incarnation) dans l'effort de compréhension de la cognition élémentaire et de ses origines sont liées l'une à l'autre par imbrications successives, comme des poupées russes. Si l'on prend la direction centripète, on peut aller de l'émergence vers les symboles en faisant abstraction de la base d'où naissent les symboles et en prenant les symboles tels qu'ils apparaissent. À l'inverse, on peut aller de la cognition enactive vers une position connexionniste typique en postulant que le domaine dans lequel le système opère comporte certaines régularités (c'est-à-dire que l'on postule une fonction d'adéquation dans ce domaine). Dans le sens centrifuge, on fait progressivement abstraction de ce qui semble être stable et régulier afin d'appréhender l'origine possible de ces régularités; cela pourrait atteindre les dimensions perceptuelles de notre monde humain, et, enfin, notre propre sens de soi.

► CLARK A., *Being There*, Cambridge, MIT Press, 1997. — DUPUY J.-P., *Aux Sources des Sciences Cognitives*, Paris, La Découverte, 1995. — PETITOT J., VARELA F., PACHOUD B. & ROY J.M. éd., 1998, *Naturalizing Phenomenology*, Stanford, Stanford Univ. Press, 1998. — VARELA F.J., *Invitation aux Sciences Cognitives*, Paris, Le Seuil « Points Sciences », Paris, 1996.

Francisco J. VARELA

→ Cognitivism; Computation; Donné; Machine de Turing; Rationalisme; Sciences cognitives; Système; Turing.

COGNITIVISME

« Cognitivism » possède une pluralité d'acceptions. Ce terme désigne notamment une doctrine en philosophie morale. Dans le présent article il sera uniquement question de ce qu'il recouvre dans le domaine des fondements des sciences cognitives. Son emploi, même dans ce domaine, n'est pas complètement fixé. Il s'agit d'un néologisme formé vers la fin des années 1970 par le philosophe John Haugeland pour désigner une certaine doctrine concernant la nature des phénomènes mentaux, et constituant selon lui le présupposé au moins implicite d'un ensemble de programmes de recherche qui commençaient alors à être connus sous l'intitulé générique de « sciences cognitives ». Aujourd'hui, on l'emploie surtout en ce sens, même si l'on débat de ce qui lui appartient en propre, mais aussi parfois pour désigner, voire stigmatiser, une croyance (que l'on réprovoque) en la possibilité d'une science de l'esprit ressemblant de près ou de loin à ce que proposent les sciences cognitives. La difficulté, réelle, qui est à l'origine de cette ambiguïté, est que le cognitivism, en tant que programme de recherche ou ensemble

d'hypothèses de départ, a bel et bien rendu possible l'essor des sciences cognitives, mais que celles-ci ne sont pas en réalité tributaires du cognitivism, ou du moins pas entièrement tributaires, en sorte qu'on peut rejeter le cognitivism en tant que doctrine positive, ou en tant que système de propagande en faveur de telle ou telle conception, sans pour cela estimer vains les efforts accomplis actuellement pour donner corps à une science de l'esprit. En bref, le cognitivism serait historiquement essentiel, mais conceptuellement inessentiel pour les sciences cognitives. En tout état de cause, on ne saurait, comme certains auteurs, le considérer comme réfuté, dépassé, caduc. Il demeure en fait, dans son entièreté, une orientation effectivement adoptée par nombre de chercheurs, et continue de fournir à la fois un point de référence et une série de conjectures, sans lesquels les sciences cognitives seraient probablement frappées d'impuissance.

Nous défendrons l'idée suivante : 1) au sens faible, le cognitivism constitue une approche des phénomènes mentaux qui est à l'origine des sciences cognitives et continue de leur fournir un cadre de référence; 2) au sens fort, le cognitivism est une façon particulière de spécifier les choix théoriques du cognitivism faible, et en ce sens il est depuis une quinzaine d'années l'objet de critiques importantes et d'une forte concurrence de la part de programmes de recherche ou paradigmes rivaux; 3) les travaux scientifiques et philosophiques menés sous la bannière des sciences cognitives jouissent vis-à-vis des deux formes du cognitivism d'une grande latitude : ils peuvent se considérer comme essentiellement tributaires des thèses cognitivistes, ou de thèses opposées, mais aussi ne pas estimer nécessaire ou possible de se situer par rapport au cognitivism.

S'il y a lieu de parler de sciences cognitives autrement que comme une liste de spécialités académiques, c'est qu'elles forment un tout. Mais ce tout n'absorbe pas ses parties, et inversement chaque discipline participante ne participe à son tour que par une partie. Bref, on trouve à la fois plus et moins dans les sciences cognitives que dans la réunion des six disciplines ou groupes de disciplines qui en sont les membres constituants officiels : neurosciences, psychologie, linguistique, philosophie (dont logique), anthropologie, informatique (dont intelligence artificielle et y compris robotique).

Ces disciplines ont quelque chose à se dire; elles revendiquent par conséquent un objet commun. Comme elles ne peuvent prétendre que leurs objets respectifs se confondent, il leur faut trouver une nouvelle manière de les considérer, qui fasse apparaître une intersection non vide. Et pour qu'il ne s'agisse pas simplement d'une manœuvre verbale ou formelle, il faut que cette mise en rapport débouche sur des perspectives concrètes. Le cognitivism se définit d'abord, en son sens faible, comme la perspective selon laquelle il se dégage un objet commun aux disciplines considérées, et grâce à laquelle elles peuvent concrètement s'engager dans des voies nouvelles pour l'explorer.

Commençons par ce second point, les conséquences méthodologiques et heuristiques; nous parlerons des principes après. Nous énumérerons les principales, par ordre décroissant d'importance (historique certainement, conceptuelle peut-être).

En tout premier lieu, mettre en présence la philosophie, en tant que science de l'esprit, et les neurosciences implique de s'engager résolument dans une stratégie moniste, en renonçant aux facilités du dualisme, à charge pour la philosophie d'aborder à nouveaux frais le problème corps-esprit. Ensuite, mettre en présence la psychologie, science des phénomènes mentaux, et l'informatique, science des machines abstraites, implique l'institution, ou la reconnaissance, d'un niveau de transformations purement structurelles (c'est le niveau informationnel); c'est protéger du même coup le monisme ontologique des tentations d'un réductionnisme trivial. Mettre en présence l'informatique et les neurosciences implique l'idée que le cerveau est (entre autres, mais de manière essentielle) une machine à « neurocalculer », et suggère en même temps aux concepteurs de machines à penser, à parler, à percevoir, à se mouvoir, la possibilité de s'inspirer du système nerveux, voire du corps humain tout entier. Mettre en présence linguistique et psychologie oblige à trouver dans le répertoire des aptitudes mentales les ressources nécessaires à l'emploi du langage; les neurosciences doivent quant à elles rendre compte de ces ressources dans l'économie neurale, et font peser en retour des contraintes sur les théories linguistiques et psycholinguistiques. Mettre en présence l'anthropologie et la psychologie implique la nécessité de sacrifier un second dualisme, celui qui postule une autonomie ontologique de la sphère des représentations collectives.

Venons-en aux principes. Comme toute science, les sciences cognitives sont analytiques ou « élémentaristes » : elles recherchent les constituants fondamentaux des entités de leur domaine propre et les mécanismes élémentaires des processus auxquels ces entités donnent lieu. Mais en raison de la nature particulière de leur objet, les sciences cognitives sont élémentaristes en deux sens distincts. Au premier sens, elles recherchent les capacités élémentaires, irréductibles, à partir desquelles, par combinaison et enchaînement (opérations dont la nature exacte reste à déterminer), toutes les capacités mentales de l'espèce sont construites. Au second sens, elles recherchent, pour chacune de ces capacités élémentaires, les ressources nécessaires au déploiement de cette capacité. Quelque chose d'analogue à cette seconde interrogation se pose certes à propos de toute science : c'est la question ontologique, celle de savoir de quoi sont faites les entités fondamentales du domaine. Mais dans le cas des sciences cognitives, la question ontologique prend une gravité philosophique particulière, puisqu'elle porte sur la « nature » du mental, c'est-à-dire sur la nature de quelque chose dont la naturalisation reste à accomplir.

Le sens en lequel il faut entendre « ressource »

constitue donc le principal problème théorique des sciences cognitives. Le cognitivism, c'est sans doute sa contribution essentielle, répond que les ressources en question peuvent être caractérisées de deux manières : elles sont matérielles – ce sont les propriétés matérielles que tout système doit posséder pour abriter la capacité considérée; mais elles sont aussi conceptuelles – ce sont quelque chose comme les propriétés « logiques » que tout système conceptuel doit posséder pour produire le schéma idéal de la capacité en question. Historiquement, l'essor des sciences cognitives s'explique entièrement par la possibilité apparue presque soudainement de donner un sens bien précis à ces deux déterminations, et au rapport qu'elles entretiennent.

La première détermination est cérébrale : les capacités, états et processus mentaux sont de fait déterminés par la dynamique du système complexe que constitue le système nerveux central de l'homme (et des autres créatures, dans la mesure où elles sont le siège de phénomènes mentaux). La seconde détermination, qu'on a qualifiée à l'instant de logique, est beaucoup plus difficile à caractériser en quelques mots. Elle comprend deux aspects.

Le premier est informationnel ou représentationnel : les entités mentales sont pourvues d'une propriété caractéristique, celle de « véhiculer », d'être le « support » d'une information, ou encore d'être une représentation. On dit aussi qu'elles sont douées d'« intentionnalité » au sens particulier que ce terme revêt dans l'œuvre de Franz Brentano : une entité mentale possède intrinsèquement la propriété de renvoyer à quelque chose d'autre qu'elle-même, de même qu'un mot tel que « chat » possède la propriété de renvoyer à tel ou tel petit félin, ou peut-être à une espèce zoologique, ou encore au concept de ce félin, en tout cas à quelque chose qui n'a aucun rapport intrinsèque avec le mot « chat » en tant que tel, puisque c'est dans un autre contexte le mot *cat* ou dans un autre encore le mot *gatto* qui entretiennent avec ces entités le rapport qui existe entre elles et le mot « chat ». La différence entre une représentation mentale et une représentation publique, telle qu'un mot, est que ce rapport avec des entités extérieures est (non mystérieusement) extrinsèque dans le second cas (il résulte d'un accord, tacite, entre les locuteurs du français, pour désigner à l'aide du mot « chat » plutôt que du mot « brique » ou de tel geste de la main les félins en question), et (mystérieusement) intrinsèque ou originaire dans le premier.

Le second aspect de la détermination logique des entités mentales est qu'elles se prêtent à une combinatoire : elles s'agrègent en entités complexes, à la manière dont les lettres forment des mots et les mots des phrases. En outre, cette combinatoire est un processus, et pas simplement une relation idéale. Enfin, ce processus est à la fois logiquement caractérisable et (en vertu de la première caractérisation) matériel. Sur le plan logique, il a la nature d'un calcul, et très précisément d'un calcul au sens de Turing. Sur le plan

matériel, il est évidemment causal, la mise au jour des causes relevant de la compétence des neurosciences.

Ainsi, selon l'hypothèse initiale des sciences cognitives, les entités mentales comprennent des états et des processus. Les états sont des entités dont la fonction est d'être des porteurs d'information. Les processus sont des entités dont la fonction est d'être calculatoire ou algorithmique. Dire en ce sens que les entités mentales ont une fonction, c'est dire qu'il est constitutif de ces entités de posséder la fonction en question ; si elles ne la possédaient pas, elles ne seraient pas ces entités mentales, ou pas les entités mentales qu'elles sont. D'autre part, la nature des entités mentales chez les organismes (humains ou non) que nous connaissons est neurophysiologique : les états mentaux sont des états cérébraux, et les processus mentaux sont des processus cérébraux. Mais cette identité est contingente : ces états et processus pourraient être non cérébraux sans perdre *ipso facto* la qualité mentale qui les caractérise fonctionnellement.

L'hypothèse cognitiviste, point de départ des sciences cognitives, est donc une hypothèse complexe. Elle consiste à conjecturer tout à la fois que 1) le mental possède une nature matérielle non mystérieuse et s'intègre dans une vision scientifique moniste du monde ; 2) le mental possède une autonomie conceptuelle ou logique qui permet et nécessite de l'étudier en tant que tel, à un niveau propre de description qui porte sur la fonction des entités mentales ; 3) la nature matérielle du mental relève de la compétence des neurosciences ; 4) la nature fonctionnelle du mental relève de la compétence d'une nouvelle discipline, sorte d'extension de la logique, qui étudie des univers informationnels régis par des transformations effectives (algorithmiquement réalisables), et qui méritera, lorsqu'elle sera réellement constituée, le nom de « science cognitive » au singulier.

Vu à la lumière de cette hypothèse, l'esprit est, selon l'expression consacrée, un « système de traitement de l'information ». Nonobstant la terminologie moderniste, l'idée est ancienne, si ancienne qu'on peut se demander en quoi consiste la nouveauté révolutionnaire des sciences cognitives. La réponse, pour moitié, est que les sciences cognitives ne pouvaient naître qu'à partir du moment où la notion de calcul matériellement réalisable était désolidarisée d'une conception étroite et arbitraire du mécanisme ; or ce n'est qu'en 1936 que le mathématicien anglais Alan Turing, dans un mémoire historique, a opéré cette séparation. La seconde moitié de la réponse est presque aussi importante : jusqu'à Turing, aucune conception de système mécanique universel, c'est-à-dire maximale versatile, n'était disponible ; tout système était dédié, spécialisé dans une tâche – même s'il était susceptible de certains réglages. Dans son mémoire, Turing invente, comme en passant, l'idée de la machine universelle, et établit concrètement de la sorte la possibilité d'un système qui précisément comme l'esprit passe d'une tâche à l'autre par un simple changement de disposition interne, sans changer de nature profonde.

Telle est la doctrine que nous appelons cognitivisme au sens faible (on parle aussi de fonctionnalisme), et à laquelle le sort des sciences cognitives a jusqu'à présent été profondément lié. Quant au cognitivisme au sens fort, il consiste à donner des notions fondamentales du cognitivisme une interprétation aussi littérale que possible. Au cœur de ce dispositif théorique gît l'hypothèse d'un langage de la pensée, fait de symboles élémentaires du type de ceux des langages logiques, susceptibles de s'assembler selon des règles déterminées pour former des formules complexes. Ces formules sont justiciables d'une syntaxe purement formelle, qui est matériellement réalisée par des opérations calculatoires réalisables par une machine de Turing ; le cerveau est censé constituer une telle machine. D'un autre côté, les symboles sont porteurs d'information, donc munis d'une sémantique (au sens logique), et cette sémantique est strictement compositionnelle : le sens d'une formule complexe est une fonction déterminée du sens de ses constituants. La syntaxe fait passer inférentiellement de formules vérifiées à une formule également vérifiée, ce qui garantit que le système, « calé » au départ sur une image fidèle de la réalité, reste « en phase » avec elle. L'autonomie du niveau syntaxique est complète, ce qui signifie que le sens, ou la référence, des symboles internes n'intervient pas directement dans les transformations ; d'autre part, la séparation entre la partie fixe du système et sa partie variable recouvre exactement la frontière entre les mécanismes qui assurent les opérations élémentaires et les inscriptions internes qui font office de représentations et qui, comme dans l'ordinateur, sont indifféremment des données et des instructions de programme.

Ce schéma est de nature théorique. Une tentative pour l'appliquer directement à la production de modèles des fonctions cognitives a été faite par l'intelligence artificielle dite classique ou symbolique : dans cette discipline, un modèle est indiscernable d'une simulation, ce qui explique à la fois les espoirs qu'elle a suscités, et peut-être les difficultés qu'elle a rencontrées. Ce qu'il faut en tout cas noter ici, c'est que l'un des plus ardents défenseurs du cognitivisme fort, le philosophe Jerry Fodor, s'est toujours montré très réservé sur la portée théorique de l'intelligence artificielle classique.

De nombreux chercheurs ont néanmoins pensé qu'en marquant les limites, voire les erreurs de cette première phase de l'intelligence artificielle, ils réfutaient du même coup le cognitivisme fort, et même le cognitivisme tout court. C'est loin d'être le cas, mais il est vrai que la recherche de nouveaux principes de modélisation computationnelle a favorisé la formulation de nouvelles hypothèses applicables aux sciences cognitives en général. C'est ainsi que sont apparus des cadres théoriques rivaux du cognitivisme fort ; la question de savoir dans quelle mesure certains d'entre eux s'écartent du cognitivisme même large au point de rejeter jusqu'à la notion de représentation est loin d'être tranchée. Le cognitivisme a également fait

l'objet d'attaques frontales, menées par des philosophes qui sont prêts à renoncer s'il le faut aux sciences cognitives elles-mêmes ; les plus connus sont Hilary Putnam, un logicien et philosophe des sciences qui est à l'origine d'une des premières formulations du cognitivisme, et John Searle, qui s'est d'abord illustré par ses travaux en philosophie du langage.

Mais il importe de remarquer qu'une bonne partie des recherches actuelles dans le domaine des sciences cognitives ne s'inscrit dans aucun de ces cadres généraux, se contentant d'un engagement limité sur le plan des entités fondamentales nécessaires au déploiement des phénomènes qu'ils étudient. C'est ce régime « libre » qui assure, à côté du régime « contraint » des grands paradigmes, le renouvellement épistémologique des sciences cognitives en même temps qu'il rend possible une productivité scientifique considérable. Il est vraisemblable que les assises du domaine se dessineront graduellement à mesure que le répertoire des méthodes fécondes et des résultats empiriques s'enrichira. En attendant, le cognitivisme, directement et par l'intermédiaire des hypothèses qui en prennent le contrepied, continue de faire fonction d'épine dorsale épistémologique des sciences cognitives.

- ANDERSON J. & ROSENFELD E. éd., *Neurocomputing. Foundations of Research*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1988.
 - CHOMSKY N., *Rules and Representations*, Oxford, Basil Blackwell, 1980. - FODOR J.A., *The Language of Thought*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1975 ; *Representations : Philosophical Essays on the Foundations of Cognitive Science*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1981. - JOHNSON D.M. & ERNELING C.E. éd., *The Future of the Cognitive Revolution*, New York, Oxford Univ. Press, 1997. - PUTNAM H., *Mind, Language and Reality : Philosophical Papers*, Cambridge (Mass.), Cambridge Univ. Press, 1975 ; *Representation and Reality*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1988 (trad. fr., *Représentation et réalité*, Paris, Gallimard, 1993). - PVLISHYV Z.W., *Computation and Cognition : Toward a Foundation for Cognitive Science*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1984. - RUMELHART D. & MCCLELLAND J., *Parallel Distributed Processing : The Microstructure of Cognition*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1986. - SEARLE J.R., *The Rediscovery of the Mind*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1992.

Daniel ANDLER

→ Cognition et sciences cognitives ; Computation ; Machine de Turing ; Rationalisme ; Sciences cognitives ; Système ; Turing.

COMBINATOIRE

MATHÉMATIQUES

La Combinatoire ne s'est véritablement constituée en tant que branche reconnue des mathématiques que dans la deuxième moitié du XX^e s. On peut bien sûr faire remonter son origine très haut dans le passé, en fait dès l'Antiquité avec les carrés magiques en Chine, ou encore en Inde avec les premiers cas particuliers de dénombrements de permutations et de combinaisons. Mais l'origine de la Combinatoire moderne doit plutôt

être située au XVIII^e s. où commencent à apparaître des méthodes et formules de dénombrement – citons Pascal – puis au XVIII^e où Euler introduit l'idée de graphe en liaison avec le célèbre problème des 7 ponts de Königsberg (1736) et étudie certaines configurations combinatoires (le problème des 36 officiers). Le XIX^e s. fut particulièrement riche en problèmes combinatoires, souvent présentés de façon imagée et amusante – la promenade des écolières de Kirkman (1850), le problème des Quatre Couleurs (1852), Hamilton et son jeu du « voyage autour du monde » (1857), etc., mais on trouve aussi le dénombrement des arbres par Cayley avec des applications à la chimie. À la fin du siècle commence à se développer l'algorithmique de la Combinatoire. Ainsi Trémaux étudie-t-il les diverses façons d'explorer un labyrinthe, ce qui en langage moderne correspond aux algorithmes de parcours de graphes. De fait les graphes constituent au XX^e s. un terrain de prédilection pour l'algorithmique, en liaison avec la théorie de la complexité : le problème du couplage de taille maximale dans un graphe amène Edmonds en 1965 à formuler la notion de « bon » algorithme (algorithme polynomial).

De nos jours la Combinatoire se caractérise par une très grande diversité de sujets. Dans la classification des mathématiques de l'American Mathematical Society la Combinatoire constitue la section 05 depuis 1973 (sur une soixantaine de sections allant des fondements – logique et théorie des ensembles – jusqu'aux applications). Elle est divisée en 5 sous-sections : problèmes combinatoires classiques (analyse combinatoire, dénombrement, énumération, identités combinatoires, etc.), structures combinatoires (carrés latins, configurations équilibrées, plans projectifs finis, matroïdes, pavages...), théorie des graphes (problèmes de cheminements, de colorations, de classifications, graphes et surfaces, graphes aléatoires, algorithmes de graphes, hypergraphes, etc.), combinatoire extrême (théorie extrême des ensembles, théorie de Ramsey, géométrie combinatoire extrême), combinatoire algébrique (fonctions symétriques, tableaux et représentations du groupe symétrique, homologie des ensembles ordonnés, fonction de Möbius, schémas d'association, polynômes orthogonaux...). La Combinatoire est un domaine en expansion à l'intérieur des mathématiques. Le premier journal spécialisé, le *Journal of Combinatorial Theory*, fut créé en 1967 ; il en existe aujourd'hui plus de 15. Le nombre de publications répertoriées en 05 dans les *Mathematical Reviews* est passé de 437 en 1967 sur un total de 16 127 – soit 2,71 % – à 2 816 en 1996 sur 54 144 – soit 5,20 %.

Nous présentons dans ce qui suit des éléments parmi les plus classiques de la Combinatoire. Au-delà de ceux-ci on peut reconnaître des aspects combinatoires dans de nombreux domaines des mathématiques actuelles, correspondant à un courant d'investigations et de présentations plus « concrètes » ou plus « explicites » que dans la première moitié du siècle. Les puissants moyens de calcul fournis par les ordinateurs y jouent bien sûr un grand rôle en permettant des

stratégies nouvelles de constructions d'objets mathématiques et de démonstrations (un des premiers exemples, particulièrement frappant, a été la démonstration en 1976 de la célèbre Conjecture des Quatre Couleurs — voir plus bas). C'est dans cet esprit qu'on peut comprendre une déclaration récente de I.M. Gelfand : « Mathematics of the 21st century will be to a large extent combinatorial ».

Combinatoire classique

On désigne ainsi ce qu'on appelle plus précisément aujourd'hui l'Analyse combinatoire. Très tôt apparue dans le champ de la Combinatoire, celle-ci est constituée de l'ensemble des techniques qui permettent de compter, on dit plutôt dénombrer, des objets ou structures de nature mathématique, éventuellement aussi les énumérer, c'est-à-dire en établissant la liste exhaustive, éventuellement encore en montrant l'existence dans certains cas. Les objets ou structures en question sont généralement finis et relèvent de ce qu'on appelle les Mathématiques discrètes. Une application importante de cette branche de la Combinatoire est le calcul des probabilités discrètes, par exemple pour le tirage de cartes ou le lancer de dés. À la base des techniques de l'analyse combinatoire on a le dénombrement de ce qu'on appelle les combinaisons et les arrangements. De façon « naïve », le formalisme mathématique utilise le langage des applications ensemblistes, un arrangement de n objets pris p à p est une façon de ranger dans une suite, c'est-à-dire dans un certain ordre, p objets distincts pris parmi n objets donnés. Un cas particulier important est celui où les entiers n et p sont égaux : on parle alors de permutation de n objets. Il n'est pas très difficile de compter le nombre de permutations de n objets : il y a n façons de prendre le premier élément, puis $n - 1$ façons de prendre le second (puisqu'il ne reste que $n - 1$ objets), puis $n - 2$ pour le troisième, et ainsi de suite jusqu'au n -ième et dernier élément (pour lequel il n'y a plus qu'un seul choix possible). Ces choix successifs étant indépendants, le nombre total de choix est le produit des nombres de choix pour chaque élément, à savoir le produit de n par $n - 1$, puis par $n - 2$, et ainsi de suite jusqu'à 1. Ce produit des entiers consécutifs de n à 1 inclus, qui est donc le nombre de permutations de n objets, est appelé la factorielle de n , et on le note $n!$. Les arrangements sont un peu moins simples à dénombrer, mais s'expriment, dans le cas de n objets pris p à p , comme le produit des entiers consécutifs de n à $n - p + 1$, ce qu'on peut aussi exprimer par $n!/(n - p)!$.

Les combinaisons sont de nature différente : une combinaison de n objets pris p à p est une façon de prendre et rassembler, sans ordre, p objets pris parmi n . Mathématiquement, une combinaison correspond à une partie d'un ensemble. Leur dénombrement peut se faire à partir de celui des arrangements : à chaque combinaison de p objets on peut en effet associer les factorielles p permutations de ces p objets. Ainsi, le nombre de combinaisons de n objets pris p à p est égal au

quotient du nombre d'arrangements de n objets pris p à p par factorielle p , soit $(n!/(n - p)!)/p!$. À titre d'exemple donnons le nombre de tirages du loto : on a $n = 49$, pour 6 numéros $p = 6$ et on trouve $49.48.47.46.45.44/6.5.4.3.2.1 = 13\,983\,816$ tirages, et pour 7 numéros 85 900 584 tirages. Les nombres de combinaisons font l'objet de très nombreuses et très remarquables relations. Ils apparaissent aussi, de façon naturelle et connue depuis longtemps, comme coefficients du développement de la puissance n -ième de $a + b$ (appelé binôme de Newton), ce qui justifie la terminologie de coefficients binomiaux. En écrivant en lignes ces coefficients, suivant l'exposant n , on obtient ce qui est bien connu sous le nom de triangle de Pascal (Blaise Pascal publia en 1665 tout un traité sur le sujet, s'émerveillant de sa fertilité en propriétés). Les méthodes de dénombrement utilisées en Analyse combinatoire sont diverses et parfois complexes. Un outil particulièrement utile est celui des fonctions génératrices, qui sont en fait ce qu'on appelle en Mathématiques des séries formelles, dont les coefficients forment une suite généralement définie par récurrence (c'est-à-dire chaque terme de celle-ci est exprimé en fonction du ou des précédents) et qui expriment le résultat cherché. La possibilité de trouver une expression de cette somme (infinie) permet, par développement en série de celle-ci, de trouver une expression directe pour le terme général de la suite des coefficients, c'est-à-dire une formule qui donne directement un terme quelconque de la suite sans passer par le calcul (récurrent) des précédents. Il est possible ainsi de résoudre certains problèmes de dénombrements, en quelque sorte par un calcul global sur une infinité de cas.

Structures combinatoires

Nous présentons brièvement les carrés latins, les configurations équilibrées, les plans projectifs et les matroïdes. Historiquement ces structures sont apparues dans cet ordre : XVIII^e s. les carrés latins, XIX^e les configurations équilibrées et plans projectifs finis, XX^e les matroïdes. Conceptuellement les plans projectifs finis constituent la structure la plus régulière, les autres en sont des affaiblissements.

Plans projectifs finis. — L'idée que la géométrie peut être développée dans des systèmes n'ayant qu'un nombre fini de points remonte au milieu du XIX^e s. La définition d'un plan projectif fini reprend les propriétés géométriques habituelles du plan projectif réel : on considère un ensemble fini d'éléments, ou points, et une collection d'ensembles de points, ou droites tels que (i) deux points appartiennent à une droite et une seule, (ii) deux droites se rencontrent en un point (et un seul d'après (i)), et (iii) il existe 4 points non alignés. Nécessairement les droites comportent toutes le même nombre de points, soit $n + 1$; le nombre n est appelé l'ordre du plan projectif. Il existe autant de points que de droites, soit $n^2 + n + 1$. Le plan projectif d'ordre 2

(unique) ou plan de Fano a 7 points et 7 droites : 126 (35 147 234 257 367 456). Le problème de la classification des plans projectifs finis est loin d'être résolu. Les ordres possibles ne sont même pas connus. Pour n puissance de premier, le corps à n éléments (unique) permet de construire simplement un plan projectif d'ordre n de façon analogue au cas réel. On sait construire de nombreux autres types de plans projectifs, mais jusqu'à présent aucun n'a été obtenu pour un ordre non puissance de premier. Une condition arithmétique nécessaire, donnée par le théorème de Brück-Ryser (1949), laisse 10 pour premier ordre ouvert. En 1989 Lam-Swiercz-Thiel ont vérifié grâce à diverses réductions et au prix d'un long calcul sur ordinateur qu'il n'existait pas de plan projectif d'ordre 10.

Les plans projectifs finis sont de dimension 2. En dimension ≥ 3 la situation est plus simple : toute géométrie projective finie de dimension ≥ 3 s'obtient à partir d'un corps fini, et est donc entièrement déterminée par son ordre et sa dimension.

Carrés latins. — Un carré latin d'ordre n est une matrice $n \times n$ à coefficients dans un ensemble de n symboles telle que chacun des n symboles apparaisse exactement une fois dans chaque ligne et dans chaque colonne. La table de multiplication d'un groupe fini est un exemple de carré latin. Il en existe de nombreux autres, et un des problèmes fondamentaux consiste à dénombrer les carrés latins d'ordre n . Deux carrés latins (a_{ij}) et (b_{ij}) de même ordre n sont dits orthogonaux si les paires (a_{ij}, b_{ij}) sont deux à deux distinctes autrement dit constituent l'ensemble des n^2 paires de symboles. Il existe au plus $n - 1$ carrés latins mutuellement orthogonaux d'ordre n , et ce nombre est atteint si et seulement s'il existe un plan projectif d'ordre n . On s'intéresse au nombre maximal de carrés latins mutuellement orthogonaux. Une construction due à H.F. MacNeish (1922) montre qu'il existe au moins $q - 1$ carrés latins mutuellement orthogonaux d'ordre q , où q est le plus petit facteur dans la décomposition de n en puissances de premiers. Ce nombre est ≥ 2 sauf si $n = 2(2k + 1)$. Dès 1782 la difficulté du cas $n = 4k + 2$ avait été reconnue par Leonhard Euler, dans le célèbre problème des 36 officiers. Six régiments contiennent chacun 6 officiers de 6 grades différents ; peut-on disposer ces 36 officiers en un carré 6×6 de façon que chaque ligne et chaque colonne contienne un unique officier de chaque régiment et un unique officier de chaque grade ? Ce problème revient à l'existence de deux carrés latins orthogonaux d'ordre 6. Euler avait conjecturé qu'une telle disposition était impossible, et que plus généralement il en allait de même pour tout ordre de la forme $4k + 2$ pour $k \geq 1$. On sait depuis Tarry (1901) que le problème des 36 officiers n'a pas de solution conformément à l'intuition d'Euler. Mais R.C. Bose et S.S. Shrikhande ont montré en 1960 en utilisant les propriétés des corps finis qu'il existe une paire de carrés latins orthogonaux d'ordre $n = 4k + 2$ pour tout $k \geq 2$ soit $n = 10, 14, 18, \dots$. La conjecture d'Euler était loin de la

vérité ! De façon explicite on peut disposer les nombres à deux chiffres de 00 à 99 en une matrice 10×10 de façon que les chiffres des unités et aussi ceux des dizaines soient tous différents dans les lignes et dans les colonnes :

00	67	58	49	91	83	75	12	24	36
76	11	07	68	59	92	84	23	35	40
85	70	22	17	08	69	93	34	46	51
94	86	71	33	27	18	09	45	50	62
19	95	80	72	44	37	28	56	61	03
38	29	96	81	73	55	47	60	02	14
57	48	39	90	82	74	66	01	13	25
21	32	43	54	65	06	10	77	88	99
42	53	64	05	16	20	31	89	97	78
63	04	15	26	30	41	52	98	79	87

À titre anecdotique signalons que l'écrivain oulpien Georges Perec a utilisé ces deux carrés latins orthogonaux pour le découpage en chapitres de son roman *La vie, mode d'emploi* (1978).

Configurations équilibrées. — On peut fixer l'origine des configurations équilibrées, ou plus précisément configurations de blocs incomplets équilibrées ou encore BIBD (de l'anglais « Balanced Incomplete Block Design »), à un article de T.P. Kirkman en 1847, où il construisait ce qu'on appelle aujourd'hui les $(v, 3, 1)$ -configurations (ou systèmes de Steiner). Plus généralement une (b, v, r, k, λ) -configuration où $\lambda \geq 1$ et $k \leq v - 2$ est définie par un ensemble de v éléments — ou variétés — et par b parties à k éléments — ou blocs — telles que tout élément appartienne à exactement r blocs et toute paire d'éléments à exactement λ blocs.

En comptant de deux façons on voit facilement que $bk = vr$ et $r(k - 1) = \lambda(v - 1)$, donc les paramètres v , k et λ déterminent b et r . On peut en conséquence simplifier la notation en (v, k, λ) -configuration. Le problème général est de caractériser les paramètres assurant l'existence. On connaît certaines conditions nécessaires, par exemple $b \geq v$ (inégalité de Fisher), ou bien des propriétés arithmétiques (théorème de Bruck-Ryser-Chowla). De nombreuses constructions reposant sur les corps finis ou la théorie des nombres montrent que ces conditions nécessaires sont souvent suffisantes, en particulier pour les petites valeurs des paramètres.

Un plan projectif d'ordre n est une $(n^2 + n + 1, n + 1, 1)$ -configuration et inversement. Dans son article de 1847 Kirkman avait établi qu'une $(v, 3, 1)$ -configuration existe si et seulement si $v = 6k + 1$ ou $v = 6k + 3$. Il avait remarqué que l'une des $(15, 3, 1)$ -configurations avait la propriété que ses 35 triplets pouvaient être répartis en 7 groupes de 5 formant chacun une partition de l'ensemble des 15 variétés. Il avait exprimé cette propriété sous forme d'un problème amusant connu sous le nom du problème des 15 écolières : montrer que l'on peut planifier les promenades quotidiennes en rang par 3 des 15 écolières d'une classe tout au long des 7 jours de la semaine de

façon que chaque écolière se trouve voisine de chacune des 14 autres une fois et une seule dans la semaine. Une solution du problème de Kirkman pour les écolières ABCDEFGHIJKLMNO :

ABC DHL EJO FKM GIN
ADE BHJ CMN FIO GKL
AFG BIK CLO DJN EHM
AHI BLN CEF DKO GJM
AJK BMO CDG EIL FHN
ALM BDF CIJ EKN GHO
ANO BEG CHK DIM FJL

Les configurations équilibrées ont trouvé depuis les années 1920 des applications aux plans d'expériences en statistique (en particulier en agriculture, d'où provient le mot traditionnel de variété) : leurs propriétés de régularité permettent d'étudier les effets de plusieurs paramètres en minimisant le nombre d'expérimentations. De nos jours les configurations équilibrées ont également d'intéressantes applications aux codes correcteurs d'erreurs.

Matroïdes. — La structure de matroïde (introduite par H. Whitney en 1935) peut être considérée d'un point de vue géométrique comme une généralisation des géométries projectives finies. Ainsi en dimension 2 on affaiblit l'axiome (ii) des plans projectifs finis en « deux droites se rencontrent en au plus un point ». D'un point de vue algébrique les matroïdes décrivent les principales propriétés combinatoires de la dépendance linéaire dans les espaces vectoriels. Les axiomes sont malheureusement trop techniques pour être précisés dans cet ouvrage. Des exemples naturels de matroïdes sont construits à partir de graphes, d'ensembles ordonnés, de groupes, de corps, etc., et donnent lieu à de nombreuses applications.

À titre d'exemple d'application des matroïdes citons un résultat obtenu par P. Seymour en 1980 : la construction des matrices dites totalement unimodulaires dont tous les sous-déterminants (et en particulier les coefficients) sont égaux à 1, -1 ou 0. D'après les formules de Cramer ces matrices possèdent de très fortes propriétés d'inversibilité sur les entiers. Elles interviennent dans de nombreux problèmes de mathématiques discrètes. H. Poincaré avait rencontré les matrices totalement unimodulaires dans le cadre de la topologie algébrique et déjà posé le problème de leur construction au début du siècle. La construction de Seymour de démonstration assez longue est en revanche d'application facile. De façon inattendue elle permet de retrouver (et de généraliser en toute dimension) la classification due à Voronoï (fin du XIX^e s.) de certains pavages cristallographiques.

Depuis une vingtaine d'années ont été introduits divers raffinements ou généralisations de la structure de matroïde. La notion de matroïde orienté (Las Vergnas *et al.*, 1975) ajoute aux matroïdes la notion de position relative (ou de signe en algèbre réelle). Les applications naturelles vont des arrangements

d'hyperplans (et de pseudohyperplans) aux polyèdres et variétés polyédrales. Citons un seul résultat. On sait (théorème de Steinitz, autour de 1920) que les graphes définis par les sommets et les arêtes des polyèdres de l'espace à 3 dimensions sont caractérisés par le fait d'être planaires et 3-connexes. En utilisant les matroïdes orientés J. Richter-Gebert (1995) a montré que le théorème de Steinitz ne se généralisait pas en dimension ≥ 4 en établissant que tout système d'inégalités polynomiales peut être représenté par la combinatoire des facettes d'un polyèdre de dimension 4.

Théorie des graphes

Si son développement en tant que théorie date pour l'essentiel d'une époque récente, la Théorie des graphes représente néanmoins aujourd'hui une part très significative de la Combinatoire. La notion de graphe elle-même est simple et trouve du coup des applications dans des domaines extrêmement variés. De façon intuitive un graphe peut-être vu comme un ensemble de points du plan dont certains sont reliés par des lignes (il s'agit en fait là plutôt d'une représentation de la notion de graphe). Les points sont appelés les sommets et les lignes les arêtes du graphe. Un tel concept modélise par exemple un réseau de communication, les sommets représentant les centres de communication et les arêtes les liaisons directes entre centres, ou encore les liens entre individus d'un groupe. Il se pose alors des questions concernant la connexité du graphe, notion qui a donné lieu au remarquable théorème de Menger (1927) : le nombre minimum k de sommets d'un graphe qu'il faut enlever pour le rendre non connexe est égal au nombre de chemins disjoints pour les sommets qui relient deux sommets quelconques du graphe. Dans ce cas le graphe est dit k -connexe.

Une autre question naturelle est la possibilité de dessiner un graphe dans le plan par des points et des courbes les reliant, de façon que deux arêtes ne se coupent pas en dehors des sommets qu'elles relient. Si cela est possible, le graphe est dit planaire. Deux exemples de graphe non planaires sont le graphe complet à 5 sommets, graphe dans lequel deux sommets distincts quelconques sont reliés par une arête, et le graphe dit « des 3 puits et des 3 maisons » (chacun des 3 puits est relié à chacune des 3 maisons). La caractérisation des graphes planaires a fait l'objet de plusieurs théorèmes remarquables, dont le théorème de Kuratowski (1930) : essentiellement, les seules configurations interdites pour qu'un graphe soit planaire sont les deux graphes précédents. S'est très tôt posée aussi la question d'une méthode pratique, d'un algorithme efficace, pour déterminer si un graphe est planaire, et si oui en trouver une représentation dans le plan (la notion d'algorithme efficace demande évidemment une définition précise, assez technique). L'importance pratique de la question, il suffit de songer aux circuits imprimés en électronique par exemple, a justifié ces recherches qui n'ont d'ailleurs abouti vraiment que dans les années 1970. Cette question des graphes planaires n'est

qu'une de celles nombreuses qu'on peut se poser sur les graphes, et qui trouvent souvent leur origine dans les applications. Elle s'est trouvée très tôt posée avec le problème des quatre couleurs, apparu au milieu du siècle dernier en Angleterre et résolu seulement en 1976 par Appel et Haken qui s'appuyèrent sur de nombreux travaux antérieurs, notamment ceux de Heesch dans les années 1950. Ce problème a d'abord été formulé en termes de cartes géographiques : est-il toujours possible de colorier les régions d'une carte dessinée dans le plan en n'utilisant qu'au plus quatre couleurs et de telle sorte que deux régions voisines (par une frontière qui ne se réduit pas à des points isolés) reçoivent des couleurs différentes. La formulation de ce problème en termes de graphes planaires, les sommets représentant les régions et les arêtes les paires de régions voisines, se prête mieux au raisonnement mathématique. Ce problème célèbre a beaucoup contribué au développement des concepts et outils de la Théorie des graphes au cours du XX^e s. Il faut dire aussi que sa résolution finale à coup de quelques 1200 heures de calculs sur gros ordinateurs, pour trouver une liste de près de 2 000 configurations ayant certaines propriétés, a fait grand bruit à l'époque. La démonstration tenait à l'existence d'un tel ensemble de configurations, et il n'était pas possible de le trouver « à la main ». Aujourd'hui encore la vérification de ses propriétés ne peut se faire sans le secours d'ordinateurs. L'un des auteurs de la démonstration a parlé à cette occasion d'une « nouvelle pratique des mathématiques », un nouveau type de démonstration en quelque sorte où certains calculs ne peuvent être menés à leur terme que sur machine.

Les questions de colorations et de représentations de graphes, dans le plan comme on a vu ou dans d'autres surfaces mathématiques comme on généralise, représentent un des aspects les plus riches de la Théorie des graphes. Elles ont en particulier été l'occasion d'une conjecture et d'un théorème récent très profond. La conjecture, c'est celle de Hadwiger qui énonce que s'il faut au moins n couleurs pour colorer les sommets d'un graphe, de façon que deux sommets reliés par une arête soient de couleurs différentes, alors on peut par suppressions et contractions d'arêtes transformer ce graphe en le graphe complet à n sommets (supprimer une arête dans un graphe consiste à l'enlever tout en laissant ses sommets extrémités, contracter une arête consiste à l'enlever et identifier ses sommets extrémités en un seul sommet). Pour le cas $n = 5$ cette conjecture est équivalente au théorème des quatre couleurs et se trouve donc aujourd'hui démontrée. Le cas $n = 6$ a récemment été également prouvé (en utilisant également le théorème des 4 couleurs). Un autre théorème, annoncé par Robertson et Seymour (de l'ordre de 500 pages de démonstration, en partie publiées) énonce que dans toute suite infinie de graphes il en existe un qui se réduit à un autre par suppressions et contractions d'arêtes. Les conséquences de ce résultat sont importantes, en particulier le fait que toute pro-

priété \mathcal{P} de graphe qui se conserve par suppressions et contractions d'arêtes peut être caractérisée par un nombre fini de configurations exclues, comme pour les graphes planaires avec le théorème de Kuratowski qui est un cas particulier typique. Il est en outre également alors possible de tester cette propriété \mathcal{P} par un algorithme efficace. Ce dernier résultat concernant les algorithmes de graphes est d'une très remarquable généralité. Comme problème bien connu, et toujours non résolu aujourd'hui, on peut citer encore la Conjecture du graphe parfait posée par Berge au début des années 1960. Signalons enfin que certains concepts de théorie des graphes ont été étendus avec profit aux familles de parties d'un ensemble, appelées dans ce cadre « hypergraphes ».

Combinatoire extrême

Théorie extrême des ensembles. — La problématique est la suivante : quelle est la taille maximale (ou minimale) d'une collection de parties d'un ensemble satisfaisant à certaines contraintes ? Parmi les nombreux exemples de contraintes couramment envisagés citons : les tailles des intersections (ou réunions) deux à deux ne peuvent prendre que certaines valeurs, une partie n'est jamais incluse dans une autre, etc. Un des premiers des nombreux théorèmes dans ce domaine a été obtenu par Sperner (1928) : la taille d'une collection de parties d'un ensemble donné mutuellement incomparables pour l'inclusion est maximale lorsque ces parties sont précisément toutes les parties à k éléments d'un ensemble à $2k$ éléments, resp. toutes les parties à k éléments ou bien toutes les parties à $k + 1$ éléments d'un ensemble à $2k + 1$ éléments.

Les applications vont de la combinatoire des convexes à la taille des circuits informatiques permettant de réaliser une fonction booléenne donnée. Parmi les applications remarquables mentionnons la réfutation d'une conjecture célèbre de Borsuk (1933) : on a longtemps cru qu'il était possible de recouvrir un convexe d -dimensionnel par au plus $d + 1$ convexes de diamètres strictement plus petits. En utilisant une réduction du problème due à Larman, Kahn et Kalai ont montré en 1992 qu'un résultat de théorie extrême des ensembles de Frankl-Wilson (1981) permettait de construire un contre-exemple en dimension $d = 1325$.

Théorie de Ramsey. — Le problème de l'assemblée apparaît souvent dans les pages de jeux mathématiques : montrer que dans une assemblée de 6 personnes il en existe 3 dont 2 quelconques se sont déjà rencontrés, ou 3 dont 2 quelconques ne se sont jamais rencontrés. Ce résultat est un cas particulier d'un théorème profond du logicien Ramsey (1930). Soient n, p, k trois entiers fixés et N un entier à déterminer. Considérons les parties à p éléments d'un ensemble à N éléments et répartissons-les de façon arbitraire en k classes — nous dirons que nous les colorons en k couleurs. Alors si N est « assez grand » on peut trouver

n éléments dont toutes les p -parties sont dans une même classe, c'est-à-dire sont de la même couleur. Clairement si la propriété de coloration est vraie pour N , elle est vraie pour tout entier $\geq N$, et le théorème revient donc à dire que la propriété est vérifiée pour au moins un entier N . On aimerait en fait trouver le plus petit, appelons-le nombre de Ramsey, et notons-le $R(n, p, k)$.

Pour $p = 1$ on retrouve le principe des tiroirs : si on place $R(n, 1, k) = k(n - 1) + 1$ objets dans k tiroirs l'un des tiroirs contient (au moins) n objets. Pour $p \geq 2$ même dans les petits cas il est très difficile de trouver les nombres de Ramsey : on a $R(3, 2, 2) = 6$ (cas du problème de l'assemblée), $R(4, 2, 2) = 18$, et déjà $R(5, 2, 2)$ n'est pas connu exactement (en 1993 on le situe dans l'intervalle 43-49). La démonstration du théorème fournit une borne supérieure pour $R(n, p, k)$, malheureusement cette borne est très grande, et en fait peu exploitable. Parmi d'autres résultats majeurs du domaine mentionnons le théorème de Van der Waerden (1927) : étant donnés deux entiers fixés n et p il existe un entier N tel que pour toute coloration des entiers de 1 à N en k couleurs il existe une progression arithmétique de longueur n monochromatique. La borne dans le théorème de Van der Waerden est encore plus grande que dans le théorème de Ramsey, à l'origine il était impossible de l'exprimer à l'aide des fonctions usuelles. Une nouvelle démonstration (Shelah 1988) a permis de l'améliorer : la nouvelle borne est une itération de « tours » de longueurs $n + k$ d'exponentielles ! Néanmoins, et de façon assez inattendue, des résultats proches ont des applications en calcul informatique pour la multiplication rapide des matrices.

Géométrie combinatoire extrémale. – Il s'agit de problèmes extrémaux de nature combinatoire concernant des ensembles finis de points dans des espaces euclidiens, très souvent le plan. À titre d'exemple considérons le problème d'Erdős-Szekeres (1935). Étant donné un entier $p \geq 3$ existe-t-il un entier N tel que parmi N points du plan en position générale il en existe toujours n constituant les sommets d'un polygone convexe ? On voit facilement en raisonnant directement que parmi 5 points du plan en position générale il en existe 4 formant les sommets d'un quadrilatère convexe. Étant donnés $N \geq 6$ points du plan en position générale séparons les 4-parties en 2 collections : Q l'ensemble des quadruplets formant un quadrilatère convexe, Q' son complément. D'après le théorème de Ramsey parmi $R(n, 4, 2)$ points du plan il existe n points dont toutes les 4-parties sont ou bien dans Q ou bien dans Q' . Comme Q est non-vide d'après le cas $N = 5$, toutes les 4-parties sont dans Q , et donc les n points forment un polygone convexe. Citons un second résultat : le nombre minimal de pentes des droites déterminées par n points non alignés du plan est le plus grand entier pair inférieur ou égal à n (Ungar 1982). La démonstration utilise des idées proches des matroïdes orientés.

Combinatoire algébrique

Les problèmes et méthodes de combinatoire algébrique demanderaient des développements trop longs pour être accessibles dans le cadre de cet ouvrage. Nous renvoyons le lecteur intéressé aux chapitres correspondants de *Handbook of Combinatorics* (référence en fin de chapitre).

Applications de la Combinatoire

La Combinatoire trouve aujourd'hui des applications dans des domaines très variés, des mathématiques pures jusqu'aux sciences humaines. Les objets et structures discrètes de la Combinatoire se prêtent en effet à des situations très différentes. Si on voulait tenter de classer ces applications, on pourrait déjà distinguer ce qui relève d'une application directe, c'est-à-dire d'un problème pratique dont la formalisation et la modélisation sont immédiatement de nature combinatoire. Dans ce cas d'ailleurs, le développement théorique est souvent issu ou inspiré du problème pratique posé. C'est ainsi qu'en Chimie, et ce bien avant la lettre de la théorie, on trouve l'idée de graphe pour représenter la structure de molécule. Ce fut le point de départ de tout un ensemble d'études théoriques et pratiques, qui d'ailleurs se poursuivent encore aujourd'hui, et qui ont été l'occasion de résultats profonds et utiles sur les graphes. On peut citer à ce propos le théorème d'énumération des graphes de Polya. Un autre champ d'applications directement reliées à la Combinatoire est celui, extrêmement riche et fécond ces cinquante dernières années, de la Recherche opérationnelle et plus particulièrement de l'Optimisation combinatoire. Un problème d'optimisation est un problème différent de ce qui est classiquement considéré en Mathématiques. Il s'agit en effet de trouver un objet « optimal », en un certain sens, dans un ensemble qui en contient un nombre fini mais éventuellement très grand. Le problème est donc essentiellement pratique et de l'ordre, si on veut, de la recherche d'une aiguille dans une botte de foin ! Par « très grand », il faut entendre inaccessible par examen exhaustif de tous les éléments, non seulement à la main mais également par les machines les plus puissantes dans un temps raisonnable. Un exemple typique est fourni par le problème du voyageur de commerce : il s'agit de déterminer une tournée d'un certain nombre de villes qui rende minimum la distance totale parcourue. Ce problème, qui a fait et fait toujours l'objet de quantité de recherches, trouve des applications dans l'organisation de tournées bien sûr mais aussi par exemple pour la programmation d'un bras articulé de robot. Le nombre de cas qu'une méthode exhaustive obligerait à considérer devient vite très grand. Il croît comme la factorielle du nombre de villes, et dès que ce nombre est de l'ordre de quelques dizaines, le plus puissant des ordinateurs actuels n'en viendrait pas à bout à échelle d'une vie humaine. On a bien sûr tenté d'élaborer des méthodes de recherche plus efficaces que le simple examen exhaustif de tous

les cas, mais assez curieusement ce problème résiste (avec plusieurs centaines d'autres !), à tel point qu'on doute aujourd'hui d'une solution (c'est la question fondamentale $P = NP ?$ de la Théorie de la complexité).

D'autres problèmes, du même genre et apparemment au moins aussi difficiles, ont pourtant trouvé des solutions algorithmiquement efficaces : par exemple, et typiquement puisqu'il est à l'origine de la notion d'algorithme « efficace », le problème du couplage de taille maximale dans un graphe, lequel peut être en particulier vu comme un problème d'affectation (optimale) d'employés à des postes de travail. D'autres problèmes bien résolus aussi sont des grands classiques des applications du domaine, citons : les questions d'ordonnement de tâches (méthode PERT), qui sont des applications des chemins optimaux dans les graphes valués (c'est-à-dire avec des valeurs sur les arêtes), les problèmes de transport, qui sont des applications des flots dans les graphes. Ces applications des graphes ont aussi une grande portée en Informatique, pour l'organisation des données et l'analyse des programmes notamment.

Il existe d'autres applications moins directes de la Combinatoire. Ainsi en Mathématiques, même dans des domaines apparemment très éloignés, il est parfois possible d'extraire d'une situation complexe une structure combinatoire relativement simple et qui recèle suffisamment d'informations pour qu'on soit en mesure, par application d'un théorème combinatoire, de trouver une propriété difficile, voire impossible, à établir autrement. Pour ne citer qu'un exemple, relativement accessible, les propriétés dites de « point fixe » et qui concernent les fonctions (un point fixe est un point invariant) se ramène à la propriété de base qu'un graphe, quel qu'il soit, a un nombre pair de sommets de degré impair (le degré d'un sommet est le nombre d'arêtes incidentes à ce sommet).

Il faudrait évoquer encore bien d'autres applications de la Combinatoire, telles par exemple certaines récentes : en Biologie moléculaire pour l'étude du génome humain, en Physique statistique pour les problèmes de percolation, c'est-à-dire l'étude des flux en milieu aléatoire. C'est dire encore la richesse et la diversité des domaines d'application de la Combinatoire.

► GRAHAM R.L., GRÖTSCHEL M. et al. éd., *Handbook of Combinatorics*, North-Holland, 1995.

Jean-Claude FOURNIER et Michel LAS VERGNAS

→ Complexité ; Topologie.

COMÈTE

Il y a des milliers d'années que les hommes regardent le firmament immuable accomplir éternellement sa révolution. Et depuis aussi longtemps, ils observent avec la plus grande attention les astres « dissidents » : les planètes d'abord, errant parmi les étoiles sur des

chemins bizarres mais prévisibles, et surtout les comètes, qui apparaissent sans crier gare pour disparaître de même quelques semaines plus tard. Cette apparition soudaine, jointe à l'aspect « échevelé, livide » des plus grandes comètes, ne pouvait manquer d'être interprété comme un présage, en général calamiteux. Quand les soldats de la tapisserie de Bayeux regardent, en 1066, ce qui s'appellera beaucoup plus tard la comète de Halley, c'est à coup sûr en se demandant si le désastre qu'elle annonce concerne les Normands ou les Saxons... Cette méfiance persiste, sous des formes diverses, jusqu'à nos jours : qui n'a entendu accuser la comète Hale-Bopp (1997) de dérégler le temps ? Mais depuis la Renaissance, ces astres fantasmagoriques n'inquiètent plus seulement le grand public : ils dérangent aussi les astronomes – pour le plus grand bien de l'astronomie.

La comète de Tycho fait voler en éclats les sphères de cristal

Le Danois Tycho Brahé, actif entre 1570 et 1600, peut apparaître comme le dernier astronome du Moyen Âge : il n'est pas copernicien, et ses instruments n'ont pas encore d'optique. Mais en même temps, c'est le premier des modernes, à la fois par l'extrême précision de son travail, et par les doutes fondamentaux que ses observations jettent sur le modèle traditionnel de l'univers. Ainsi, en novembre 1572, il découvre dans le ciel une étoile nouvelle (il l'appelle « nova stella », d'où notre « nova »). Certes son éclat décline ensuite, et elle s'éteint quelques mois plus tard. Mais elle a suffi à mettre en doute le caractère immuable du firmament, l'un des deux « piliers » de la description traditionnelle du monde.

L'autre pilier, c'est l'emboîtement des sphères autour de la Terre centrale. En effet, les sphères de cristal rigides et parfaites mises au point par Eudoxe et Aristote n'ont pas été remplacées, comme on le croit souvent, par les cercles roulant sur des cercles qui forment le système dit de Ptolémée : celui-ci est destiné aux astronomes, tandis que le public, lui, emboîte le pas à ses prêtres pour continuer à chanter la perfection des sphères. Elles matérialisent la séparation entre le ciel – parfait puisque divin, ou divin puisque parfait – et le monde terrestre, ou plutôt « sublunaire », c'est-à-dire contenu dans la plus petite sphère céleste, celle qui porte la Lune. Ce monde sublunaire est le lieu de la variabilité, de l'accident, du jeu des forces naturelles, qu'il est légitime d'y étudier. Dans le ciel, au contraire, toute interrogation sur la nature des objets ou sur la cause des mouvements relève du sacrilège.

Dans cette description, les comètes sont évidemment sublunaires : quoi de plus accidentel qu'une comète ?

Or, en 1577, il apparaît une comète qui est sans doute la plus brillante du millénaire, plus brillante encore que Hale-Bopp et que la grande comète de 1811. Tycho n'a pas encore construit ses instruments les plus finement gradués, mais il parvient tout de même à montrer que la comète est située plus loin que

la Lune. Elle évolue donc à travers le système de sphères de cristal – c'est-à-dire qu'il n'y a pas de sphères de cristal.

Il y a à ce moment trente-deux ans que le livre de Copernic est paru, et que le milieu astronomique discute calmement, dans l'indifférence générale, des avantages et des inconvénients des deux descriptions mathématiques du monde. Les sphères ne s'en portaient pas plus mal : pour les faire sauter, il a fallu une comète.

La comète de 1664 intrigue Louis XIV et le jeune Newton

Galilée n'a pas eu de chance avec les comètes. Lors du passage de celle de 1618 il était malade, et fort abattu par la mise à l'index de Copernic, résultat direct de ses observations à la lunette... Ensuite, il n'y a eu aucune comète visible jusqu'à sa mort en 1642, et même au-delà, puisque la suivante n'est apparue qu'en 1664.

Comète spectaculaire arrivant après un demi-siècle « sans », celle de 1664 ne pouvait manquer d'attirer l'attention. Le jeune Newton, par exemple, a vingt-deux ans en 1664, et note dans ses carnets d'étudiant les interrogations que suscite cette comète. C'est qu'elle n'est pas seulement brillante, elle est aussi « rétrograde », c'est-à-dire qu'elle prend « dans le mauvais sens » le virage autour du Soleil. Autrement dit elle prend à rebrousse-poil la grande valse du système solaire, qui avait inspiré à Descartes son modèle des tourbillons de « matière subtile ». Certes ces tourbillons ne faisaient pas l'unanimité, mais maintenant ils perdent à peu près tout crédit. Et faute de tourbillons, il va falloir chercher un autre moteur pour le système : la comète de 1664 est sans doute, au moins autant que la fameuse pomme de l'automne 1665, à l'origine de la théorie de la gravitation.

En France aussi elle soulève un grand intérêt, au point que l'on organise le premier colloque sur les comètes, leurs causes et leurs effets... Il se tient le 15 janvier 1665 au collège des jésuites de Paris (le futur lycée Louis-le-Grand), et on publie ses travaux dans le *Journal des Sçavans*. À côté des vieilles idées sur les « exhalaisons » atmosphériques, et de l'embarras des cartésiens à propos des tourbillons, on y trouve l'opinion, soutenue par l'astronome Auzout, que le mouvement des comètes est parfaitement régulier, et qu'on le constatera sûrement bientôt. Un autre astronome, Petit, émet l'idée que certaines comètes pourraient revenir périodiquement. Louis XIV s'intéresse visiblement à la comète, à tel point que les astronomes saisissent l'occasion pour lui suggérer la construction d'un observatoire. « Il y va, Sire », déclare Auzout, « de la gloire de Votre Majesté, et de la Réputation de la France. » Deux ans plus tard les mêmes astronomes viendront, le jour du solstice d'été, tracer au lieu choisi « la méridienne », c'est-à-dire le méridien de Paris. L'observatoire de Paris est né, avec la comète pour marraine : en moins de cinq ans on va y mesurer les dimensions du système solaire et la vitesse de la lumière !

La comète de 1682 donne à Halley l'idée de rendre visite à Newton

Après avoir été cinquante ans sans comètes, le XVII^e s. se rattrape : deux comètes brillantes se manifestent en 1680 et 1682. La seconde en particulier se prête bien à l'observation, et révèle un arc de courbe assez long pour que l'on puisse tenter de déterminer la forme de sa trajectoire. Certes on n'est plus à l'époque où Tycho l'imaginait circulaire, et Hévélius droite... Mais on hésite encore à la déclarer elliptique : pour les « fils de Kepler » que sont les astronomes de 1680, qui dit ellipse dit planète.

C'est le genre de question que se pose le jeune astronome anglais Edmond Halley, déjà connu et membre estimé de la Royal Society. Il réfléchit en particulier à l'idée d'une attraction exercée par le Soleil, et qui serait inversement proportionnelle au carré de la distance. Cette idée, qui est « dans l'air » en 1680, s'accorderait bien avec la troisième loi de Kepler (qui lie taille de l'orbite d'une planète et durée de son « année »)... si les orbites étaient circulaires. Mais la première loi affirme qu'elles sont elliptiques, et d'ailleurs celles des comètes semblent l'être encore davantage. Une attraction en $1/r^2$ serait-elle compatible avec des orbites elliptiques ?

Halley ne parvient pas à le montrer, ni aucun de ses collègues de la Royal Society. Mais il y a quelqu'un qui en serait peut-être capable : l'ermite de Cambridge, Newton, passe pour en savoir plus que quiconque sur les arcs de courbe... En 1684, Halley se décide à lui rendre visite. Il se passe alors deux choses extraordinaires. D'abord Halley constate que cette question qui agite en vain les savants de Londres, Newton l'a résolue complètement depuis des années : il a senti en 1666 l'attraction en $1/r^2$, puis il a construit les outils mathématiques nécessaires pour montrer qu'elle impliquait des orbites elliptiques. Mais il a gardé tout cela secret, échaudé par les controverses soulevées en 1672 par ses idées sur la lumière. Or, et c'est la deuxième surprise de cette visite, Halley parvient à inspirer confiance à Newton, au point que celui-ci accepte de rédiger enfin son travail, si son jeune collègue se charge de la publication. C'est ainsi que naissent les *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle*, dont les trois tomes paraissent en 1686 et 1687. Et les comètes forment une part importante du troisième tome. On y trouve en particulier l'idée de leur retour périodique, qui va rendre impérissable le nom d'Edmond Halley...

Le retour périodique

Une trajectoire elliptique très allongée, gouvernée par la gravitation universelle, obéit aux lois de Kepler. En particulier à la deuxième, selon laquelle la vitesse de la comète est maximum au passage près du Soleil, et diminue à mesure qu'elle s'en éloigne. Ainsi la comète parcourt en quelques semaines l'arc où nous la voyons, et peut ensuite passer des années à s'éloigner, en allant

de moins en moins vite, avant de revenir pendant autant d'années en accélérant tout aussi progressivement.

Une même comète peut ainsi apparaître périodiquement, ses passages brefs pouvant être séparés par des intervalles très longs. En 1695 Halley cherche dans les archives la trace de passages de comètes brillantes qui pourraient correspondre à celle qui n'a cessé de l'inspirer : la comète de 1682. Il découvre en 1607 et en 1531 des comètes dont les caractéristiques pourraient convenir, et il fait l'hypothèse qu'il s'agit de la même...

Si c'est le cas, elle aurait une période de 75 ou 76 ans, et devrait donc revenir en 1757 ou 1758. Halley et Newton tentent de tenir compte d'un ralentissement par l'attraction de Jupiter, que la comète doit frôler à son prochain retour, et annoncent finalement ce retour pour « la fin de 1758 ou le début de 1759 ». Quand la date prévue approche, les deux hommes sont morts depuis longtemps, mais la communauté astronomique fait du retour de la comète une sorte de test de la validité de la théorie newtonienne. Aussi refait-on les calculs du ralentissement, non seulement par Jupiter, mais par les autres planètes : les méthodes de calcul ont progressé dans l'intervalle, et les partisans de Newton veulent mettre toutes les chances de leur côté. C'est Clairaut qui se charge de ce monstrueux calcul (six mois à plein temps pour trois personnes...) avec le jeune Lalande et Madame Lepaute, la calculatrice de l'Observatoire. Le retour est finalement prévu pour « la mi-avril 1759, à un mois près ». La comète passe au périhélie le 14 mars. C'est alors que, sur proposition de l'astronome parisien Lacaille, on donne à cette comète le nom de « comète de Halley ». Et en retournant vers les archives, chinoises en particulier, on trouve tous ses passages jusqu'en 239 avant notre ère, plus un déjà enregistré en 466 av. J.-C. C'est elle, en particulier, qui figure sur la tapisserie de Bayeux (1066) et elle encore qui guide les rois mages sur une nativité de Giotto en 1301. Et depuis 1759 elle est revenue, bien entendu, en 1835, 1910 et 1986.

De quoi les comètes sont-elles faites ?

Une comète se présente comme une tache lumineuse ronde ou ovale, appelée « tête » ou « chevelure », d'où partent une ou plusieurs « queues » dont on s'est assez vite aperçu qu'elles se dirigeaient à l'opposé du Soleil. Le plus souvent, mais pas toujours, un instrument assez puissant permet de distinguer, au centre de la chevelure, une petite tache plus brillante, à laquelle on a donné le nom de « noyau ».

Dès que l'on a recommencé à spéculer, avec Galilée, sur la nature des objets célestes, on s'est interrogé sur la constitution des comètes. L'énormité de leurs dimensions, jointe à leur transparence, permet d'affirmer que la chevelure et la queue sont extrêmement ténues : en 1828 Struve constate que la tête de la comète Encke (500 000 km de diamètre) ne masque pas une étoile de magnitude 11. Ceci correspond pour les gaz de la chevelure à une densité de l'ordre de 2.10^{-17} par rapport à

l'air – très au-dessous de celle du meilleur « vide » de nos laboratoires... Quant à la constitution chimique de ces gaz, on ne peut l'atteindre qu'en analysant la lumière de la comète. Dès 1864, en observant visuellement la dispersion par le prisme de la lumière émise par la chevelure, on parvenait à y distinguer trois bandes lumineuses, déjà décelées dans toutes les flammes carbonées (bougie, arc au charbon, etc.) et dues à la molécule C_2 , formée de deux atomes de carbone. Les comètes contenaient donc du carbone !

En 1881, on parvient à photographier le spectre, et les progrès sont rapides : on identifie le cyanogène – donc l'azote – et on détecte le doublet du sodium. Celui-ci est légèrement décalé par effet Doppler, ce qui permet de calculer la vitesse radiale de la comète par rapport à la Terre, et de comparer le résultat à la valeur tirée de la trajectoire : l'accord est parfait, et confirme l'origine cométaire de la lumière étudiée. Ces succès contribuent largement à faire admettre la spectroscopie à la communauté astronomique...

Peu à peu les résultats s'accablent, et permettent d'affirmer que les constituants principaux des comètes sont les éléments C, H, O, N, avec un léger « assaisonnement » de métaux divers. Reste à imaginer la structure physique du noyau, et la façon dont il donne naissance à la chevelure et à la queue.

C'est en 1949 seulement que Whipple, de l'observatoire de Harvard, propose pour le noyau le modèle de la « boule de neige sale ». Cette « neige » est formée de corps légers sous forme solide, de l'eau bien sûr, mais aussi de l'ammoniac, du CO_2 , etc. Et cette boule de neige ratisse dans l'espace des « saletés » diverses, poussières, météorites... Quand la comète se rapproche du Soleil, ce noyau « dégaze », en projetant dans toutes les directions des jets qui constituent la chevelure. Puis la pression de radiation du Soleil balaye ces jets dans la direction opposée à l'astre central, ce qui donne naissance à la queue. Quand il y a deux queues, les gaz forment celle qui est droite, et l'autre est faite de poussières. À l'époque, personne n'avait encore vu ce noyau solide. Mais le modèle rendait bien compte de l'aspect de la comète, et expliquait en particulier la soudaineté de son apparition. Loin du Soleil, en effet, trois raisons se conjuguent pour que la comète soit peu visible : son éloignement, le quasi-alignement de sa queue éventuelle avec l'axe de visée, et surtout la faiblesse du dégazage, c'est-à-dire de la chevelure et de la queue. De plus, pendant son long voyage loin du Soleil, la comète congelée ne perd pas de matière, ce qui lui permet d'en dépenser à maintes reprises à ses passages successifs au périhélie.

Le modèle de Whipple a même le mérite d'expliquer le léger ralentissement constaté sur certaines comètes par l'effet de « rétrofusée » des jets émis par le noyau, et plus abondants du côté orienté vers les bienfaisants rayons du Soleil... dans les cas où ce noyau ne tourne pas sur lui-même. Pour confirmer le bien-fondé de ce modèle, il faut attendre que le développement des techniques spatiales permette d'« aller voir sur place ». C'est-à-dire d'envoyer des sondes frôler la comète. Il

faut choisir pour cela une comète importante, et qui ait fait la preuve de sa ponctualité. La comète de Halley, si éblouissante lors de son passage en 1910, devient au passage suivant l'objectif de plusieurs missions spatiales.

Les rendez-vous de la comète de Halley

La comète de Halley est passée au périhélie le 9 février 1986, mais dans une position défavorable par rapport à la terre : presque de l'autre côté du Soleil. On a donc retardé ses rendez-vous jusqu'au début du mois suivant. Le six mars la sonde soviétique Véga-I, lancée en décembre 1984, passe à 8 900 km du noyau. Le 9 sa jumelle Véga-II en fait autant à 8 200 km. Entre temps, les deux sondes japonaises Suisei et Sakugake sont passées l'une à dix millions de kilomètres, l'autre à 100 000. Enfin, le 14 mars, mettant à profit pour ses dernières corrections les données des Véga, la sonde européenne Giotto passe en « rase-noyau » à 600 km. Elle a malheureusement reçu quatorze secondes plus tôt un jet de poussières qui l'a pratiquement aveuglée... mais jusque-là elle avait pu prendre deux mille clichés de la chevelure, et surtout du noyau.

Celui-ci est surprenant à plus d'un titre. D'abord il est de forme irrégulière, et plutôt rectangulaire que rond. Ensuite il est plus gros que prévu : $8 \times 7 \times 15$ km. Enfin, si sa présence et sa constitution confirment bien le modèle de « boule de neige sale » de Whipple, la neige est vraiment très sale : elle est plus noire que le goudron. Quant à la composition chimique de la chevelure, les instruments de Giotto et des deux sondes Véga en donnent une analyse très riche. Spectromètres infrarouges et spectrographes de masse détectent une grande abondance de grains hydrocarbonés, de nombreuses molécules gazeuses comme l'eau et le gaz carbonique, et des molécules « organiques » beaucoup plus compliquées comme le naphthalène ($C_{10}H_8$) ou le phénanthrène ($C_{14}H_{10}$). On parvient même à mesurer certains rapports isotopiques, par exemple la proportion de deutérium dans l'hydrogène qui forme la glace cométaire. Cette proportion est à peu près deux fois plus forte que sur Terre, comme l'ont confirmé depuis des observations menées à partir du sol sur les deux grandes comètes récentes, Yakutake (1996) et surtout Hale-Bopp (1997). Dans celle-ci, une équipe française, travaillant à l'observatoire du Mauna Kea (Hawaii) à 4 200 m d'altitude, a mis également en évidence la présence d'acide cyanhydrique deutéré. Selon les astrophysiciens, tout ceci révèle pour le matériau des comètes une origine extrêmement lointaine, antérieure à la formation du système solaire : ces composés se forment volontiers dans les conditions interstellaires, où les basses températures favorisent les réactions entre molécules neutres et espèces ioniques, tandis que dans une nébuleuse « solaire » les réactions dominantes sont entre molécules neutres.

Ce très grand âge des comètes en fait, bien sûr, les dépositaires d'« archives » extrêmement précieuses sur l'état présolaire de la matière constituant le système.

C'est cet aspect qui justifie la mise sur pied de la mission spatiale internationale Rosetta, qui doit lancer en 2003 une sonde destinée à se mettre neuf ans plus tard en orbite autour du noyau de la comète Wirtanen, et à y faire « atterrir » un module d'analyse. En même temps, bien entendu, ces résultats permettent de jauger la vraisemblance des théories avancées quant à l'origine – dans le temps et dans l'espace – de ces visiteuses occasionnelles...

D'où viennent les comètes ?

C'est en 1950 que l'astronome hollandais Jan Oort s'attaque au véritable travail de détective consistant à « remonter la trajectoire » des quelques dizaines de comètes à longue période connues à l'époque, c'est-à-dire à tenter de déterminer, pour chacune d'elles, quelle était sa trajectoire avant que l'attraction des planètes la modifie.

Oort constate que toutes ces trajectoires reconstituées sont elliptiques, avec des demi-grands axes compris entre une et deux années-lumière. Aucune de ces comètes n'a une trajectoire initiale hyperbolique, qui révélerait une origine extérieure au système. L'astronome hollandais conclut qu'il existe autour du système solaire un immense « nuage » de comètes, s'étendant à peu près jusqu'à mi-chemin de l'étoile voisine. Ce nuage – appelé depuis « nuage de Oort » – contiendrait mille milliards de comètes, ou plutôt de noyaux parce qu'à cette distance tout est évidemment congelé. De temps en temps les hasards de la gravitation dans le nuage devient une comète. Parfois elle plonge vers le Soleil, et finit par devenir visible, mais le plus souvent elle file vers l'extérieur, vers l'infini. Le nuage de Oort s'épuise donc – depuis des milliards d'années. Pour le réapprovisionner en comètes, on a récemment imaginé un nuage plus central – donc plus stable – situé à moins d'une demi-année-lumière – et baptisé *inner core*.

Mais cela ne rend pas encore compte de l'abondante « famille de Jupiter », qui regroupe les comètes dont l'orbite est proche de l'écliptique et plus petite que celle de la planète géante. Pour cela, les astronomes ont dû inventer un réservoir plus proche, et plat au lieu d'être sphérique : l'anneau de Kuiper, situé aux confins du système planétaire, au-delà de l'orbite de Neptune, à quelques jours-lumière du Soleil. Ce qui fait l'intérêt particulier de cet anneau, c'est que les noyaux qu'il contient sont à la limite de visibilité depuis la Terre : cette limite est à peu près à la magnitude 24 avec les instruments actuels, et certains de ces noyaux ont une magnitude de 21.

On voit que tout cela est encore hypothétique et confus. On voit aussi que ces divers « réservoirs » sont tous assez loin du Soleil pour que le matériau des comètes reste pratiquement identique à ce qu'il était quand ces objets se sont constitués, avant les planètes et l'étoile elle-même ! On aura donc une mine d'informations sur la naissance du Soleil et de ses planètes, le jour où l'on parviendra à ramener sur Terre – ou du

moins à analyser en détail – un fragment de comète. Ce sera peut-être, dans une quinzaine d'années, le résultat triomphal de la mission Rosetta ?

► ARAGO F., *Les comètes*, Paris, Librairie Albert Blanchard, 1986. – BRAHIC A., *Les comètes*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1993. – CROVISIER J. & ENCRENAZ T., *Les comètes, témoins de la naissance du système solaire*, CNRS Éd./Belin « Croisée des sciences », 1995. – LEVASSEUR RIGOURD A.C. & COTARDIÈRE Ph. DE LA, *Halley, le roman des comètes*, Paris, Denoël, 1987. – VERDET J.P., *Le ciel, ordre et désordre*, Paris, Gallimard « Découvertes », 1987.

Jean-Pierre MAURY

→ Brahé ; Expansion de l'univers ; Géocentrisme ; Héliocentrisme ; Newton.

COMPLÉMENTARITÉ

PHYSIQUE

La « complémentarité » est le concept original (et souvent perçu comme paradoxal) de l'épistémologie de Niels Bohr. Il recouvre l'idée d'une relation entre deux descriptions qui, bien que mutuellement exclusives, sont également indispensables pour rendre compte d'une situation de façon exhaustive. On en trouve des esquisses dès la fin de 1926 et le début de 1927 dans la correspondance de Schrödinger et Heisenberg avec Bohr. Mais le premier exposé public n'en fut donné que le 16 septembre 1927 au Congrès international de physique à Côme.

Le concept bohrien de « complémentarité » constitue une réponse globale à plusieurs problèmes qui surgirent au début du XX^e s. avec l'« ancienne théorie des quanta ». Le plus manifeste d'entre eux est la nécessité de faire intervenir à la fois des traits continus et des traits discontinus pour décrire des processus que la physique classique décrivait auparavant soit comme purement continus (ondulatoires) soit comme purement discontinus (corpusculaires). Ce fut Einstein qui le rencontra pour la première fois en 1905. Afin de rendre compte de façon cohérente du spectre du corps noir, de l'effet photo-électrique, et plus largement des processus d'émission ou d'absorption du rayonnement électromagnétique, Einstein se trouva en effet conduit à décrire ce rayonnement comme composé de « quanta de lumière » localisés (plus tard appelés « photons »), en dépit du fait reconnu que les phénomènes de diffraction et d'interférence continuaient à justifier sa description ondulatoire. La première tentative pour surmonter ce conflit apparent consista à imaginer un modèle apte à « conjindre une seule représentation » les descriptions ondulatoire et corpusculaire. Einstein, dont les idées furent plus tard amplifiées par de Broglie, proposa en 1909 de se représenter le rayonnement électromagnétique comme constitué de « points singuliers » entourés d'un « champ de forces ayant, pour l'essentiel, un caractère d'onde plane ». Mais l'évolution ultérieure de la

physique quantique ne favorisa guère cette stratégie de mariage harmonieux des représentations.

En 1925-1926, deux théories distinctes des processus d'échelle atomique furent proposées. L'une, la mécanique matricielle de Heisenberg, était dérivée du modèle corpusculaire des constituants de l'atome dont elle accentuait encore les aspects discontinus. L'autre, la mécanique ondulatoire de Schrödinger, généralisait au contraire un modèle continu. Très vite, il s'avéra que les deux théories fournissaient les mêmes prédictions ; mais leur confluence s'obtenait au prix d'un processus de formalisation qui ne laissait presque plus rien subsister des modèles respectivement corpusculaire et ondulatoire dont elles étaient issues. Du modèle corpusculaire et discontinu, la mécanique matricielle ne retenait qu'un schéma algébrique abstrait, et du modèle continu, la mécanique ondulatoire n'héritait qu'une « fonction d'onde » multidimensionnelle ayant pour seul rôle de permettre de calculer la probabilité d'événements expérimentaux discrets. Ce fut en réfléchissant durant l'automne 1926 et l'hiver 1927 à ces deux circonstances, à savoir la coexistence de théories issues des modèles corpusculaire et ondulatoire et la perte des représentations concrètes associées à ces modèles, que Bohr élabora son concept de « complémentarité ». Selon lui, la différence capitale entre la physique classique et la physique quantique est que dans la première toutes les données expérimentales peuvent être inscrites dans le cadre d'une représentation des objets soumis à l'investigation, alors qu'il est impossible d'épuiser le contenu de la seconde à l'aide d'une seule sorte d'image. Au moins deux espèces d'images mutuellement incompatibles doivent y être employées conjointement « pour représenter tous les aspects des phénomènes » (Bohr, 1929). L'incompatibilité de ces images n'est gênante que si on veut leur attribuer davantage qu'un statut purement analogique ou « symbolique ».

Ce ne fut pas sans hésitation que Bohr qualifia de « complémentaires » ces images symboliques à la fois mutuellement exclusives et conjointement nécessaires. La connotation courante de ce mot n'évoque en effet en aucune manière l'exclusivité mutuelle. Bohr fit donc d'autres propositions terminologiques (comme le vocable « réciprocité » proposé en 1929) avant d'en revenir au mot « complémentarité » dès 1931, faute de mieux.

Parallèlement à la spécification de la situation nouvelle en physique par le concept de « complémentarité », Bohr se mit en quête de sa raison épistémologique. En collaboration avec Heisenberg il identifia cette raison dans le caractère fini du quantum d'action qui interdit de faire la part, dans le phénomène, de ce qui revient à l'objet et de ce qui revient à l'instrument d'observation. Si le phénomène ne peut plus être considéré comme exprimant des propriétés intrinsèques de l'objet, on comprend que chaque image dans laquelle on l'inscrit ne puisse plus prétendre offrir la représentation d'un objet pris en lui-même, mais seulement la caractérisation symbolique d'une situation expérimentale

globale. Chaque image n'est pas celle d'un objet, mais celle d'une visée semi-classique d'objet, impliquée par l'utilisation d'instruments expérimentaux décrits au moyen du langage courant convenablement raffiné par la « terminologie de la physique classique ». À partir de là, il devient possible de rendre compte de l'exclusivité mutuelle des images par l'incompatibilité des procédures expérimentales correspondantes.

Quand on a expliqué la composante d'« exclusivité mutuelle » du concept de « complémentarité », il reste encore à rendre raison de sa composante de « nécessité conjointe ». Mais là surgit une difficulté. Le genre de justification que Bohr offre à l'appui de la composante de « nécessité conjointe » est d'une tout autre nature que celle qu'il a fournie pour la composante d'« exclusivité mutuelle ». Alors que l'exclusivité mutuelle était pour ainsi dire rendue inévitable par les caractéristiques de la classe de situations expérimentales que régit la mécanique quantique, la nécessité conjointe des descriptions ne s'impose qu'en vertu d'une orientation épistémologique. Si Bohr a besoin de considérer que deux descriptions mutuellement exclusives sont aussi conjointement nécessaires, c'est parce qu'il refuse de renoncer complètement à l'idée que nous occupons une « position d'observateurs indépendants de la nature » ; parce qu'il veut continuer à considérer que la variété des images converge vers un objet ou que les diverses expériences s'effectuent sur un même objet ; parce qu'il cherche en somme à éviter que sa propre conception holistique du phénomène aboutisse à un pur et simple opérationnalisme. La complémentarité, qui implique l'idée de descriptions mutuellement exclusives en raison de l'incompatibilité des instruments de mesure, et conjointement nécessaires pour épuiser les informations à propos d'un objet, lui apparaît (après avoir écarté la logique quantique et les théories à variables cachées) comme la seule solution disponible pour sauvegarder quelque chose de l'idée d'une nature objectivée sur laquelle s'exercerait notre activité expérimentale.

Le concept de complémentarité allait par la suite être mis en œuvre pour caractériser des situations de plus en plus éloignées de son lieu d'élaboration original. Commençons par les trois applications qui en furent proposées par Bohr dans le domaine de la physique microscopique : application (déjà étudiée) à la dualité onde-corpuscule, à l'opposition entre description causale et description dans l'espace-temps, et au rapport entre les variables canoniquement conjuguées. La motivation initiale du concept de complémentarité, nous l'avons vu, était de concilier des représentations incompatibles, ondulatoires et corpusculaires, des phénomènes d'échelle atomique. Mais, ainsi que plusieurs historiens de la physique l'ont noté, Bohr a progressivement mis à l'écart l'idée simple d'une complémentarité onde-corpuscule, au profit d'une conception plus abstraite dans laquelle un concept générique de complémentarité apportait une « clarification » indirecte au dilemme de la dualité onde-corpuscule (Bohr, 1958-1962). Pour comprendre cette évolution, il faut se

souvenir que dès la conférence de Côme de 1927, le couple paradigmatique auquel s'appliquait la complémentarité n'était pas tant celui de la représentation ondulatoire et de la représentation corpusculaire que celui de la description causale et de la description des phénomènes dans l'espace-temps. Comme l'explique Heisenberg (1930), un compte rendu causal ne peut être fourni que pour des systèmes isolés, et il est donc exclusif de l'observation des phénomènes dans l'espace-temps qui requiert une interaction inanalysable avec les systèmes. Si l'on ajoute à ceci qu'en mécanique quantique l'évolution de la fonction d'onde est régie sur un mode déterministe par l'équation de Schrödinger, et que la connection de cette fonction d'onde avec l'observation des phénomènes discontinus (d'allure corpusculaire) dans l'espace-temps s'établit à travers la règle probabiliste de Born, on voit très bien comment la complémentarité entre causalité et description spatio-temporelle peut recouvrir indirectement la dualité entre l'image ondulatoire et l'image corpusculaire.

Plus fondamentale encore, peut-être, est la mise en jeu du concept de complémentarité pour des couples de variables « canoniquement conjuguées », comme les coordonnées spatiales et les composantes correspondantes du vecteur quantité de mouvement. Car c'est là qu'on discerne le plus nettement les implications de l'argument de l'exclusivité mutuelle des dispositifs expérimentaux, et c'est aussi dans ce cas qu'on peut le plus facilement comprendre comment Bohr pouvait associer la « nécessité conjointe » à l'« exclusion mutuelle » sans se heurter de plein fouet à une inconsistance logique.

En ce qui concerne le premier point, remarquons ceci : de l'incompatibilité des dispositifs expérimentaux il est en général impossible de dériver l'incompatibilité des attributions correspondantes de valeurs de variables à un objet. En effet, rien n'empêche que d'un côté notre connaissance expérimentale de la position soit incompatible avec notre connaissance expérimentale de la quantité de mouvement, tandis que d'un autre côté l'objet « possède » simultanément les deux propriétés. C'est contre cette interprétation purement épistémologique de l'exclusivité mutuelle des attributions de variables conjuguées, contre la tentation de ne voir dans le concept de « complémentarité » que l'expression d'une ignorance peut-être provisoire, que Bohr s'est inscrit en faux. Il l'a fait à travers sa thèse dite de l'« indéfinissabilité ». Selon la « thèse de l'indéfinissabilité », le dispositif expérimental participe de façon indissoluble à la définition d'une variable ; il n'est pas qu'un simple instrument extrinsèque pour atteindre la valeur supposée intrinsèque de cette variable. Par conséquent, si, en raison de son incompatibilité avec un autre instrument qui opère actuellement sur l'objet, un instrument de mesure donné ne peut pas être utilisé, la valeur de la variable correspondante n'est pas seulement inconnue ; elle est indéfinie.

Ceci étant admis, une autre difficulté surgit : dans quel sens peut-on encore affirmer que les valeurs de

deux variables canoniquement conjuguées sont conjointement indispensables pour épuiser les informations à propos d'un objet ? Si l'on admet la « thèse de l'indéfinissabilité », cela ne peut pas vouloir dire que l'objet putatif possède de quelque manière simultanément les valeurs des deux variables, et qu'il faut les connaître toutes les deux pour disposer d'une connaissance exhaustive sur cet objet. Plusieurs interprétations de rechange ont donc été avancées par des commentateurs contemporains afin de compenser les lacunes de la pensée de Bohr à ce sujet. C. Held a par exemple proposé de considérer que le caractère conjointement indispensable des variables se réfère à la liste des possibilités de mesures que l'on a avant qu'un dispositif expérimental ait été effectivement mis en place. Cette conception permet incontestablement d'éviter une plate contradiction entre les composantes d'exclusivité mutuelle et de nécessité conjointe du concept de complémentarité : ici, l'exclusivité mutuelle renvoie à l'incompatibilité des dispositifs expérimentaux effectivement mis en œuvre, alors que la nécessité conjointe renvoie à des mesures seulement possibles.

Venons-en à présent aux critiques émises contre le concept de « complémentarité ». Certaines de ces critiques portent sur l'une des composantes du concept prise séparément, d'autres sur sa capacité unificatrice. L'idée d'une stricte exclusivité mutuelle des attributions de variables conjuguées a par exemple été mise en cause récemment par des travaux portant sur les « mesures imprécises » (« unsharp measurements ») : ces attributions ne sont exclusives l'une de l'autre que si leur précision excède la limite fixée par les relations d'« incertitude » de Heisenberg. L'utilité de la « thèse de l'indéfinissabilité » a par ailleurs été contestée à la suite de la renaissance des théories à variables cachées. Comme l'écrit D. Bohm, rien n'empêche « notre pur regard conceptuel » de considérer ces variables comme définies indépendamment de la mise en œuvre de l'instrument qui permet de les mesurer. On peut cependant remarquer que la conception holistique du phénomène que soutient Bohr possède un équivalent dans toute théorie à variables cachées apte à reproduire les prédictions de la mécanique quantique. Cet équivalent, c'est l'influence expérimentalement inanalysable du dispositif de mesure sur les propriétés supposées intrinsèques des objets : selon D. Bohm, même si le processus d'interaction entre l'appareillage et les objets peut être [...] analysé par la pensée, [...] il ne peut pas être effectivement divisé sans changer radicalement sa nature ». Une autre critique partielle du concept de complémentarité porte sur la composante de nécessité conjointe. Supposons que l'on partage avec Bohr le désir d'éviter une conception purement opérationnaliste de la mécanique quantique ; et supposons également que l'on ait adopté pour cela la stratégie consistant à cerner l'objet de l'investigation par l'ensemble coordonné des mesures que l'on pourrait effectuer sur lui. Cela impose-t-il pour autant de considérer que la structure des possibilités de mesures qui se

rapportent à un même objet quantique est identique à la structure des possibilités de mesures qui se rapportent à un point matériel de la mécanique classique ? Pourquoi (si ce n'est par souci de continuité historique) un objet quantique devrait-il voir converger vers lui les valeurs des variables position et quantité de mouvement qui caractérisent conjointement l'état d'un point matériel de la physique classique ? Telles sont les questions qu'adressait Schrödinger à Bohr.

Schrödinger formulait aussi en 1949 une critique plus grave et plus globale contre la complémentarité : celle de n'être qu'un mot-valise recouvrant des cas profondément dissemblables. À ses yeux, la question du parallélisme entre l'évolution continue de la fonction d'onde et la série des phénomènes discontinus observés dans l'espace-temps doit être soigneusement distinguée de celle de la relation entre variables conjuguées ; et cette dernière relation, à son tour, doit être soigneusement distinguée de la question de l'articulation entre les connections longitudinales de phénomènes expérimentaux ponctuels (qui évoquent des trajectoires corpusculaires) et les connections transversales de ces mêmes phénomènes (qui évoquent des plans d'ondes).

Au-delà de la physique quantique, Bohr a également proposé des applications du concept de « complémentarité » en psychologie, en anthropologie, ou en biologie. Selon lui, la mise en œuvre d'un même instrument de pensée (la « complémentarité ») dans des domaines aussi variés ne se justifie pas par une vague et problématique similitude des objets à connaître, mais seulement par une analogie des situations qu'occupe le sujet connaissant par rapport à eux. Dans tous les cas, on se heurte à l'impossibilité de séparer complètement l'objet des moyens d'investigation dont dispose le sujet. Et dans tous les cas également on répond à cette impossibilité par la stratégie consistant à étudier l'objet en multipliant les perspectives mutuellement exclusives. Cela est particulièrement manifeste en psychologie introspective, où l'objet examiné ne se distingue pas univoquement de la pensée du sujet qui l'examine (Bohr, 1929). La physique n'aurait donc fait au total que redécouvrir pour son propre compte une situation cognitive d'implication du sujet dans son objet d'investigation déjà familière dans les sciences humaines. On peut comprendre à partir de là que la complémentarité ait été saluée par certains auteurs comme un patrimoine commun aux sciences de la nature et aux sciences de l'homme, ou comme une clé permettant de comprendre le rapport entre ces deux approches scientifiques. Comme l'écrit par exemple K.O. Apel après s'être référé explicitement à Bohr, « les intérêts dominants de connaissance correspondant à la science objectivante d'un côté, et la compréhension herméneutique de l'autre côté, s'excluent en même temps qu'ils se complètent ». Le problème est que s'il est facile à Apel de montrer en quoi les deux procédés s'excluent mutuellement, ses arguments en faveur de leur aptitude à se compléter restent inaboutis. Mais pouvait-il en être autrement dans la situation de

clair-obscur où Bohr lui-même avait laissé la question de la « nécessité conjointe » des déterminations ?

► APEL K.O., *Understanding and explanation*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1984. — BITTOL M., *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Paris, Flammarion « Champs », 1997 ; *Schrödinger's philosophy of quantum mechanics*, Kluwer, 1996. — BOHM D. & HILEY B.J., *The undivided universe*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1993. — BOHR N., *La théorie atomique et la description des phénomènes*, Sceaux, J. Gabay, 1993 ; *Physique atomique et connaissance humaine*, introd. et glossaire C. Chevalley, Paris, Gallimard « Folio », 1991 ; *Essays 1958-1962 on atomic physics and human knowledge*, Ox Bow Press, 1987. — FAYE J., *Niels Bohr : his heritage and legacy*, Kluwer, 1991. — FOLSE H., *The philosophy of Niels Bohr : the framework of complementarity*, Amsterdam, North-Holland, 1985. — HEISENBERG W., *Les principes physiques de la théorie des quanta*, Paris, Gauthier-Villars, 1972. — HELD C., « The meaning of complementarity », *Studies in History and Philosophy of Science*, 25, 871-893, 1994. — HERMANN G., *Les fondements philosophiques de la mécanique quantique*, introd. et postface L. Soler, Paris, Vrin, 1996. — LURCAT F., *Niels Bohr*, Paris, Critéion, 1990. — MURDOCH D., *Niels Bohr's philosophy of physics*, Cambridge Univ. Press, 1987. — PLOTNITSKY A., *Complementarity*, Duke Univ. Press, 1994. — WEIZSÄCKER C.F. VON, *The world view of physics*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1952.

Michel BITTOL

→ Controverse Bohr-Einstein ; Corpuscule ; Einstein ; Matière [PHYSIQUE] ; Quantique ; Schrödinger.

COMPLEXITÉ

Que la complexité soit longtemps apparue comme un concept peu digne de l'attention des scientifiques, ne surprend guère : perçue comme la caractéristique « d'un état de chose [...] qui nous égare, nous interdit la moindre prévision, nous ôte toute possibilité de raisonner sur l'avenir » (P. Valéry, *Regards sur le monde actuel*, *Œuvres*, Pléiade, t. II, p. 1059), elle se présente en des termes bien dissuasifs devant une science qui se donne vocation de prévoir ou au moins de rendre possibles les raisonnements sur l'avenir ! Le mot lui-même apparaît au XVIII^e s. pour désigner un ensemble ou un phénomène contenant et unissant des éléments différents (*complexus* exprime à la fois les actions de contenir et d'entrelacer ou de plier), et c'est sans doute l'étrangeté de cette hétérogénéité qui suscita longtemps le désarroi du scientifique épris de rigueur cartésienne. Comment une telle hétérogénéité pourrait-elle « se présenter clairement et distinctement en son esprit » (1^{er} précepte du *Discours de la Méthode*) s'il ne peut « la diviser [...] en autant de parcelles qu'il se pourrait » (2^e précepte) ? S'il ne peut « distinguer les choses les plus simples », comment pourrait-il « s'élever par degré à la connaissance de toutes les autres » ? (R. Descartes, Règles IV et V des *Règles pour la direction de l'esprit*).

Certes, en tâtonnant, certaines disciplines scientifiques cherchèrent à apprivoiser « le complexe » sinon la complexité, en désignant sous ce nom ces êtres

étranges irréductibles à une entité « simple » et pourtant suffisamment stables pour être reconnaissables, sinon connaissables. La chimie inventa les complexes « formés d'éléments différents et indépendants », la mathématique inventa les nombres complexes « qui associent nombres réels et nombres imaginaires » et la psychologie inventa les complexes (d'Édipe ou d'infériorité) qui popularisèrent la psychanalyse...

Mais ces concepts valises sont encore tenus pour des intermédiaires provisoires, crochets de fixation éventuellement utiles pour l'escalade scientifique que l'on devrait pouvoir abandonner lorsqu'on parviendra au sommet. En en appelant, au terme d'une des plus exceptionnelles des réflexions épistémologiques du XX^e s., à « l'idéal de complexité de la science contemporaine », dès 1934 (*Le nouvel esprit scientifique*, p. 147), G. Bachelard allait soudainement inviter les scientifiques à transformer radicalement leur regard : hier, indigne d'attention, la complexité ne pourrait-elle devenir désormais l'idéal de la science ? « Alors que la science d'inspiration cartésienne faisait très logiquement du complexe avec du simple, la pensée scientifique contemporaine essaie de lire le complexe réel sous l'apparence simple fournie par les phénomènes compensés » (*Le Nouvel Esprit scientifique*, p. 143).

Cette invitation ne fut sans doute pas entendue très volontiers sur le champ, malgré la variété des exemples et la richesse des arguments du *Nouvel Esprit scientifique*. Aujourd'hui encore, nombreuses sont les institutions scientifiques qui affectent de l'ignorer. Mais le message circule suffisamment de par le monde pour que cinquante ans plus tard, on puisse légitimement parler de « Sciences de la complexité ». C'est en 1984 que se tient le premier colloque de l'université des Nations Unies sur le thème « Science et pratique de la complexité » (à Montpellier, en France, *Actes en français* sous ce titre à la Documentation française, 1986), et que se constitue aux États-Unis d'Amérique l'Institut d'étude des Sciences de la Complexité de Santa Fé, Nouveau Mexique (qui publiera en 1989 les premières Conférences en sciences de la complexité, D.L. Stein éd., Addison Wesley).

Un rapide survol de ces cinquante premières années de la formation effective de « l'idéal de complexité » dans la science contemporaine, permettra de mettre en valeur la complexité ou le caractère polyphonique de son développement épistémique et pragmatique, développement dont on proposera ensuite un portrait d'épave.

« L'idéal de complexité de la science » : les cinquante premières années

Si les premiers textes publiés relégitimant le statut épistémologique et scientifique de la complexité peuvent être datés de 1934, l'appropriation effective par la communauté scientifique de ce concept tenu pour incongru depuis trois siècles (*Le Discours de la Méthode* paraît en 1637) ne se manifestera qu'à partir de 1948.

L'article « Science et Complexité » de W. Weaver (publié dans *American Scientist*, vol. 36, p. 536-544) est considéré comme le coup d'envoi du paradigme des Sciences de la Complexité telles qu'elles se développent depuis cinquante ans. Méditant sur la formation de la politique scientifique au sortir de la Seconde Guerre mondiale, W. Weaver (alors directeur de la Rockefeller Foundation, New York) s'interroge sur les fonctions et les responsabilités de la science dans « le développement de l'avenir de l'humanité », fonctions qu'il s'efforce de mettre en perspective en interprétant la chronique des transformations paradigmatiques de la science moderne, du XVII^e au XX^e s. Ni W. Weaver ni G. Bachelard n'utilisaient l'expression « paradigme scientifique », qui n'apparaîtra qu'en 1963, sous la plume de T.S. Kuhn, dans la *Structure des révolutions scientifiques*, l'expression « paradigme de la complexité » ne se stabilisant qu'en 1977 et 1986 par les premiers tomes de *La Méthode* d'E. Morin. Mais c'est bien à ce concept qu'ils se réfèrent : G. Bachelard intitulerait le chapitre dans lequel il introduit l'idéal de complexité de la science contemporaine : « Pour une épistémologie non cartésienne », et W. Weaver proposera en 1948 de lire cette histoire de la science moderne en y reconnaissant les émergences successives de trois paradigmes : 1) Le paradigme de la simplicité se développe de 1600 (Galilée, Descartes...) à 1800 (Condorcet, Lavoisier, Laplace...). Les modèles de la mécanique physique (ou classique ou rationnelle...) se stabilisent et deviennent durablement les modèles de référence de tout savoir scientifique : objectif, causaliste, quantitatif... et certain. 2) Le paradigme de la complexité désorganisée se forme à partir de 1850 avec le développement de la thermodynamique et de la cinétique chimique (Carnot, Clausius, Boltzmann). Les modèles de la mécanique statistique et de la théorie des probabilités vont permettre la formation de savoirs dans les champs de la biologie, de l'agronomie, de l'économie et bientôt de la physique quantique. 3) Le paradigme de la complexité organisée émerge à la fin des années 1940, assure W. Weaver, sous la pression des « nouveaux problèmes » (biologiques, médicaux, psychologiques, économiques, politiques...) que les sociétés contemporaines posent à la science « lui imposant cette troisième grande avance » ; trop compliqués pour être appréhendables par les modèles de la mécanique rationnelle et pas assez désordonnés pour être interprétés par les modèles de la mécanique statistique, ce type de problèmes que la société pose désormais à la science requiert des savoirs qui privilégient la variété et l'hétérogénéité des facteurs à considérer et leurs interactions spatiales et surtout temporelles. Les méthodes linéaires et causalistes (« les longues chaînes de raison toutes simples dont les géomètres ont coutume de se servir », 3^e précepte du *Discours de la Méthode*) ne permettent pas de les aborder, ni au niveau microscopique par la mécanique rationnelle, ni au niveau macroscopique par la mécanique statistique. L'émergence d'un nouveau paradigme scientifique permettant de « traiter simultanément un grand nombre de facteurs interreliés au sein d'un tout

organisé » était sans doute à peine « visible » en 1947-1948, lorsque W. Weaver l'annonça en montrant sa nécessité et son urgence plutôt qu'en l'illustrant par quelques contributions scientifiques convaincantes. Son mérite sera grand d'avoir su l'anticiper par une réflexion éthique et politique et d'avoir reconnu en deux disciplines alors très embryonnaires, les prémices observables de sa thèse : nous les appelons aujourd'hui l'informatique et la recherche opérationnelle (il parlait des « nouveaux types de machines computantes électroniques » et de « l'analyse des opérations par des équipes multi-disciplinaires »).

En 1947-1948, W. Weaver était lui-même très impliqué dans les premiers développements de la « théorie mathématique de la communication » formalisée peu avant par C. Shannon et popularisée peu après sous le nom de « théorie de l'information de Shannon et Weaver » (1948). En même temps, il était concerné au premier chef (du fait de ses responsabilités à la Fondation Rockefeller) par les premiers pas de la cybernétique qui naissait de la collaboration du mathématicien N. Wiener, du neuro-physiologue mexicain A. Rosenblueth et de l'ingénieur électronique J. Bigelow, et qui allait se développer intensément par la série des désormais célèbres Conférences Macy. C'est sans doute pour cela qu'il ne mentionne pas explicitement la théorie de l'information et la cybernétique dans son texte (ces désignations n'apparaissent que peu après : on parlait alors de « causalité circulaire et de mécanismes de feedback dans les systèmes biologiques et sociaux » !), nouvelles disciplines qui, étroitement reliées à l'informatique et à la recherche opérationnelle, allaient donner à la science un aspect épistémologique très nouveau à partir des années 1950. Par leur conjonction, le paradigme annoncé de la complexité organisée allait devenir en quelques années un paradigme observé s'inscrivant durablement dans les discours des communautés scientifiques de la seconde moitié du XX^e s. Ce paradigme de la complexité organisée, en s'institutionnalisant progressivement dans les cultures scientifiques, donnait sens au manifeste de G. Bachelard sur *Le Nouvel Esprit scientifique* en rendant visible « l'idéal de complexité de la science contemporaine » par un détour que l'on ne pouvait sans doute pas anticiper avant la Seconde Guerre mondiale, celui des nouvelles sciences de l'artificiel, sciences des systèmes, se construisant en quelques projets délibérés de connaissance et non plus sur un objet donné par la Nature et s'imposant au scientifique. Détour dont G. Bachelard avait pourtant eu le pressentiment en introduisant *Le Nouvel Esprit scientifique* : « La méditation de l'objet par le sujet prend toujours la forme du projet » (p. 15).

En 1950, lorsque paraît l'article « Science et Complexité » de W. Weaver, accompagné de ces quelques nouvelles sciences qui légitiment pragmatiquement le paradigme de la complexité organisée, cet « idéal de complexité de la science contemporaine » est perçu comme un idéal local, qui ne saurait concerner toute la science. L'idée même d'un idéal de complexité

n'est pas volontiers entendue par les institutions scientifiques, et le « concept épistémologique de simplicité » (rappelé par K. Popper dans un chapitre de *La logique de la découverte scientifique* dès 1935 et popularisé par ses premières éditions en anglais en 1959) est considéré comme étant « d'une importance capitale ». Avant tout, soulignera K. Popper, « notre théorie explique pourquoi la simplicité est tellement désirable » (p. 143, italiques de K. Popper).

Le paradigme de la complexité et les sciences de la complexité ne se constitueront dans la forme où nous les connaissons aujourd'hui qu'à partir des années 1975-1985 (on parlera alors du paradigme de la complexité organisante), lorsque le ressourcement épistémologique qu'ils appelaient et qu'ils nécessitaient parviendra à se manifester au terme de quatre décennies de maturation dissimulée sous le voile longtemps tenu pour rassurant du positivisme logique et de ses multiples variantes. C'est en pragmatiste et non en épistémologue que W. Weaver relégitime en 1948 le concept de complexité dans la science, et rares seront les scientifiques et les épistémologues qui s'interrogeront entre 1945 et 1975 sur le statut et la légitimité des nouvelles sciences qui vont se constituer et se développer en se référant au paradigme de la complexité organisée.

Ces quarante années de relative inattention épistémologique handicaperont sans doute le développement immédiat des nouvelles sciences que l'on présentera souvent sous le label des sciences des systèmes, mais elles connaîtront une sorte de bouillonnement créatif qui contribuera à transformer en profondeur les conventions régissant les rapports complexes de la science et de la société, modifiant ainsi progressivement la conception de la politique scientifique dans les sociétés démocratiques.

On peut évoquer succinctement ce bouillonnement d'abord pragmatique, puis peu à peu plus épistémologique, en mentionnant quelques-uns des repères qui semblent aujourd'hui les plus saillants dans le récit de cette reconnaissance de « l'idéal de complexité de la science contemporaine ».

Si le mathématicien N. Wiener, accompagné de A. Rosenblueth et J. Bigelow, en proposant entre 1943 et 1948 d'instituer une nouvelle discipline qu'il proposa d'appeler la cybernétique, science de la communication et de la commande dans les systèmes naturels et les systèmes artificiels, eut manifestement l'intuition forte de la « révolution spirituelle que nécessite l'invention scientifique » (G. Bachelard, 1938, p. 16) ou de « la Révolution scientifique » (T.S. Kuhn, 1963) qu'il allait ainsi susciter (son désormais célèbre article de 1943 « Comportement, intention et téléologie », *Philosophy of science*, 10, p. 18-24, en témoigne), il ne semble pas que cette prise de conscience épistémologique ait été largement partagée par les éminents scientifiques qui s'associaient initialement à ce projet. La réputation scientifique incontestée des animateurs principaux des dix Conférences Macy, (réunies explicitement sous l'intitulé de la cybernétique à partir de 1949,

à l'initiative d'H. von Foerster qui venait de rejoindre ce groupe d'une trentaine de participants, parmi lesquels les mathématiciens N. Wiener, J. von Neumann et L. Savage, le bio-neurologue W. MacCulloch, les anthropologues G. Bateson et M. Mead, le psychologue K. Lewin, etc.) suffisait sans doute à rassurer les institutions scientifiques quant à la légitimité épistémologique de cette entreprise étonnante. La cybernétique s'est développée dans le premier berceau effectivement interdisciplinaire qu'ait connu la science moderne. Les Conférences Macy n'eurent d'ailleurs pas en leur temps une grande notoriété ; ce n'est qu'à partir de 1980, alors que la première cybernétique n'apparaissait plus que comme le premier étage presque oublié d'une fusée qui portait les sciences des systèmes, de l'information, de la computation et de la cognition, que les méditations épistémologiques requises par ces nouvelles sciences de la complexité incitèrent les chercheurs à remonter aux sources et à s'intéresser à la genèse de ce nouveau paradigme. On n'y trouve que peu de traces d'une réflexion épistémologique délibérée, le mot cybernétique lui-même ayant été retenu pragmatiquement, semble-t-il, pour éviter les conflits que suscitait le mot téléologie initialement proposé par N. Wiener, et contesté par J. von Neumann. L'appel épistémologique de G. Bachelard à l'idéal de complexité de la science contemporaine n'était pas encore reçu quinze ans après dans les communautés scientifiques anglo-saxonnes. C'est sans doute ce qui explique pour une bonne part l'essoufflement relativement rapide de la première cybernétique. Mais ces premières années 1946-1953 allaient en quelque sorte « crédibiliser » les autres initiatives se développant au sein du paradigme de la complexité organisée, leur apportant dans les années 1950 ce surcroît de notoriété dont ont besoin les innovateurs. C. Shannon développant la théorie de la communication, A. Turing développant la théorie de la computation, R. Ashby développant les théories de la régulation intelligente et de « la variété requise », H.A. Simon et A. Newell développant la théorie de l'intelligence artificielle et les nouvelles sciences de l'ingénierie ou L. von Bertalanffy développant la théorie du système général. Et surtout, deux des « anciens » des Conférences Macy, le bio-informaticien H. von Foerster et l'anthropologue G. Bateson, qui vont reprendre explicitement le flambeau de la « complexité organisée », en développant les premières théories de l'auto-organisation (H. von Foerster, 1959) et de l'écologie de l'esprit (G. Bateson, 1963).

Sur ces matériaux, qui s'accroissent en s'internationalisant jusque vers 1980, vont se déployer les principales branches du paradigme de la complexité organisée que l'on peut reconnaître à la fin du *XX^e* s. Elles semblent issues des paradigmes fondateurs que reconnaissait W. Weaver : (a) le paradigme réductionniste de la simplicité s'étant « compliqué » plutôt que complexifié dans le développement des théories de la complexité computationnelle et des réseaux d'automates programmables ; (b) le paradigme holiste de la

complexité désorganisée s'étant « ordonné » plutôt que complexifié dans le développement des théories du chaos déterministe et de la dynamique des systèmes non linéaires ; (c) le paradigme systémique (ou interactionniste) de la complexité organisée se constituant à l'interface des deux premiers dans les années 1970 (lorsque la modélisation systémique se formait en « ouvrant » la modélisation cybernétique, contraint par son postulat de « fermeture »), allait permettre la conjonction des théories de l'organisation programmable et bouclante (a), et des théories de l'information nég-entropique (b), conjonction qui conduira aux théories de l'auto-adaptation et de l'auto-poïèse (H. Maturana & F. Varela, 1975), qui vont transformer l'étude des processus évolutifs naturels, cognitifs et sociaux, concernant ainsi rapidement toutes les disciplines tant anciennes que nouvelles (écologie, immunologie, météorologie, géo-physiologie...).

Le développement de concepts modélisateurs alors originaux, tels que ceux de la théorie des catastrophes et de la morphogénèse structurelle (R. Thom, 1972), ceux de la théorie des champs fractals et multifractals (B. Mandelbrot, 1982), ceux de la théorie des bifurcations et des structures dissipatives (I. Prigogine & G. Nicolis, 1977), la théorie des états critiques (P. Bale, 1985), la théorie du chaos déterministe (D. Ruelle, 1991), la théorie de la complexité algorithmique ou computationnelle (A. Kolmogorov, 1965 et G.J. Chaitin, 1987), va provoquer l'essor des méthodes de simulations informatiques comme outils d'investigation.

Les modèles de réseaux neuronaux (Hopfield, 1982) ou les algorithmes génétiques (J.M. Holland, 1975) vont permettre de « réaliser » des automates cellulaires auto-reproducteurs et auto-adaptatifs. De nouveaux modes d'expérimentation apparaissent ainsi, suggérant des interprétations plausibles de phénomènes que l'on tenait jusqu'alors pour inintelligibles... ou trop complexes pour être explicables : les travaux récents sur la vie artificielle (C.G. Langton, 1989), l'intelligence collective (Bonabeau & Teraulaz, 1995), l'apprentissage (G. Clergue)... en proposent quelques illustrations.

L'émergence du paradigme de la complexité organisante

Cette étonnante effervescence scientifique des années 1945-1975 qu'annonçait l'article « Science et complexité » de W. Weaver, semble s'être longtemps développée sans accorder beaucoup d'attention à sa propre légitimité épistémologique. Perçues comme marginales et ancillaires par les institutions scientifiques, ces nouvelles sciences se présentent sans contester les conventions épistémologiques alors généralement acceptées, sous l'ombre tutélaire desquelles elles assurent se placer. Elles veillent d'ailleurs à ne pas provoquer l'Institution en ne se référant que rarement de façon explicite au concept de complexité. La bibliographie consacrée aux systèmes complexes

par J.V. Cornacchio en 1977, compte à peine une centaine d'entrées (JGS, 3, p. 267-271), alors que la bibliographie consacrée à la recherche sur les systèmes en général, éditée la même année par G. Klir *et al.* (U.C. Binghamton, 1977) compte plus de 1 400 entrées, pour la même période 1945-1976 (l'édition suivante, qui couvre la période 1977-1984 compte plus de 2 000 entrées). Certes, ces références sont principalement anglo-saxonnes, mais il ne semble pas qu'avant 1975, les autres continents aient été très attentifs aux développements du paradigme et des nouvelles sciences de la complexité. Peut-être était-ce dû, au moins pour une part, à la dubitation que suscitait alors en Europe le pragmatisme exacerbé des pionniers nord-américains des nouvelles sciences de la complexité ?

Comment prendre au sérieux ces chercheurs qui affectent de ne pas s'interroger sur le sens et la légitimité épistémologique de ce qu'ils font, s'attachant d'abord à l'efficacité apparente des « résultats » ? Il est vrai que les chercheurs européens eux aussi ignoraient pour la plupart l'appel à « l'idéal de complexité de la science contemporaine » lancé par G. Bachelard en 1934. Le célèbre biologiste français J. Monod (qui avait su s'approprier dès 1960 les concepts de modélisation cybernétique pour développer, avec F. Jacob et A. Lwoff les nouvelles thèses de la biologie moléculaire qui allaient leur valoir le prix Nobel en 1964) ne préférait-il pas en 1973 la traduction française de *La logique de la découverte scientifique* de K. Popper (publiée initialement en allemand en 1935) sans s'apercevoir que ce texte de référence du concept épistémologique de simplicité (p. 13) était contemporain du *Nouvel Esprit scientifique* de Bachelard (1934), tout en moquant cette « sociologie fermée de la philosophie française qui ne semble [...] ouverte [...] qu'aux plus obscures extravagances de la métaphysique allemande » (K. Popper, 1973, p. 1).

Sans doute G. Canguilhem avait-il fait traduire et publier dans *Les Études philosophiques*, vol. 16, n° 2, le texte de l'article de N. Wiener, A. Rosenblueth et J. Bigelow de 1943 sous le titre « Comportement, Intention et Téléologie », en attirant l'attention des épistémologues francophones sur « l'intérêt singulier de ces notions que rencontreront cybernéticiens et philosophes ». Mais il ne semble pas que cette annonce d'une révolution scientifique qui restaurait la téléologie, science des processus de finalisation dans les cultures scientifiques, ait à l'époque été perçue comme un événement épistémologique notable. C'est à J. Piaget que revient le mérite d'avoir tenté le premier de relever le défi épistémologique que la cybernétique posait à la science. Il demanda au cybernéticien américain S. Papert de rédiger la première étude dont on trouve trace aujourd'hui sur l'épistémologie de la cybernétique, étude qu'il inséra dans la célèbre encyclopédie « Pléiade » Logique et Connaissance scientifique qu'il dirigea en 1967. Certes, lu trente ans après, ce texte sans précédent propose une argumentation que l'on trouvera légère. Mais il allait avoir le mérite de

poser publiquement une question jusqu'ici tenue pour incongrue et il ouvrait en quelque sorte la boîte de Pandore : dix ans plus tard, l'épistémologie (des sciences) de la complexité devenait une question légitime et surtout suscitait nombre de réflexions et de recherches qui vont non seulement transformer le paradigme de la complexité organisée, mais aussi affecter les méditations épistémologiques de toutes les disciplines scientifiques, qu'elles se réfèrent ou non à « l'idéal de complexité de la science ». On peut citer quelques textes aujourd'hui classiques. En 1969, H.A. Simon publie *The Sciences of the Artificial* qu'il ordonne autour de son dernier chapitre : « L'architecture de la complexité » (initialement publié en 1962).

En 1973, E. Morin publie : *Le Paradigme perdu : la nature humaine*, qui va introduire les tomes successifs de *La Méthode* (le tome I : *La Nature de la nature* en 1977, le tome II : *La Vie de la vie* en 1980). En 1973 paraissent aussi les *Cahiers* de P. Valéry (éd. J. Robinson, Gallimard « Pléiade »), édition qui va permettre d'accéder à l'une des méditations épistémologiques les plus riches du xx^e s. En 1979 paraissent *Entre Le Cristal et la fumée, essai sur l'organisation du vivant*, d'H. Atlan, *La Nouvelle Alliance* d'I. Prigogine et I. Stengers, *Le Paradoxe et le système* d'Y. Baril. En 1981 paraît *Observing Systems* d'H. von Foerster (colligé par F. Varela). En 1984, *La sfida della complessità (Le Défi de la complexité)*, édité par G. Bocchi et M. Ceruti, témoignera de la vitalité des réflexions sur l'épistémologie de la complexité au sein de la communauté scientifique italienne. Il faut renoncer à poursuivre ici l'énumération de ces matériaux, dont la liste s'allonge de façon impressionnante depuis quinze ans, sans que l'on puisse encore distinguer aisément les réflexions effectivement innovantes des multiples tentatives locales.

L'apport de cette exceptionnelle effervescence épistémologique des années 1970 au paradigme de la complexité va s'avérer assez puissant pour provoquer une sorte de second souffle dans les recherches conceptuelles et expérimentales qui vont permettre aux sciences de la complexité d'avoir désormais « pignon sur rue » dans les institutions scientifiques au fil des années 1980, le colloque de l'UNU de 1984 : Science et pratique de la complexité donnant symboliquement acte de cette légitimation scientifique. Elle va incidemment contribuer à relancer les questionnements et les remises en question des paradigmes épistémologiques de référence (post-positivisme, réalisme, rationalisme critique...) qui semblaient stagner dans les cultures scientifiques en s'installant dans les académies (« science égale ordre et progrès » !).

On peut camper les traits aujourd'hui les plus saillants de ce questionnement épistémologique, s'interrogeant sur la légitimation des énoncés enseignables que produisent ces nouvelles sciences (et sans doute aussi, par là-même, les anciennes) en soulignant quelques-uns des arguments les plus fréquemment évoqués (évoqués mais parfois discutés sur le mode des querelles des Anciens et des Modernes, ici des

positivistes-et-réalistes appréhendant les constructivistes). Ou, pour reprendre une distinction proposée dès 1934 par G. Bachelard, une discussion entre les tenants des épistémologies cartésiennes et ceux des épistémologies non cartésiennes ; « non cartésien » ne devant pas être entendu comme « anti-cartésien » mais comme « différent » : des épistémologies se développant sur d'autres hypothèses fondatrices que celles du dualisme sujet-objet et de l'objectivisme, du réductionnisme, du causalisme efficient et linéaire, du déductivisme et de la complétude, auxquelles se réfèrent les épistémologies cartésiennes dans leurs variantes réalistes et positivistes. Ces traits saillants – ou ces hypothèses épistémologiques « différentes » – peuvent aujourd'hui être présentées comme les caractéristiques du paradigme (des sciences) de la complexité tel qu'on peut le reconnaître à la fin du xx^e s.

Puisque l'on s'est aidé du modèle de la genèse des sciences de la complexité en trois étapes, proposé en 1948 par W. Weaver pour organiser la présentation de ce déploiement progressif du paradigme de la complexité, on peut en prolonger l'interprétation en identifiant une quatrième étape qui deviendrait visible à partir de 1975-1980. Intégrant et assumant les développements suscités au sein du paradigme de la complexité organisée dans les domaines de la complexité computationnelle (complexité algorithmique, réseaux d'automates...) et de la complexité de la dynamique des systèmes non linéaires, le paradigme de la complexité organisante permet non seulement une réinterprétation épistémologique plausible des acquis, mais aussi une incitation à de nouvelles explorations suscitant de nouveaux modes d'intelligibilité des multiples complexités que perçoivent au fil du temps les humains dans leurs rapports mutuels et avec leurs univers. Ces processus cognitifs de modélisation « organisante » des phénomènes perçus complexes s'auto-caractérisent par la discussion de ces « traits saillants » que l'on peut tenir pour les quelques principes actuellement formulés de la modélisation de la complexité (modélisation étant à entendre ici dans son sens habituel : l'action de modéliser, ou de représenter en des termes communicables, plutôt que dans son sens restreint de « résultat » de cette action, les modèles).

Les principes de la modélisation de la complexité organisante

La complexité, « imprévisibilité essentielle... et intelligible ». – En proposant d'entendre la complexité d'un phénomène ou d'un système par l'incertitude que l'observateur attribue à leur comportement futur, P. Valéry établissait une distinction épistémologique qui allait s'avérer très importante entre la complexité et la complication, voire l'hyper-complication. La complication d'un phénomène implique que l'on puisse, fût-ce au prix d'un exercice de computation très onéreux, toujours déterminer de façon tenue pour certaines ses états ou ses comportements dans toutes les conditions que l'on envisage. Les évolutions de ce système

doivent pouvoir être prédites, éventuellement sous forme probabilisée, à l'aide d'algorithmes programmables. La liste des états possibles est présumée connaissable *a priori* et l'on sait décrire un itinéraire ou un « programme » au moins dans cet « espace d'états » défini indépendamment de l'observateur, permettant de déterminer un état futur du phénomène ou d'atteindre un état souhaité par ou pour ce système : une théorie (ou une loi, ou une structure invariante) explique le comportement du phénomène, le rendant ainsi prévisible. Les limites de capacité computationnelle de l'observateur compromettent parfois en pratique cette possibilité de prédiction par le calcul ou par l'application de la théorie, dans les situations d'hyper-complication (un calcul balistique qui demanderait plusieurs jours à une dizaine de calculateurs humains expérimentés, alors que les résultats de ce calcul doivent impérativement être disponibles dans les prochaines minutes).

Mais l'invention des machines computantes (ou ordinateurs) allait permettre de repousser très loin ces limites, ce qu'avait auguré W. Weaver, annonçant l'âge de la complexité organisée.

La complexité, par contraste se définit comme la caractéristique d'une situation dans laquelle l'observateur sait *a priori* qu'il ne connaît de façon certaine ni la liste de tous les états possibles que le phénomène est susceptible de manifester (fût-ce de façon fugace) ni celle de tous les programmes qui permettent d'atteindre tel de ces états. Autrement dit, le système est susceptible de manifester un comportement imprévisible pour cet observateur. Situation fréquente dans la vie quotidienne des humains, qu'ils s'intéressent à leurs relations mutuelles ou à leurs relations avec l'univers ! Mais situation qui avait longtemps découragé les scientifiques peu incités à examiner des problèmes qu'ils pensaient ne pas pouvoir résoudre de façon certaine (... ou « scientifique », disait-on), puisque les solutions ne peuvent *a priori* être déterminées. En invitant la science à chercher, plutôt que des explications, « des représentations sur lesquelles on pût opérer, comme on travaille sur une carte, [...] et qui puissent servir à faire », P. Valéry (*Cahiers*, « Pléiade », 1, p. 854) proposait de modifier les termes du défi. En passant d'un objectif d'explication à un objectif de compréhension ou d'intelligibilité (pour reprendre sommairement une distinction classique établie par W. Dilthey, dans *L'Introduction aux sciences de l'esprit*, 1883), la science ne peut-elle contribuer à rendre intelligibles des comportements qui, non certainement prévisibles, peuvent s'avérer plausibles sinon probables... au moins pour les observateurs qui ont pour projet de s'y intéresser ?

En ne confondant plus l'imprévisible et l'inintelligible, et en convenant de la possible imprévisibilité des comportements observables, la science ne se met-elle pas en situation d'atteindre cet idéal de complexité que les humains peuvent lui proposer ? La complexité devient alors une caractéristique phénoménologique (« imprévisibilité essentielle ») plutôt qu'ontologique

(enchevêtrement d'un grand nombre de composants en interaction), tout en tirant le grand bénéfice des nombreuses études développées sur cette définition initiale de la « complexité organisée ».

La complexité est-elle « dans l'esprit des hommes ou dans la nature des choses » ? – Le paradigme de la complexité organisée impliquait une hypothèse forte sur l'indépendance de la complexité du réel par rapport à l'observateur : ce dernier pouvait ne pas la reconnaître, mais on devait postuler que la complexité était dans la nature des choses et que l'on puisse ainsi l'appréhender. Mais cette naturalité de la complexité dépend manifestement des modes de description et de représentation du phénomène considéré. H.A. Simon, dès 1962, dans *L'architecture de la complexité* a proposé un critère permettant pragmatiquement de reconnaître les bonnes représentations : celui d'une quasi-décomposabilité en niveaux multiples, les interactions entre niveaux étant relativement peu nombreuses et aisément identifiables, et les interactions au sein d'un même niveau étant plus nombreuses et relativement stables au fil du temps. Thèse qu'il illustrera de nombreux exemples et qui constitue une heuristique manifestement très souvent bienvenue à l'observateur modélisateur, dès lors que ce dernier veille à représenter les interactions ou les processus, plutôt que les états ou les objets. La tentation est grande de tenir pour « vrai » (au sens de « empiriquement vérifiable pour tout observateur ») le modèle d'un phénomène tenu pour complexe que l'on a organisé en niveaux anatomiques hiérarchisés, sans s'intéresser à ce que pourrait être une représentation en niveaux physiologiques ou fonctionnels, laquelle serait souvent en pratique plus pertinente (le chirurgien anatomiste est-il évidemment supérieur au clinicien physiologiste ?).

Il reste que nous ne disposons pas de critères certains permettant d'assurer que la complexité est ou n'est pas dans la nature des choses. Nous ne disposons que des représentations que nous en construisons intentionnellement et il n'est pas surprenant qu'elles puissent être multiples. Leur légitimité tiendra à leur intelligibilité et à leur communicabilité : « Sans détruire le merveilleux, donnent-elles du sens à ce merveilleux ? » interrogeait Simon Stevin de Bruges, que cite H.A. Simon en introduisant *The Sciences of the Artificial*.

Cette réflexion sur la naturalité ou l'artificialité de la complexité perçue suscitera ainsi un profond renouvellement des conceptions et des méthodes de la modélisation (ou de l'acte modélisateur) de la complexité (ou des phénomènes perçus complexes) qui constitue un des résultats les plus tangibles du développement contemporain des sciences de la complexité.

La complexité est celle du système observant : inséparabilité, irréversibilité, et récursivité. – Dès lors que nous convenons que nous n'accédons à l'intelligence de la complexité d'un phénomène que par les représentations (ou modèles, systèmes de symboles eux-mêmes perçus complexes) que nous en construisons, nous ne

pouvons plus séparer le système modélisateur (l'esprit humain produisant des descriptions intelligibles) du phénomène modélisé (lequel n'a peut-être d'autre réalité que celle des représentations que l'esprit s'en construit).

Cette « observation » (E. Morin, 1977, p. 179) s'exerce nécessairement dans le Temps, temps que nous ne pouvons pas ne pas percevoir irréversible : le retour exact à une observation antérieure nous apparaît impossible. L'observateur sait qu'il peut modifier le phénomène observé, surtout lorsque son observation est médiatisée par quelque instrument (ainsi le thermomètre modifie, par son seul contact, la température de l'objet susceptible d'être observé). Et il sait qu'il est lui-même susceptible d'être modifié par la conscience qu'il prend des résultats de son observation. « En changeant ce qu'il connaît du monde, l'homme se change lui-même » (T. Dobzansky, *L'Homme en évolution*, 1960). « Nous considérer comme étrangers à la nature implique un dualisme étranger à l'aventure des sciences aussi bien qu'à la passion d'intelligibilité... » (I. Prigogine, *La Fin des certitudes*, 1996, p. 15). Cette interaction récursive fondamentale dès lors qu'elle est entendue et assumée par l'observateur va constituer un facteur de complexité spécifique, au demeurant intelligible, qui ne permet plus au scientifique de parler d'une objectivité intrinsèque et a-temporelle. Il n'est plus certain que les mêmes causes produisent les mêmes effets à des époques et en des lieux différents. En revanche, elle va lui permettre de parler de la projectivité de son observation, l'incitant à expliciter le projet du modélisateur qui, dans le champ *a priori* infini des observables, va devoir préciser ses intentions d'observation pour pouvoir légitimer de façon intelligible les résultats de son observation (« On ne voit que ce que l'on veut voir »). Ce projet d'observation est lui-même actif : « Nous ne percevons que des opérations, c'est-à-dire des actes » (P. Valéry, *Cahiers*, « Pléiade », I, p. 562), l'observation devient attention au faire plutôt qu'au fait.

H. von Foerster (*Observing systems*, 1981) a prêté une extrême attention à ce caractère fondamentalement récursif de tout exercice de modélisation d'un phénomène perçu complexe et il en a proposé une sorte de théorisation opératoire par le concept de comportement propre (*eigen-behaviour*) qu'il a rapproché du concept d'équilibration majorante introduit par J. Piaget pour rendre compte de la dualité entre les processus cognitifs d'accommodation et d'assimilation sur laquelle celui-ci a développé la théorie de la psychologie (et de l'épistémologie) génétique : une de ses formules, souvent citée fait ici image, même si son interprétation littérale doit être faite dans son contexte : « L'intelligence [...] organise le monde en s'organisant elle-même » (J. Piaget, 1937, p. 347).

Complexité et téléologie : du « parce que... » au « afin de... ». — Cette citation délibérée des projets du système observant va conduire à reprendre une réflexion ancienne sur le caractère intentionnel et

téléologique de l'acte modélisateur d'un système perçu complexe. Kant avait longuement argumenté ce « principe de l'appréciation de la finalité interne dans les êtres organisés » en soulignant qu'« un produit de la nature est un produit dans lequel tout est fin et réciproquement aussi moyen » (*Critique de la faculté de juger*, p. 340).

Mais il fallut attendre l'émergence du paradigme de la complexité organisée et de la cybernétique pour voir réapparaître dans la méditation épistémologique ce concept qui en avait été banni pendant 150 ans (cf. le titre de l'article de N. Wiener *et al.*, 1943) : La téléologie fut d'abord confinée dans une catégorie quasi mécanique que J. Monod appela la Téléonomie, qui permettait de traiter des systèmes cybernétiques simples à but unique, stable et exogène (celui du régulateur thermostatique). La prise en compte progressive de la récursion du résultat sur le processus dans la modélisation des processus perçus complexes va peu à peu susciter un renouvellement des réflexions sur la complexité de la modélisation des phénomènes modélisés entendus à la fois dans leur fonctionnement (synchronique) et dans leur transformation (diachronique). Leur capacité à endogénéiser leur propre système de finalisation et à le déployer en composantes multiples (multi-critères) en s'exerçant dans la dialectique permanente du choix des moyens pour atteindre des fins (qui entraînent l'identification de nouvelles fins possibles, lesquelles, à leur tour, suscitent l'idée de nouveaux moyens) peut être explicitée et décrite intelligiblement en termes de procédures computables.

À partir du moment où les projets d'intelligibilité ou de compréhension deviennent au moins aussi admissibles que ceux d'explication pour les programmes de recherche scientifique, le confinement de la science dans la seule identification des causes présumées efficaces ne s'avère plus indispensable.

Les quatre types de causes proposées par Aristote sont *a priori* aussi légitimes les unes que les autres. H. von Foerster illustre cela par une formule heureuse : on peut tout aussi bien raisonner scientifiquement en termes de « parce que... » (cause efficiente) qu'en termes de « afin de... » (cause finale).

Complexité et représentation du contexte : symbolisation multidimensionnelle. — Pour être explicites, les intentions ou les projets du système observant doivent pouvoir être (in)formés, mis en formes communicables et interprétables. L'invention du langage et des mille artifices de dénominations graphiques, picturales, musicales, chorégraphiques, numériques, iconiques, phonétiques, alphabétiques..., par l'esprit humain au fil de ses multimillénaires expériences modélisatrices, met à disposition un riche appareil de systèmes de symboles.

Riche mais relativement difficile à exploiter dans sa diversité, dans la mesure où les cultures ne gardent traces que d'un relativement petit nombre de projets dans leurs contextes, pour l'expression desquels ces systèmes de symboles furent inventés. On pouvait

présumer que les hiéroglyphes gravés sur les tablettes des pyramides égyptiennes médiaient quelques projets dans quelques contextes, mais pouvait-on les interpréter en ignorant les uns et les autres avant que la pierre de Rosette ne permette à Champollion de nous proposer des correspondances plausibles entre le signe et le sens, faisant des hiéroglyphes des symboles permettant la dénotation et l'interprétation ? Comment exprimer une intention dans un contexte si l'on ne dispose pas des mots adéquats pour la dire ou des symboles adéquats pour la dénoter ?

À tenter d'exprimer tel nouveau projet (le vin nouveau) à l'aide des symboles anciens par lesquels s'exprimaient les anciens projets (les vieilles outres) on risque de compromettre la possibilité de les rendre effectivement exprimables. P. Valéry assurait souvent qu'il lui faudrait disposer de Nombres plus Subtils (qu'il notait $N + S$) pour rendre compte des correspondances qu'il souhaitait exprimer. Sans l'invention des systèmes de notation musicale, peut-on espérer communiquer l'ineffable de tel concerto ? La chimie eût-elle pu se développer sans l'invention du système de notation chimique ?

La modélisation des systèmes perçus complexes dans leur contexte bute sans doute aujourd'hui sur le fait que l'appareil symbolique dont disposent les modélisateurs est plus adapté au projet de description des substances, ou des objets (présumés analysables ou réductibles à leur plus simple expression) qu'à celui de la description des actions. Dans les manuels scientifiques, les index mentionnent les substantifs plus volontiers que les verbes. L'expérience de la modélisation des complexités organisantes est encore balbutiante, se dégageant lentement du cadre contraignant pour elle de la symbolique d'une modélisation analytique (empruntée pour l'essentiel à la mathématique ensembliste classique). Les développements contemporains de la modélisation systémique visant à rendre compte de l'inséparabilité du comportement et de l'évolution (J. Piaget, *Le comportement, moteur de l'évolution*, 1976), comme de la séparabilité de la téléologie et du contexte, constituent sans doute une voie ouverte à cette ingénierie de la symbolisation que requiert l'intelligence de la complexité organisante.

Complexité et rationalité : raison suffisante et raison délibérante. — Si *Le Discours de la Méthode* avait donné à la modélisation des phénomènes compliqués ou hyper-compliqués sa symbolique de base (« diviser les difficultés en autant de parcelles qu'il se pourra », il lui avait aussi donné son mode de traitement privilégié : le raisonnement déductif linéaire (« ces longues chaînes de raisons toutes simples et faciles dont les géomètres ont coutume de se servir » par lesquelles on parviendra aux connaissances « les plus cachées ou les plus éloignées » si l'on veille « à garder toujours l'ordre qu'il faut pour les déduire les unes des autres... »). Le raisonnement syllogistique parfait, devenu depuis le siècle dernier la logique formelle, basée fermement comme lui sur les très contraignants

axiomes d'Aristote (qu'ignorent aujourd'hui trop de scientifiques qui assurent pourtant bien raisonner logiquement pour présenter les énoncés enseignables qu'ils produisent), donne à ce mode de raisonnement linéaire déductif ses lettres de noblesse scientifique et témoigne de son efficacité universelle. Depuis Leibniz « le principe de raison (déductive) suffisante » est d'autant plus rassurant qu'il permet de rendre compte avec certitude de « toutes les choses qui peuvent tomber sous la connaissance des hommes ». Plutôt que de consacrer beaucoup d'énergie à la modélisation du processus, mieux vaut, pense-t-on, en établir un modèle simplifié voire simpliste ou bâclé, et se consacrer au traitement rationnel de ce modèle, par « longues chaînes de raisons toutes simples » jusqu'à ce qu'on aboutisse à une solution rationnellement démontrée. Cette conception de la rationalité déductive linéaire fut si prégnante qu'aujourd'hui encore elle constitue une garantie quasi certaine de rationalité.

Dès les premiers pas du paradigme de la complexité organisée, ce principe allait être subrepticement remis en question dans son monopole, par l'introduction du concept de causalité circulaire (sur lequel se définissait la première cybernétique) puis ultérieurement avec la formulation des modes de raisonnement récursif (H. von Foerster, 1981, *La cybernétique de deuxième ordre*). Un autre pas fut très vite franchi, dans les années 1955, par H.A. Simon et A. Newell introduisant le concept « d'heuristique programmante » (« Heuristic programming »), qu'ils empruntaient au mathématicien G. Polya, qui l'avait restauré en 1945 dans *How to solve it*, puis en 1952 dans les *Mathématiques du raisonnement plausible*. L'idée de programmer ce type de raisonnements dont la convergence vers un résultat certain n'est pas assurée (à la différence des raisonnements algorithmiques) sera introduite par A. Turing publiant en 1952 « Computing machinery and intelligence ».

Ces divers modes de raisonnements autres que déductifs et linéaires s'avéraient pourtant judicieux, conduisant à des résultats intelligibles et pertinents dans les contextes où ils étaient mis en œuvre. On allait alors se souvenir que ces modes d'exercice de la rationalité avaient été explorés parfois depuis longtemps. La restauration par le logicien C.S. Peirce (1848-1914) des modes de raisonnements abductifs (privilégiant l'exploration de séquences tenues pour plausibles), comme la restauration de la *Nouvelle rhétorique* par C. Perelman (1971) suivie de peu par les renouvellements des *Théories de l'argumentation* et de *La logique naturelle* (J.B. Grize, 1983) constituèrent rapidement des centres d'intérêt nouveaux pour des chercheurs en intelligence artificielle. Autant d'occasions d'expérimentation-modélisation qui se fédérèrent implicitement au sein du paradigme de la complexité organisante en transformant l'appareil traditionnel par trop fermé de la rationalité linéaire : il ne s'agit plus de démontrer le vrai à partir de prémisses présumées vraies, mais de produire des représentations intelligibles à partir de représentations plausibles. H.A. Simon a proposé en 1977 de

synthétiser ces deux formes d'exercice de la rationalité en intitulant la première : « rationalité substantive » (linéaire et déductive, algorithmisable) et la seconde : « rationalité procédurale » (tâtonnante, délibérante, heuristique).

E. Morin, en élargissant le concept de logique par celui de dialogique, soulignera les multiples ressources du bon usage de la raison en associant plutôt qu'en excluant mutuellement les deux formes de logiques, celle qui privilégie le traitement formel : logique formelle, déductive, « explicative », et celle qui privilégie les « logiques des significations » (J. Piaget & R. Garcia, 1987) : logique dialectique, logique naturelle, « compréhensive » et téléologique. « C'est quand nous ne pouvons imaginer un but – même très lointain – que nous concluons à l'incohérence » dira P. Valéry (*Cahiers* 94-14, t. VI, p. 86), qui conclura fort... logiquement que « l'incohérence (ainsi entendue) est le moyen de l'imagination », une rationalité qui cherche à produire du sens plutôt qu'à vérifier des identités formelles.

En retenant l'observation d'H.A. Simon soulignant que c'était le type de rationalité que l'on observait aisément dans l'exercice des délibérations, on peut proposer ce qualificatif faisant image pour caractériser les formes de rationalité que le développement du paradigme de la complexité incite à exercer dans les sciences contemporaines. Le Principe de raison délibérante ouvrant à la modélisation des phénomènes perçus complexes, un champ que le Principe de raison suffisante avait sans doute trop restreint à l'examen des modèles des phénomènes compliqués. Mais peut-être retiendra-t-on la désignation proposée par Aristote et exploitée par Hegel de raison dialectique pour rendre compte de cette ouverture de « la pensée complexe ».

La complexité organisante : auto-éco-ré-organisation. – En mobilisant les concepts d'incertitude, d'inséparabilité, d'irréversibilité, de récursivité, de téléologie, de symbolisation et de rationalité délibérante ou dialectique, que la science positive avait délaissés ou ignorés, le paradigme de la complexité organisée et organisante (organisée afin d'être organisante ?) va retrouver, pour les entendre dans leur unité et leur multiplicité, *unitas multiplex*, les deux appareils cognitifs conjoints forgés depuis longtemps par la pensée humaine, celui de système, qui s'était « réduit » depuis deux siècles à celui de système fermé (ou d'ensemble) et celui d'organisation, qui s'était réduit à celui de structure (ou d'ordre stable). Les premiers développements du paradigme de la complexité organisée susciteront un premier décapage de la notion de système (dont témoigne le développement de *La théorie du système général*, L. von Bertalanffy, 1968), théorie qui par son incomplétude même allait contribuer à accélérer la maturation du paradigme de la complexité organisante, accompagnant, en coévolution, le déploiement d'une théorie renouvelée de l'organisation dont les deux premiers tomes de *La Méthode* d'Edgar Morin (1977, 1980) donneront

l'architecture et poseront les fondements épistémiques (fondements qui manquaient manifestement tant à la première cybernétique, N. Wiener, qu'à la première systémique, L. von Bertalanffy, avant 1975).

Le paradigme de l'organisation complexe (anthropo-biocosmique) qu'E. Morin propose de mettre en forme, va en effet permettre de présenter en une *unitas multiplex* les diverses conceptions de la complexité que développaient progressivement toutes les disciplines depuis l'appel de W. Weaver : la biologie (H. Quastler, F. Jacob, H. Atlan...) et les sciences du comportement, psychologie génétique et théorie de l'équilibration (J. Piaget), et la neuropsychologie (W. Mac Culloch, H. Maturana, F. Varela, qui introduiront les théories de l'autopoïèse); la physique quantique et la thermodynamique (I. Prigogine, H. Gell-Mann, M. Mugur-Schächter) ainsi que la dynamique des systèmes non linéaires et les théories du chaos (D. Ruelle); les nouvelles sciences de l'ingénierie : cybernétique (N. Wiener), théories de la computation (A. Turing, H. von Foerster), théorie de la communication (C. Shannon et W. Weaver), intelligence artificielle et Sciences de la cognition (H.A. Simon & A. Newell...); et les « nouvelles sciences naturelles », de l'écologie à la géophysologie (P. Westbroeck) ou « les nouvelles sciences de la société », de la pragmatique à la socioéconomie évolutionniste...

Dans ce creuset épistémologique, les concepts vont progressivement s'articuler en quelques dualités, dont les pôles permettront de repérer les tensions constitutives d'un paradigme de la complexité qui les reliera... et les transformera... sans les rejeter : les dualités ordre-désordre, tout-partie, nécessaire-possible, différenciation-coordination, diversification-sélection, autonomie-solidarité, assimilation-accommodation, transaction-rétroaction (ou action transitive et action récursive), singularité-régularité, processus-résultat...

Dans ce creuset paradigmatique va se former une boucle épistémique associant la formation des connaissances organisées (les sciences) et celle des connaissances organisantes (« la critique épistémologique interne », disait J. Piaget), boucle qui ne nécessite plus le postulat d'un « métaniveau suprême (ou inviolable) » donnant le dernier mot à la métaphysique (J.-P. Dupuy, *Ordres et désordres*, 1982, p. 211-251) : « Toute connaissance acquise sur la connaissance devient un moyen de connaissance éclairant la connaissance qui a permis de l'acquérir » (E. Morin, *La Méthode*, t. 3, 1980, p. 232).

Peut-on condenser en un génotype initial le noyau de formation de ce paradigme de l'organisation entendue dans et par sa complexité, complexité dont elle permet récursivement l'intelligibilité ? Ce serait par une formule du type : « L'information forme l'organisation qui la forme. » Thermodynamique, cybernétique, biologie, ont souvent été tentées d'explicitier cette correspondance complexe. J. von Neumann suggérait même de « retenir le terme de complexité pour rendre compte de la grandeur que Shannon avait désignée sous le nom d'information », rappelle A. Molès dans sa préface à la

traduction française de *La théorie mathématique de la communication* de C. Shannon et W. Weaver en 1975 (p. 23).

En proposant en 1959 le Principe de l'ordre par le bruit (qui deviendra le Principe de l'organisation complexe par l'information), H. von Foerster, on l'a vu, introduisait une formulation qui prenait le contrepied de celle d'E. Schrödinger, alors généralement acceptée par la « science positive » (« L'ordre par l'ordre » : « Order from order », dans *What is life ?*, 1944, p. 191 de la trad. fr., 1986). En méditant sur cette formule au moment où se formaient dans les années 1973-1981 la théorie de l'autonomie (entre le colloque de Royaumont sur « l'unité de l'homme » animé par E. Morin et M. Piattelli-Palmarini, et le colloque de Cerisy sur « l'auto-organisation, de la physique au politique » animé par P. Dumonchel et J.-P. Dupuy), E. Morin dégageait une présentation opérationnelle du paradigme de l'organisation complexe que récapitulait une formule dense par laquelle il l'a présentée, formule qui propose une sorte d'instrumentation « de la modélisation de l'organisation » dont les quatre tomes publiés de *La Méthode* seraient à la fois l'écrin et l'argumentaire.

Le paradigme de l'auto-éco-ré-organisation permet en effet d'exprimer à la fois le caractère autoproduit d'elle-même de toute organisation s'autonomisant dans un contexte ou un substrat dont elle est solidaire dans une permanente interaction écosystémique (qui l'affecte, ou la transforme, et par laquelle elle s'autonomise, se différenciant ainsi de ce substrat), et par une morphogenèse qui, inscrivant ses transformations dans une histoire dont elle garde mémoire : ré-organisation par le choix d'un itinéraire lors des bifurcations ouvrant l'accès à des futurs possibles. Choix qu'elle pourra peut-être conduire de façon autonome et téléologique si les capacités d'autonomisation dont elle se dote en fonctionnant et en se transformant lui permettent de « se représenter » les termes de ces possibles ré-organisations (choix qu'elle abandonnerait à un déterminisme mécanique, génétique ou chaotique, si elle ne pouvait ou ne voulait exercer ces capacités d'autonomisation endogène).

Cette appréhension de la complexité des phénomènes modélisés par leur éco-auto-ré-organisation va susciter des modes de compréhension (plutôt que d'explication) de leurs comportements et de leurs transformations dont le modélisateur assumera d'autant plus volontiers l'incomplétude (le modèle n'est jamais fini) qu'elle le mettra en situation d'une « investigation « intelligente », lui suggérant des interprétations nouvelles qu'il tiendra souvent pour « émergentes ».

La complexité appelle la stratégie : complexité et éthique. – Le paradigme de la complexité organisée, par le caractère somme toute familier sinon rassurant des concepts qu'il empruntait sans beaucoup de précautions aux disciplines positives déjà établies au sein des paradigmes antérieurs de la mécanique rationnelle

et de la mécanique statique, a incité à développer une conception des théories de la complexité de type applicable. On peut lire encore en 1995 des énoncés tels que celui-ci : « La science de la complexité démontre que pour qu'un système soit innovant, créatif et transformable, il doit être conduit loin de l'équilibre où il peut faire usage du désordre, de l'irrégularité et de la diffusion comme des ingrédients essentiels du processus de changement » (R. Stacey, « The science of complexity », *Strategic Management Journal*, vol. 16, 1995, 477-495). Publié dans une revue scientifique honorable en conclusion d'un article correctement documenté, ce type de conclusion, que recherche habituellement le lecteur d'une étude scientifique, fait facilement illusion : on peut présumer qu'il existe une science de la complexité qui « démontre » ce que l'on « doit » faire pour atteindre tel but. On espère avoir assez souligné la légèreté épistémologique de ce type de propos qui sont de nature à compromettre l'attention que les institutions scientifiques consacrent aux développements contemporains des sciences de la complexité. Leur interprétation systématique en terme d'applications, d'outils forgés en mathématique, en physique, en biologie ou en informatique pour résoudre des problèmes compliqués formulés dans le contexte de telle discipline, risquera très souvent de s'avérer perverse dès lors qu'elle s'entend en termes résolutoires (« la science de la complexité démontre que... »)

En revanche, bien sûr, utilisée en termes d'heuristiques investigatrices dans des contextes où l'on peut tenir leur mise en œuvre comme plausible, de tels outils, qu'ils aient été développés au sein des sciences dures ou au sein des sciences douces (linguistique, logique naturelle, psychosociologie, sciences de l'ingénierie, etc.), sont susceptibles de constituer des instruments localement fort bienvenus dans les exercices de modélisation des phénomènes perçus complexes. Mais leur usage ne s'entend plus alors dans la même démarche. Il ne s'agit plus de moyens présumés résolutoires permettant quasi certainement d'atteindre une fin préidentifiée, voire imposée, collections d'outils aussi aseptisés que possible tels que les outils statistiques que présentent les recueils de méthodologies. La démarche est alors élaboration permanente et tâtonnante de stratégies de modélisation et d'interprétation dont les buts initiaux sont *a priori* rarement les buts finaux, la mise en œuvre d'un moyen apparemment adapté à telle fin intermédiaire suggérant au fil de la recherche l'idée d'autres fins intermédiaires possibles, voire souhaitables, lesquelles, à leur tour, suggéreront l'appel à d'autres moyens, moyens qui..., etc. Stratégie de modélisation qui « entrelace inextricablement des concepts avec des opérations et des données et avec des mots et signes d'étiquetage », stratégies « induites par des buts subjectifs que l'on place dans le futur, mais qui façonnent les actions présentes. Ces buts liés à des croyances et à des anticipations, rétroagissent sur l'action au fur et à mesure que celle-ci s'en rapproche ou s'en éloigne, cependant que l'action, en se développant, modifie les buts [...] » (M. Mioara

Mugur-Schächter, « Les leçons de la mécanique quantique », *Le Débat*, 94, mars 97, p. 170).

Exercice de conception plutôt que d'analyse dira H. Simon (1969, p. 111), « travail de l'ingénieur sur son épure » suggérera P. Valéry (*Cahiers I*, p. 854), « stratégie cognitive » dira E. Morin (*Les Théories de la complexité*, colloque de Cerisy, 1991, p. 269) : « Penser sans jamais clore les concepts, briser les sphères closes, rétablir les articulations entre ce qui est disjoint, essayer de comprendre la multidimensionnalité, de penser avec la singularité, avec la localité, avec la temporalité [...] l'utilisation stratégique de ce que j'appelle la dialogique. »

Stratégie de construction d'images riches (*Rich pictures*) et de représentations symbolisantes innovantes (à la manière de Léonard de Vinci ou de P. Valéry, associant dans leurs *Cahiers* propos discursifs, schémas graphiques et stratégie d'interprétation par raisonnements délibératifs, suscitant souvent l'émergence d'une nouvelle issue qui s'avérera peut-être pertinente. Cette conception de la recherche orientée problème (quels projets dans quels contextes ?) plutôt qu'orientée solution (quel résultat par quels moyens ou méthodes ?), proposée (ou plutôt restaurée) par le paradigme des sciences de la complexité, appelant la stratégie plutôt que le résultat, se forme désormais de façon pragmatique ou tâtonnante, suggérant de nouvelles délibérations épistémologiques.

Cette transition des méthodologies vers les stratégies de recherche introduite par le développement du paradigme de la complexité va concerner au premier chef les réflexions sociales, culturelles et politiques contemporaines sur la complexité des processus de décision dans les contextes perçus complexes. Enjeu que l'on présente fréquemment en termes de choix éthique, en demandant implicitement à la science de déterminer ou de proposer les bonnes décisions que requièrent les sociétés. Les sciences positives ont longtemps affiché ici une position ambiguë, affirmant la supériorité *a priori* du jugement des experts scientifiques. Dans la mesure où elles appellent à bien penser – et donc à enrichir et à délibérer au mieux les connaissances qu'elles forment en les contextualisant et en les finalisant, les sciences de la complexité peuvent faire valoir qu'elles contribuent ainsi à ce « bien penser qui est la source de la morale » (Pascal).

Mais la reconnaissance de cette responsabilité épistémologique (bien penser les conditions de formulation des connaissances enseignables qu'elles produisent dans un contexte identifié) rend plus manifeste le caractère socioculturel des conventions éthiques que se forment les groupes sociaux. L'argument d'une nécessité scientifiquement déterminée s'efface au profit de celui d'une identification des possibilités concevables ; dès lors les choix successifs des actions possibles tenues ici et maintenant pour souhaitables ne sont plus spécifiquement une affaire de scientifiques mais une question de politiques. Tout au plus pourrait-on demander à ces derniers d'imaginer quelques maximes heuristiques pouvant aider les sociétés dans

leur choix ; telle que, par exemple, celle suggérée par H. von Foerster : « *Agir toujours de façon à augmenter le nombre des choix.* » Impératif éthique auquel il associe volontiers un impératif esthétique : « Si tu veux voir, apprends à agir » (C. Segal, « *Le rêve de la réalité*, H. von Foerster et le constructivisme, 1990, p. 186).

► ASHBY W.R., *An Introduction to Cybernetics*, Londres, Chapman & Hill Ltd, 1956. – ATIAS C., LE MOIGNE J.-L. (éd.), *Science et conscience de la complexité* ; avec E. Morin, Aix-en-Provence, Librairie de l'Université, 1984, épuisé. Textes repris dans Morin E., Le Moigne J.-L., *Intelligence de la complexité*, éd. L'Harmattan, 1999. – BACHELARD G., *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934, 1980. – BATESON G., *Steps to an Ecology of Mind*, New York, Chandler Publ. Co., 1972 ; trad. fr., *Vers une Écologie de l'esprit*, Paris, Le Seuil, 2 vol., 1977-1980. – BENKIRANE R. (éd.), *La complexité, vertiges et promesses*, Paris, éd. Le Pommier, 2002. – BOCCHI G.L., CERUTI M. (éd.), *La Sfida della complessità*, Milano, Feltrinelli, 1985. – BONABEAU E., THÉRAULAZ G. (éd.), *Intelligence collective*, Paris, Hermès, « Systèmes Complexes », 1994. – CERISY (Colloque de), *Les Théories de la complexité autour de l'œuvre d'Henri Atlan*, Le Seuil, 1991. – DESCARTES R., *Œuvres et lettres*, textes présentés par A. Bricoud, Paris, NRF-Pléiade, 1953. – DUPUY J.-P., *Ordres et désordres. Enquête sur un nouveau paradigme*, Paris, Le Seuil, 1982 ; *Aux Origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1994. – EKELAND I., *Au Hasard. La chance, la science et le monde*, Paris, Le Seuil, 1991. – GRASCE (dir.), *Entre systémique et complexité*, Paris, PUF, 1999. – GELL-MANN M., texte américain, 1994 ; trad. fr. G. Minot, *Le Quark et le jaguar. Voyage au cœur du simple et du complexe*, Paris, Albin Michel, 1995. – GLANSDORFF P., PRIGOGINE I., *Structure, stabilité et fluctuations*, Paris, Masson et Cie, 1971. – GLEICK J., texte anglais, 1987 ; trad. fr. C. Jeanmougin, *La Théorie du chaos. Vers une nouvelle science*, Paris, Albin Michel, 1989. – HOLLAND J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems. An Introductory Analysis, with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975. – KUHN T.S., *The Structure of the Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, 1962-1970 ; trad. fr., *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983. – LANGTON C.G. (éd.), *Artificial Life*, Santa Fe Institute Studies, Addison Wesley Publ. Co., 1990. – LE MOIGNE J.-L., *La Modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod, 1990, 2^e éd., 1995, 3^e éd., 1999 ; « The Intelligence of Complexity », *The Science and Praxis of Complexity*, Tokyo, United Nations University, 1985, p. 35-61 ; « On theorizing the Complexity of Economic systems », *The Journal of Socio Economics*, Fall, JAI Press, 1995 ; *Le Constructivisme. Tome III, modéliser pour comprendre*, Paris, éd. L'Harmattan, 2004. – LEWIN R., texte américain, 1993 ; trad. fr. B. Loubières, *La Complexité. La théorie de la vie au bord du chaos*, Paris, InterÉditions, 1994. – MORIN E., *La Méthode. Tome I : La Nature de la nature*, Paris, Le Seuil « Points », 1977 ; *La Méthode. Tome II : La Vie de la vie*, Paris, Le Seuil « Points », 1980 ; *La Méthode. Tome III : La Connaissance de la connaissance*, vol. 1, Paris, Le Seuil, 1987 ; *La Méthode. Tome IV : Les Idées, leur habitat, leur vie, leurs mœurs, leur organisation*, Paris, Le Seuil, 1991 ; *La Méthode. Tome V : L'identité humaine*, Paris, Le Seuil, « Points », 2001 ; *Science avec conscience. Nouvelle édition complétée*, Paris, Le Seuil « Points », 1990 ; *Introduction à la pensée complexe*, Paris, ESF « Communication et Complexité », 1990. – MORIN E., PIATELLI-PALMARINI M. (éd.), *L'Unité de l'Homme*, 3 tomes : I. *Le Primate et l'Homme*, II. *Le Cerveau humain*, III. *Pour une Anthropologie fondamentale*, Paris, Le Seuil

« Points », 1974. – MUGUR-SCHÄCHTER M.M., « Les Leçons de la mécanique quantique, vers une épistémologie formelle », *Le Débat*, mars 1997, n° 93 ; *Quantum mechanics, mathematics, cognition and action. proposals for a formalized epistemology*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002. – NICOLIS G., PRIGOGINE I., texte anglais, 1989 ; trad. fr. sous la dir. de J. Chanu, *À la Rencontre du complexe*, Paris, PUF, 1992. – PRIGOGINE I., *La Fin des certitudes*, Paris, Odile Jacob, 1996. – PRIGOGINE I., STENGERS I., *La Nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard-NRF, 1979. – QUASTLER H., *The Emergence of Biological Order*, Yale University Press, 1964. – RESCHER N., *Complexity, a philosophical overview*, New Brunswick Transaction Publishers. – RUELLE D., *Hasard et chaos*, Paris, Odile Jacob, 1991. – SHANNON C.E., WEAVER W., *The Mathematical Theory of Communication*, Chicago, University of Illinois Press, 1949 ; trad. fr., Paris, éd. RETZ-CEPL, 1975. – SIMON H.A., *The Sciences of the Artificial*, 1961, 2^e éd. augm., Cambridge (Mass.), MIT Press, 1981, 3^e éd. complétée non encore traduite, 1996 ; trad. fr., *Science des systèmes. Les sciences de l'artificiel*, Paris, Dunod, 1990 ; éd. Gallimard, « Folio Essais », 2004 ; *Models of Bounded Rationality*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 3 vol., 1982. – STEIN D.L. éd., *Lectures in the Sciences of Complexity* (Lectures vol. I), Santa Fe Institute Studies, Addison-Wesley Publ. Co « The Sciences of Complexity Serie », 1989. – UNIVÉRSITÉ (Université des Nations Unies), *Science et pratique de la complexité*, Paris, La Documentation française, 1987. – VALÉRY P., *Cahiers 1894-1945*, Paris, Gallimard-NRF « Pléiade », 2 vol., 1973 ; *Œuvres complètes*, Paris, Gallimard-NRF « Pléiade », 2 vol., 1972. – WEAVER W., « Science and Complexity », *American Scientist*, 1948, vol. 36, p. 536-544. – WEISBUCH G., *Dynamique des systèmes complexes*, Paris, InterÉditions, 1989.

Jean-Louis LE MOIGNE

→ Découverte ; Information ; Information et codage ; Rationalité ; Révolution scientifique ; Système ; Téléologie.

COMPLEXITÉ ALGORITHMIQUE MATHÉMATIQUES

Un algorithme est une description de la marche à suivre pour résoudre un problème donné. Le mot « algorithme » vient du mot al-Khwarizmi, nom d'un astronome perse du IX^e s. qui publia une dizaine de traités sur des problèmes d'astronomie et d'arithmétique, avec en particulier une description des règles à suivre pour faire les opérations usuelles.

Avant l'avènement de l'informatique, l'algorithme se rattachait donc aux mathématiques. Il ne s'agissait pas précisément d'un domaine propre, puisque des problèmes algorithmiques se posaient dans toutes les branches des mathématiques, mais plutôt d'un style, d'une démarche particulière : en algorithmique, il ne s'agit pas de démontrer un théorème sur l'existence ou les propriétés structurelles de tel ou tel objet mais de procéder de manière constructive pour fabriquer un objet ou trouver l'un des paramètres qui le caractérisent. L'exemple type est l'algorithme d'Euclide pour trouver le plus grand diviseur commun à deux entiers donnés.

Il y a des algorithmes que tout le monde connaît. Il s'agit de ceux qui sont enseignés à l'école. À l'école

primaire on apprend comment effectuer des additions avec retenues, des soustractions, des multiplications ou des divisions ; à l'école secondaire on apprend comment résoudre des systèmes d'équations linéaires et comment résoudre une équation du second degré à l'aide du discriminant. Cet apprentissage nous permet d'appliquer les règles de façon mécanique sans avoir à refaire à chaque fois le raisonnement qui sous-tend la démarche, ce qui évite de disperser son intérêt. Notons qu'au XVI^e s. la résolution d'une équation du second degré prenait 200 pages dans le livre d'algèbre de M. Stifel ! Les problèmes de géométrie demandant quels objets peuvent être construits avec la règle et le compas relèvent également d'une démarche algorithmique.

En ce qui concerne les multiplications, l'efficacité de la procédure utilisée apparaissait déjà explicitement comme une préoccupation importante au Moyen Âge, où un texte d'Ibn al-Madjj explique que pour élever un nombre au carré, les multiplications élémentaires sont beaucoup moins nombreuses lorsqu'on utilise le procédé « de semi-translation ». Le procédé de multiplication par translation habituellement utilisé à l'époque est *grosso modo* le procédé usuel des écoles primaires actuelles. Quand on l'applique pour élever au carré un nombre à n chiffres, il conduit à effectuer des multiplications chiffre à chiffre, et le nombre de telles multiplications est égal au carré de n . Le procédé par semi-translation fait $n(n+1)/2$ multiplications (sans compter les doublements), soit environ la moitié, d'où le nom du procédé. L'idée en est très simple : on observe que si x est le nombre à élever au carré, si a est un chiffre de x et b un autre chiffre de x , le procédé de multiplication usuel, en cours d'exécution, sera amené à multiplier le chiffre a par le chiffre b , et également à multiplier le chiffre b par le chiffre a . Il suffit de regrouper ces deux multiplications en une seule suivie d'un doublement pour économiser presque la moitié des multiplications élémentaires. En fait, il est possible de faire beaucoup mieux encore, en utilisant une observation similaire pour effectuer de manière plus efficace la multiplication de deux nombres. Prenons par exemple deux nombres x et y à 4 chiffres, compris entre 1 et 9 999, et écrivons-les $x = 100a + b$ et $y = 100c + d$, avec a, b, c et d compris entre 0 et 99. Le produit xy , une fois développé, peut donc s'écrire $xy = 10000ac + 100(ad + bc) + bd$. L'observation astucieuse que $ad + bc = (a+b)(c+d) - ac - bd$ permet de faire l'affirmation suivante : pour multiplier x et y il suffit de savoir faire les produits ac, bd , et $(a+b)(c+d)$, plus quelques additions et soustractions sans importance (car de coût beaucoup plus faible que le coût d'une multiplication). Effectuer une multiplication entre nombres à 4 chiffres revient donc à effectuer trois multiplications entre nombres à 2 chiffres. En utilisant cette idée de manière répétée on obtient un algorithme beaucoup plus efficace qu'au Moyen Âge : pour multiplier deux nombres à n chiffres, il suffit d'effectuer environ n à la puissance 1.6 multiplications élémentaires, soit beaucoup moins

que le carré de n . Il est intéressant de noter qu'actuellement, alors qu'en mathématique les opérations arithmétiques sont un sujet essentiellement clos, les additions et multiplications continuent d'être un sujet de recherche actif en informatique. Un congrès annuel est dévolu à l'arithmétique des ordinateurs. On y explore des possibilités comme celles offertes par le parallélisme et l'anticipation des retenues à propager.

La conception d'algorithmes efficaces est centrale en calcul numérique. Par exemple, l'algorithme de Newton a pour but de déterminer avec une bonne précision la solution d'une équation de type $f(x) = 0$, et son utilité réside essentiellement dans sa convergence très rapide : on calcule des approximations successives de la solution, et ces approximations sont rapidement très précises, ce qui fait qu'un faible nombre d'itérations suffisent pour obtenir la précision désirée. Les calculs numériques par ordinateur, qui permettent de traiter des problèmes de taille beaucoup plus élevée, soulèvent de nouveaux problèmes liés à la gestion des erreurs d'arrondis qui risquent de s'accumuler.

Au XX^e s. se sont développés deux nouveaux domaines où les questions algorithmiques sont particulièrement nombreuses : la cryptographie, ou la manière de coder des messages de façon qu'ils ne puissent être compris que par un destinataire choisi ; et la recherche opérationnelle, qui à l'origine avait pour but de gérer les problèmes d'intendance divers liés aux déplacements de troupes en temps de guerre.

La factorisation est un problème antérieur à la cryptographie mais qui y trouve actuellement des applications importantes. Comment écrire un nombre comme produit de facteurs ? Essayer de le diviser par tous les nombres premiers inférieurs à sa racine carrée a un coût prohibitif. Ce problème a été étudié en particulier par Fermat, Gauss et Legendre, qui proposent tous trois des algorithmes de factorisation. Contrairement au problème du PGCD (plus grand commun diviseur) décrit ci-dessous, aucun algorithme de factorisation n'est vraiment satisfaisant, car tous sont coûteux et rapidement prohibitifs lorsque le nombre de chiffres du nombre à factoriser croît. Actuellement, ce problème est l'objet de recherches intenses. Il est en effet à la base du plus populaire des procédés cryptographiques modernes. Le système RSA, proposé en 1976 par Rivest, Shamir et Adleman, a révolutionné la cryptographie : toutes les méthodes publiées antérieurement reposaient sur l'existence d'une « clé » secrète partagée au préalable par la personne envoyant le message crypté et la personne destinataire. Dans le système RSA il n'y a pas besoin de clé secrète : si je souhaite soudain envoyer un message confidentiel à Monsieur X il me suffit d'aller consulter dans l'équivalent d'un bottin téléphonique le numéro de Monsieur X, de me servir de ce numéro pour crypter mon message, et de l'envoyer ensuite, par exemple sur les ondes ou autre canal de communication public, tout en sachant que seul Monsieur X saura décrypter mon message. Or, la sécurité de ce système repose entièrement sur la

difficulté présumée de la factorisation : le numéro de Monsieur X dans le bottin est un grand nombre choisi par Monsieur X, produit de deux grands nombres premiers, et la méthode de décryptage de X est fondée sur sa connaissance des facteurs de ce grand nombre. S'il existait une méthode vraiment efficace pour factoriser, n'importe qui pourrait décrypter les messages codés par le système RSA, ce qui explique le nombre de personnes travaillant sur la question. Des équipes de recherche du monde entier travaillent sur des concours proposés régulièrement pour factoriser des nombres à 100 ou 120 chiffres, voire plus. À ce stade de sophistication chaque nouveau chiffre est une gageure et chaque nouvelle résolution est triomphalement annoncée sur Internet.

Avec l'avènement de l'informatique, la réalisation mécanique de suites d'opérations simples pour résoudre un problème est généralement déléguée aux ordinateurs, et désormais il suffit de lancer un processus exécutant un programme qui donnera automatiquement la solution recherchée ; l'aspect algorithmique est donc souvent invisible pour l'utilisateur. Actuellement, on considère généralement qu'un algorithme pour résoudre un problème donné est une description suffisamment précise pour pouvoir former le schéma directeur de la conception d'un programme informatique résolvant le problème. Peut-être peut-on considérer que c'est le niveau le plus élevé des divers niveaux d'abstraction nécessaires à la bonne conduite d'un projet de génie logiciel.

On peut donc dire que c'est avec l'informatique que l'algorithmique a conquis ses lettres de noblesse et est devenue un domaine scientifique propre, qui appartient à la discipline informatique. De manière plus formelle, le point de vue de Turing est qu'un algorithme peut être défini comme l'ensemble complet des règles permettant la résolution d'un problème donné, et le modèle de machine de Turing proposé dans les années 1930 est le prototype d'un ordinateur hypothétique très simple, muni d'une bande de papier, d'un pointeur et de quelques symboles, capable hypothétiquement de résoudre tous les problèmes pouvant être formulés en termes d'algorithmes.

En pratique, pour être reconnue comme un algorithme, une méthode de résolution doit posséder plusieurs propriétés. Elle doit s'appliquer à des données d'un type spécifié, par exemple deux entiers strictement positifs dans le cas de l'algorithme d'Euclide pour le PGCD. Elle doit produire un résultat bien spécifié, par exemple le PGCD des deux nombres pour l'algorithme d'Euclide. Elle doit avoir une description précise, et enfin elle doit se terminer en un temps fini, afin d'éviter que le programme correspondant ne boucle indéfiniment pour certaines données. En outre, il est souhaitable que l'algorithme soit efficace, c'est-à-dire qu'il construise la solution en un temps raisonnable. En effet, en pratique il n'y a pas grande différence entre une méthode de résolution qui ne termine jamais et un algorithme qui prendrait un siècle pour construire la solution.

L'objet de la complexité algorithmique est l'efficacité des algorithmes. En particulier, lorsque plusieurs algorithmes sont proposés pour résoudre un problème il est important de déterminer lequel sera le plus rapide, donc lequel implémenter en priorité. Ce domaine a connu un développement rapide depuis les années 1960.

La complexité d'un algorithme sert donc à prédire la vitesse d'exécution du programme correspondant. Elle dépend de plusieurs facteurs. Tout d'abord, le choix du langage de programmation, les détails de l'implémentation, et le choix du compilateur peuvent sensiblement affecter la rapidité d'exécution. Ensuite, cette vitesse dépend des caractéristiques internes de l'ordinateur sur lequel le programme sera exécuté. Enfin, le programme est exécuté pour des données particulières et son efficacité dépend généralement des données. Celles-ci sont fournies par l'utilisateur et peuvent *a priori* être arbitraires. La notion brute de rapidité d'exécution dépend donc de beaucoup trop de paramètres pour avoir beaucoup de sens.

Une première considération est que les problèmes de temps d'exécution ne surviennent normalement que dans le contexte où les données sont de grande taille, et donc il suffit de se concentrer sur ce cas : il s'agit alors d'analyse asymptotique d'algorithme. Le deuxième progrès pour s'affranchir de ces problèmes consiste à considérer que le choix d'un langage, d'un compilateur ou d'une machine particulière n'affecte normalement le temps d'exécution que par un facteur constant (en exceptant les machines parallèles). Ceci a conduit les informaticiens à privilégier les notations « Grand-Oh » (borne supérieure à un facteur constant près, notation de Landau) et « Theta » (évaluation exacte à un facteur constant près). En ce qui concerne la dépendance par rapport aux données, le point de vue le plus répandu consiste à dire que les données qui seront entrées par le futur utilisateur sont imprévisibles et qu'il faut donc envisager le pire cas de données : une complexité d'algorithme efficace dans le pire cas donne une garantie de qualité.

Comment ferait-on l'analyse de l'algorithme d'Euclide pour le PGCD ? Par exemple, le PGCD de 503 et 347 vaut 17, car 503 et 347 sont tous deux divisibles par 17, et 17 est le plus grand nombre vérifiant cette propriété. L'algorithme d'Euclide, pour trouver le PGCD de deux nombres m et n , avec m plus grand que n , fait une division entière de m par n ; si m est divisible par n , le PGCD vaut n ; sinon, la division donne un reste r , entier strictement positif, et il suffit de calculer le PGCD de n et r en continuant à appliquer la même méthode. Une autre méthode possible consisterait à diviser m et n par n , puis $n - 1$, puis $n - 2$, etc., jusqu'à trouver un diviseur commun à m et n . Quelques tentatives à la main suffisent à se convaincre de la supériorité de l'algorithme d'Euclide sur la deuxième méthode. Il apparaît rapidement que l'algorithme d'Euclide est beaucoup plus efficace, en ce sens que le nombre de divisions à effectuer est beaucoup plus faible. En effet la suite de nombres construite lors de

l'exécution de l'algorithme d'Euclide est rapidement décroissante. Mais à quelle vitesse décroissent-ils dans le pire cas, lorsque m et n sont inférieurs à une borne donnée N ? Il s'avère que le comportement de l'algorithme d'Euclide est étroitement lié au développement du nombre rationnel m/n en fraction continue, dont la théorie a été développée au XIX^e s. (après avoir été implicite dans la représentation des nombres dans la Grèce Antique).

En 1845, Lamé en déduisit que le pire cas se produit lorsque les nombres u et v sont termes consécutifs de la suite de Fibonacci (suite dont le n -ième terme est la somme des deux précédents). Comme les termes de la suite de Fibonacci peuvent être calculés exactement, cela donne une borne sur le nombre de divisions dans le pire cas, soit environ 2 078 fois le logarithme népérien de N . Ceci est beaucoup plus petit que N , le nombre de divisions de la deuxième méthode dans le pire cas, et explique la popularité de l'algorithme d'Euclide.

Qu'est-ce qui fait dire avec tant d'assurance qu'un algorithme a un coût prohibitif et un autre un coût raisonnable ? Ces termes *a priori* informels correspondent pour les informaticiens à des notions bien distinctes. Un algorithme raisonnable est un algorithme dont le coût asymptotique est borné par un polynôme en fonction de la taille des données d'entrée, et un algorithme prohibitif est un algorithme qui n'est pas raisonnable. Pourquoi cette définition ? Eh bien, prenons l'exemple d'un algorithme dont le temps d'exécution est quadratique en la taille des données, et supposons que les données les plus grandes qui puissent être traitées aient taille 1 000. Si la vitesse de la prochaine génération d'ordinateurs est deux fois plus grande que leur vitesse actuelle, le même algorithme pourra être utilisé pour des données de taille allant jusqu'à 1 410, ce qui est bien meilleur. Considérons en revanche un algorithme dont le temps d'exécution est exponentiel en la taille des données, et supposons ici encore que les données les plus grandes qui puissent être traitées aient taille 1 000. Si la vitesse de la prochaine génération d'ordinateurs est deux fois plus grande que leur vitesse actuelle, le même algorithme ne pourra traiter que quelques cas supplémentaires, et la taille maximum des données pouvant être traitées sera 1 000 plus quelques unités (le nombre d'unités dépend de la base de l'exponentielle) : les algorithmes exponentiels sont irrémédiablement inefficaces, quasiment indépendamment de la qualité des machines sur lesquels ils sont implémentés. Bien sûr, cette affirmation doit être modulée, et un algorithme polynomial en n à la puissance 1 000 serait en pratique plus lent qu'un algorithme exponentiel tel que la base de l'exponentielle vaut 0.0001. Cependant, dans la réalité on observe que le temps d'exécution des algorithmes polynomiaux est une petite puissance de n , et que les algorithmes non polynomiaux sont habituellement exponentiels en base 2. Il existe également un argument théorique en faveur de cette distinction. En effet, les modèles théoriques et pratiques d'ordinateur développés jusqu'à présent sont tels que les temps d'exécution d'un algorithme sur une

machine arbitraire et sur une machine de Turing différent d'un rapport qui vaut au plus un polynôme en la taille des données. Ainsi, on peut classer les algorithmes, et plus généralement les problèmes, en deux catégories selon qu'ils possèdent ou non des algorithmes de complexité asymptotique polynomiale en la taille des données. Cette définition de complexité a valeur universelle : elle ne dépend que du problème à traiter.

Ceci nous amène à la question fondamentale de la théorie de la complexité. Restreignons-nous aux problèmes de décision, dont la réponse est « oui » ou « non ». On dit qu'un tel problème est dans la classe de complexité P s'il possède un algorithme polynomial. Les problèmes de décision dont la réponse pourrait être vérifiée en temps polynomial si l'on disposait d'une aide pour nous guider sont dits appartenir à la classe NP. La plus grande question non résolue de l'informatique théorique consiste à savoir si oui ou non P est égale à NP.

Ces classifications des problèmes forment le domaine de l'informatique appelé complexité structurale, et ont conduit au début des années 1970 à un développement très riche, celui des problèmes NP-complets (notion qui a émergé indépendamment aux États-Unis d'Amérique et en URSS à peu près en même temps). Cependant, en complexité algorithmique, nous nous concentrons sur l'analyse d'algorithmes particuliers.

Une large partie des informaticiens considèrent que l'évaluation d'un algorithme dans le pire cas est souvent beaucoup trop pessimiste et peu représentative (par exemple l'algorithme du simplexe pour la programmation linéaire est bien plus efficace en pratique que dans le cas le pire), et qu'on est alors contraint de faire une analyse probabiliste, en faisant des hypothèses naturelles sur la distribution des données (ce qui est plus difficile et exige des connaissances probabilistes qui jusqu'à récemment ne faisaient pas partie de la culture de l'informaticien typique).

On peut dire que la complexité algorithmique en tant que domaine propre n'a véritablement commencé que dans les années 1960, et il s'agit donc d'une histoire récente. L'influence de Donald Knuth et de ses trois volumes *The Art of Computer Programming* a été déterminante, en définissant les classes principales de problèmes algorithmiques à résoudre et en donnant la démarche générale à suivre pour les aborder. Un grand principe est que la conception d'algorithmes est inséparable de leur analyse. (Rétrospectivement, on peut regretter que les évaluations de complexité par simulation numérique aient été mises de côté. C'est peut-être l'une des raisons pour lesquelles le développement de l'évaluation expérimentale de l'efficacité des algorithmes a pris beaucoup de retard par rapport à leur étude mathématique rigoureuse...)

De nouveaux problèmes algorithmiques sont apparus en liaison avec le développement des ordinateurs. En premier lieu, citons les problèmes non numériques liés à la manipulation de l'information, et les

problèmes de structures de données. L'archétype du problème algorithmique non numérique est le problème du tri : étant donné une suite de n nombres, en déterminer, en effectuant entre ces nombres des comparaisons bien choisies, une permutation qui les mette en ordre trié. Ce problème, qui intervient constamment dans la manipulation des informations par ordinateur, était déjà discuté dans les années 1950 lors de l'émergence de la science informatique, et a été essentiellement résolu par diverses méthodes efficaces développées au cours des années 1960. La plupart de ces méthodes utilisent le paradigme « diviser pour régner », qui consiste à couper un problème en un petit nombre de problèmes de même nature mais de plus petite taille. Du point de vue de la complexité algorithmique, leur analyse revient à l'étude de suites définies par récurrence, et les méthodes correspondantes font partie du bagage de tout informaticien.

Les problèmes de structures de données surviennent lorsque la quantité des données à traiter est importante, si bien que celles-ci ne sont pas toutes situées au même endroit, qu'on ne peut pas le voir d'un coup d'œil, et que la simple localisation de l'information recherchée est une chose qui prend du temps. L'application du principe « diviser pour régner » conduit à l'élaboration de structures de type arborescent, dont l'analyse conduit également à étudier des suites définies par récurrence.

L'analyse en moyenne des algorithmes conduit, même pour des algorithmes *a priori* simples, à étudier des structures combinatoires et des fonctions génératrices qui ne sont souvent définies que de manière implicite, et dont les propriétés asymptotiques ne peuvent être déterminées que par des outils d'analyse complexe. Une autre approche sur l'analyse en moyenne se fonde sur les outils probabilistes : files d'attente, chaînes de Markov, martingales par exemple, et connaît un succès croissant. L'analyse en moyenne a toujours été un domaine un peu controversé de la complexité algorithmique. En effet, la complexité dans le cas le pire donne une garantie de performance, mais la complexité en moyenne peut n'avoir pas grand sens si les données ne correspondent pas du tout aux hypothèses de distribution. Or, les données seront fournies par l'utilisateur, qui est en principe inconnu du programmeur (ce dernier a bien sûr l'ambition d'écrire un programme de valeur universelle...). L'utilisateur peut fort bien choisir des données tout à fait pathologiques. Ainsi, beaucoup n'acceptent l'analyse en moyenne que comme un pis-aller, lorsque l'analyse dans le pire des cas est clairement beaucoup trop pessimiste. En fait, les deux informations sont intéressantes. Les informaticiens se sont également plaints de la difficulté des analyses en moyenne, mais cela était en grande partie dû à leur manque de connaissances en probabilités et en analyse, et ces carences sont actuellement en train de disparaître avec l'élévation générale du niveau de culture mathématique des membres du domaine.

Depuis le début des années 1980, les algorithmiciens essaient d'aller au-delà de l'héritage de Knuth.

Les modèles d'algorithmes changent, et avec eux les outils d'analyse : les algorithmes randomisés, les algorithmes parallèles, les structures dynamiques, les algorithmes en ligne, demandent tous un nouvel effort de réflexion sur la définition de la complexité d'un algorithme. Ainsi, les algorithmes parallèles peuvent exécuter certaines instructions de manière simultanée, et l'analyse de leur temps d'exécution exige souvent de résoudre des équations faisant intervenir des maxima de plusieurs variables ; les algorithmes randomisés offrent la possibilité de tirer à pile ou face pour décider de l'opération suivante au cours de l'exécution, et celle-ci n'est donc pas entièrement déterminée par la description de l'algorithme et les données entrées. Le temps d'exécution est une variable aléatoire, et le succès des algorithmes randomisés a encouragé les chercheurs à étudier les bénéfices des probabilités (si plusieurs exécutions sont possibles, la pire exécution ne survient peut-être que très rarement). Les algorithmes en ligne obligent à faire des choix avant de connaître toutes les données, comme par exemple pour des réservations de place dans les avions, et leur analyse oblige à définir l'interaction entre la suite des données et celle des choix de l'algorithme. Les structures de données dynamiques, qui évoluent au cours du temps, peuvent s'autoriser à faire quelques opérations coûteuses si la plupart du temps les requêtes reçoivent une réponse rapide. En résumé, de nouveaux modèles fort intéressants sont apparus, accompagnés d'une profusion de modèles d'analyse de complexité, et on attend avec impatience de voir ceux qui convaincront suffisamment de gens pour se retrouver enseignés dans un curriculum standard.

► KNUTH D.E., *The Art of Computer Programming*, vol. 1 : *Fundamental Algorithms*, Reading (Mass.), Addison-Wesley, 1968 ; *The Art of Computer Programming*, vol. 2 : *Seminumerical Algorithms*, Reading (Mass.), Addison-Wesley, 1969 ; *The Art of Computer Programming*, vol. 3 : *Sorting and Searching*, Reading (Mass.), Addison-Wesley, 1973.

Claire KENYON

→ Computation : Information et codage ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Sciences cognitives ; Système.

COMPUTATION

Le concept de computation souffre sans doute encore, même en anglais, sa langue d'origine, de sa proximité étymologique avec le concept familier de calcul (ou de *calculation* en anglais), qui évoque toujours l'action de compter (issu précisément du latin *computare* : calculer, faire des comptes). Avait-on besoin de ce synonyme apparemment redondant, alors que la mathématique dégageait le calcul de sa gangue comptable (ou numérique), en inventant les multiples formes contemporaines du calcul : matriciel, tensoriel, intégral, fonctionnel, voire, plus récemment, logique ?

Le développement étonnant des sciences et des techniques informatiques depuis un demi-siècle suscite

pourtant des questionnements épistémologiques originaux que l'on ne parvient plus à discuter en s'aidant de l'appareil sémantique du calcul, légué par l'arithmétique, l'analyse numérique ou la logique. Dès lors que l'on s'interroge sur le sens de ce que l'on fait en manipulant une machine digitale computante, que les Français appellent souvent ordinateur et les Anglo-Saxons *computer*.

La progressive formation d'une théorie et d'une science de la computation, née au sein de la logique formelle dans les années 1930, et qui s'en émancipe peu à peu, répond semble-t-il à cette demande de concepts adaptés à ce nouveau paradigme.

M. Minsky, auteur en 1966 du premier manuel d'enseignement de la théorie de la computation (on parlera plus volontiers en français d'informatique théorique dans les années 1980), pourra prédire que « le concept de computation [...] apparu récemment, promet d'être aussi important dans la culture scientifique moderne que le furent les idées de géométrie, de calcul ou d'atome » (*Computation finite and infinite machines*, p. VIII).

La machine de Turing, machine computante

Les premières définitions de la computation ne la présentaient pourtant pas de façon très différente de celles du calcul. Il s'agit toujours de la manipulation selon des règles stables de systèmes de symboles afin d'atteindre des buts (« la solution »). Si ces symboles sont des nombres et si ces règles sont celles de l'arithmétique, la computation est le calcul numérique. Il est alors tentant d'automatiser ou de faciliter à l'aide d'artefacts (bâtons, cailloux, bouliers, calculatrice de Pascal...) l'exercice de ces règles de calcul. Les calculatrices mécaniques puis électromécaniques se développeront beaucoup entre 1850 et 1950. Le moteur calculant (*calculating engine*) conçu par l'Anglais C. Babbage vers 1830 constitue le plus bel achèvement de la théorie du calcul numérique, mais il nous intéresse ici car pour concevoir cette machine, Babbage avait dû introduire un nouveau concept, qu'il appela l'appareil computant (*computing apparatus*). Cet appareil computant était un composant essentiel du magasin (*store*, nous dirons la mémoire), lequel était explicitement distinct du moulin (*mill*, appareil comptant les digits, *digits counting apparatus*). La distinction entre les fonctions de calcul numérique ou digital, et celles de computation, s'exerçant principalement à l'affectation des adresses en mémoire, apparaît ainsi pour la première fois, semble-t-il (A. Hyman, *Babbage, pioneer of the computer*, 1982, p. 272).

Ce fut initialement par un tout autre détour que le concept de computation réapparut dans la science contemporaine, à l'initiative d'un jeune logicien anglais, A. Turing, en 1936. Certes, rares furent à l'époque les scientifiques et les ingénieurs qui prêtèrent attention à l'article qu'il publia alors (dans les *Proceedings of the London Mathematical Society*, article aujourd'hui accessible dans un recueil de textes

essentiels édité par H. Davis, *The Undecidable*, 1965, p. 116-154) sous le titre apparemment curieux : « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungs Problem ». La question de la décidabilité (*entscheidung*) logico-mathématique lancée par Hilbert en 1929 intéressait alors les logiciens (Gödel, Church, Post, Kleene...) et l'on ne prête guère attention sur-le-champ au caractère incongru des premiers mots du titre : « Les Nombres computables », que soixante ans plus tard on traduira en français par nombres calculables, en ignorant le fait qu'A. Turing avait délibérément nommé *computables* les entités, nombres, fonctions, etc., qu'il introduisait précisément pour les différencier des nombres calculables. Il précisait que ce concept de computabilité était équivalent au concept introduit peu avant par le logicien Church de calculabilité effective. Cette effectivité, montrait Turing, tenait au fait que la calculabilité pouvait être effectuée par une machine (ou avec des moyens finis), machine qu'il nommera *computing machine* (machine computante), la distinguant ainsi durablement du concept de *calculating engine* (machine à calculer), remarquablement présenté en 1837, un siècle avant, par C. Babbage.

Church percevra aussitôt l'intérêt de ce concept apparemment fort curieux pour un logicien et le présentera sous le nom qui lui est resté depuis 1937, de machine de Turing. J. von Neumann, qui, à Princeton, connaissait aussi l'article de Turing, ne reconnaîtra son originalité et son importance que onze ans plus tard, lorsqu'il s'intéressera aux développements des premiers calculateurs électroniques aux États-Unis d'Amérique et qu'il connaîtra le projet d'Automatic Computing Engine (ACE), que se proposait de développer le gouvernement anglais en faisant appel au concours décisif d'A. Turing à partir de 1946. « Turing voulait donner une définition générale de ce que l'on entend par automatisme computants [...]. Une boîte noire qui est supposée avoir les attributs suivants : elle possède un nombre d'états finis [...] caractérisés par leur numération et leur énumération [...] et une description de la manière dont elle provoque son changement d'état (de l'état *i* à l'état *j*). Ce changement d'état nécessite quelque interaction avec le monde extérieur consistant d'un long ruban de papier [...] portant des cases [...] qui peut reculer ou avancer d'une case par unité de temps... » (J. von Neumann, 1946, publié en 1951, éd. in Buckley, 1968, p. 97-107). Ce ruban de papier dont chaque case peut porter un symbole digitalisé (Turing montrera qu'on peut toujours les exprimer par des séquences de 0 et de 1, notation booléenne qui manqua à Babbage) deviendra la mémoire enregistrée et enregistrante des *computers* électroniques dont J. von Neumann venait de concevoir l'architecture, architecture qui caractérise encore celle de la plupart de nos ordinateurs, cinquante ans plus tard. Cette mémoire portera sur ces cases des séquences de symboles que la machine computante de Turing saura lire et recopier, sur laquelle elle saura les écrire, ou les enregistrer, qu'elle saura effacer, et sur laquelle elle saura se

« brancher », en accédant à une autre case dont elle connaît l'adresse. Elle dispose ainsi de toutes les fonctions d'une machine computante sans qu'elle ait jamais à préciser si le symbole qu'elle considère est *a priori* une donnée éventuellement à transformer en changeant son état, ou une règle décrivant le changement d'état à effectuer (le programme enregistré dira-t-on avec J. Von Neumann). Aucune contrainte ne pèse *a priori* sur ces règles ou ces fonctions définissant un changement d'état. La machine de Turing pourra donc transformer aussi bien les données qu'elle considère que les règles qu'elle leur applique. Elle peut ainsi se programmer elle-même en fonction des résultats de sa propre exécution, en définissant une fonction effective comme une règle qui, recevant un « argument » (par exemple un nombre ou un état), nous dit comment computer « la valeur » de la fonction pour cet argument (un état *j*). On peut faire exécuter effectivement par une machine ou par un automate cette fonction computable, qui aura alors la forme d'une séquence de symboles calculables (et donc éventuellement d'un nombre calculable, dès lors que ce nombre ou plus généralement ce symbole est digitalisé ou discret) : ce qui définit une machine computante. Qu'il s'agisse de déchiffrer un message codé (domaine de la cryptologie), de le traduire dans une autre langue, de résoudre un puzzle graphique ou cryptarithmétique, de décider d'un mouvement lors d'une partie d'échecs ou de résoudre un problème d'algèbre ou de géométrie, la machine computante ne se restreint pas à l'usage de nombres arithmétiques et manipule indifféremment les symboles calculables, dès qu'elle rencontre, après chaque étape, une indication sur la prochaine fonction qu'elle devra assurer. Rien ne l'assure *a priori* que ces fonctions la conduiront toujours au bon « résultat recherché », mais elle saura honorer son contrat de moyen.

La théorie de la computation (et aujourd'hui la pratique des machines computantes) propose ainsi un modèle général et simulable de toutes les formes de « raisonnement humain » que l'on est capable de décrire sous la forme de fonctions et de symboles calculables. Faut-il préciser que ce modèle interprétable en termes de computation ne constitue pas une preuve que le raisonnement humain s'exerce effectivement et toujours en respectant ce modèle ? En revanche, on conviendra qu'il permet de simuler empiriquement bien des raisonnements humains (ou que l'on attribue aux humains), dès lors que ces raisonnements, aussi inductifs soient-ils, peuvent être décrits par des systèmes de symboles calculables.

Computation, intelligence et cognition

La théorie de la computation apparaît alors comme la palette du peintre : tant qu'il ne dispose pas d'un modèle à représenter, il ne peut rien en faire. La question de la représentation des raisonnements exprimables par l'esprit humain est aussi vieille que leur culture. Dialectique, rhétorique et logique proposent

depuis longtemps des réponses souvent très familières, que les systèmes d'enseignement tentent en général de réduire à la liste des raisonnements conduisant aux résultats tenus pour bons ou vrais.

En publiant en 1854 *Les Lois de la pensée*, un traité dont « le but est d'étudier les lois fondamentales des opérations de l'esprit par lesquelles s'effectue le raisonnement, de les exprimer dans le langage symbolique d'un calcul, puis sur un tel fondement, d'établir la science de la logique et d'en caractériser la méthode », G. Boole annonçait un projet bien ambitieux, mais ses contemporains et ses confrères mathématiciens et logiciens ne lui tinrent pas rigueur de son immodestie. L'algèbre de Boole (que ce traité apportait par surcroît) est aujourd'hui familière à tous les écoliers, et sa puissance, comme son économie, pour exprimer sous forme symbolique toute forme de raisonnements strictement déductifs est universellement reconnue.

Au point que la logique booléenne, devenue la logique mathématique, constitue l'archétype des bons raisonnements, voire des seuls raisonnements autorisés. On n'est pas surpris que l'Informatique (ou les sciences et les techniques des machines computantes selon sa désignation quasi officielle aux États-Unis d'Amérique) ait, dès l'origine, cherché à exprimer les raisonnements qu'elle voulait reproduire (ou programmer) par le langage de la logique booléenne (devenue, depuis, les *Principia Mathematica* de Russell et Whitehead), la logique mathématique, voire la logique tout court. Elle trouvait là, clefs en main, le moyen le plus assuré pour reproduire des raisonnements universellement acceptables, conduisant à des résultats non seulement effectivement calculables (construits), mais aussi logiquement vrais. Tout raisonnement pouvant être mis sous une forme algorithmique, par une séquence de règles opératoires dont on démontrait préalablement que leur application conduisait certainement au résultat recherché, s'avérait *ipso facto* calculable, et donc programmable. La collecte des algorithmes déjà rédigés, puis la création de nouveaux algorithmes, constitua bientôt l'essentiel de l'activité noble de la science informatique, leur programmation sur des machines computantes étant affaire d'ingénierie logicielle. A. Turing eut très tôt l'intuition de la généralité de la computation.

Rien ne le contraignait à ne reproduire que des raisonnements préalablement mis sous une forme algorithmique validée, pas plus qu'à ne s'exercer que sur des nombres calculables arithmétiquement (*Systems of logic based on ordinal*, 1939, dans *The Undecidable*, 1965, p. 208-209). Le raisonnement consiste aussi à « aider l'intuition par des arrangements convenables de propositions, voire par des dessins et des figures [...] il peut alors prendre la forme d'investigation heuristique » (p. 209).

Le concept de raisonnement heuristique ne prendra sa forme actuelle que peu après, introduit par G. Polya en 1945 (*How to solve it ; a new aspect of mathematical method*). Mais il se présentait sous la forme d'un

raisonnement calculable différent du raisonnement algorithmique, en ceci seulement que la démonstration préalable de sa convergence vers le résultat cherché n'est pas acquise. Plausible sans doute dira Polya (*Les Mathématiques du raisonnement plausible*, 1952), mais pas certaine. On découvrira plus tard que le logicien américain C.S. Pierce avait dégagé ce concept de raisonnement abductif (qu'il empruntait à Aristote), raisonnement pouvant être mis aisément sous forme reproductible par des systèmes de symboles, et donc calculables. A. Turing explorera les modalités pratiques et certaines des conséquences de cette calculabilité des heuristiques dans deux articles qui vont renouveler les conceptions contemporaines de l'intelligence et de son exercice en situation mal ou pas « calculable » : « Intelligent Machinery » en 1948 et « Computing Machinery and Intelligence » en 1950, ce dernier publié dans une revue de psychologie et de philosophie, *Mind*, et accessibles aujourd'hui dans les *Collected works of A.M. Turing* (vol. 3, D.C. Ince éd. 1992). Les deux premiers pionniers de l'*Intelligence artificielle*, A. Newell et H.A. Simon, en auront connaissance dès 1952 et s'inspireront des réflexions d'A. Turing pour construire en 1956 le premier programme informatique qui, manipulant des heuristiques, produira « intelligemment » une démonstration originale d'un théorème. Ils parlaient plus volontiers à l'époque d'heuristiques programmables que de « d'intelligence artificielle », mais c'est ce néologisme qui fut retenu par l'usage, suscitant bon nombre de réactions de rejet viscéral, qui retardèrent pendant près de quinze ans les développements de la théorie de la computation, la confinant dans une théorie locale de la calculabilité. Un article de synthèse d'A. Newell, « Heuristic programming : ill-structured problem », publié en 1969 (dans *Progress in OR*, vol. III, éd. J. Aronofsky, p. 361-414), donne une bonne synthèse de ce que fut l'expérience acquise par la programmation informatique des raisonnements heuristiques durant cette période.

Ces expériences allaient susciter une sorte de maturation épistémologique que jalonnent quelques textes que l'on tient toujours pour influents. En 1963 paraît le recueil édité par Feigenbaum et Feldman, *Computers and Thought*, qui sera souvent réédité pendant trente ans, publiant les textes clefs d'A. Turing, d'H.A. Simon et A. Newell, de M. Minsky, etc., le flambeau étant repris en 1995 par le recueil édité par G. Luger, *Computation and Intelligence*, qui intègre les importantes pièces nouvelles sur la représentation des connaissances et le raisonnement en situation complexe. En 1969 paraît *The Sciences of the Artificial* d'H.A. Simon, bientôt complété par la *Conférence Turing* (1975), d'A. Newell et d'H.A. Simon, qui proposera une discussion épistémologique fort constructive de la théorie de la computation, *Computerscience as Empirical Inquiry, Symbol and Search* (*Communication of the A.C.M.*, mars 1976, repris dans G. Luger, 1995, p. 91-120).

Un des intérêts de cette discussion est de

reconsidérer le concept de symbolisation sur lequel, depuis A. Turing, la science informatique et la logique symbolique ne s'étaient sans doute pas assez interrogées. En proposant de tester empiriquement l'hypothèse dite du « système de symbole physique », ils suggèrent de remplacer le concept de symbole considéré comme un objet (ou un jeton) par le concept plus complexe à formaliser, mais interprétable, de fonction computable ou de processus de computation, le symbole s'entendant alors comme un système computant des symboles, y compris récursivement lui-même. (H. von Foerster explorera plus avant cette hypothèse de récursivité dans *Objects: Tokens for (eigen) Behaviours*, 1976, publié dans *Observing systems*, 1981, p. 273-286.)

Ces discussions ouvrent la voie à une théorie de la computation symbolique qui serait aussi une théorie de la symbolisation computante, proposant une interprétation épistémique des rapports de la représentation et de la connaissance « raisonnable » dans le cadre de la dialectique millénaire du faire et du savoir. Aussi n'est-on pas surpris d'observer la conjonction contemporaine des théories de la computation et des théories de l'intelligence au sein des sciences de la cognition, dont les paradigmes émergent au début des années 1980. L'impérialisme initial des théories connexionnistes de la cognition, qui aspirent à représenter fidèlement toute forme de raisonnement sans faire appel aux théories de la computation symbolique, s'est très rapidement atténué (ne serait-ce que parce que leur expérimentation sur machine s'exprime nécessairement sous la forme de fonctions computables).

On peut présumer que la modélisation et la simulation de processus de récursion auto-organisatrice continueront à mobiliser toutes les ressources de l'intelligence, qu'elles soient réactives (ou connexionnistes), ou créatives (ou computationnelles). La conception de systèmes symboliques riches et l'élaboration d'heuristiques investigatrices originales seront sûrement précieuses pour établir des représentations plausibles et intelligibles de ces systèmes téléologiques complexes que sont les êtres humains en société raisonnant leurs comportements.

Computation et complexité

Une computation sur machine (exécution d'un programme informatique) s'exerce par construction dans le temps : des séquences d'étapes de changement d'état de symboles computables. Même si le raisonnement représenté s'exprime par un algorithme dont on a au préalable montré que l'enchaînement des opérations élémentaires qu'il prescrit conduira certainement au résultat annoncé, il arrivera souvent qu'en pratique la computation de cet algorithme requière une durée insupportable et une capacité de mémorisation irréalisable. L'exemple de l'algorithme qui permettrait de gagner à coup sûr au jeu d'échecs est souvent cité. Il consiste à décrire pas à pas l'arbre des mouvements possibles pour chaque joueur successivement. Aisé à

écrire, il est impossible à exécuter en pratique, la computation du « bon choix » à chaque pas requérant plusieurs décennies pour computer les quelque 10 *puissance* 120 mouvements ultérieurs possibles, les évaluer et les comparer. (*Deepest blue* parvient à évaluer environ 10 *puissance* 5 positions à la seconde en 1996, ce qui ne lui permet d'explorer l'arbre que sur une « profondeur » de dix nœuds.) Ces limites de capacité computationnelles sont d'autant plus contraignantes en pratique qu'on ignore *a priori* lorsqu'on commence la computation d'un algorithme sur machine ce que sera la durée de son exécution : convergera-t-il rapidement ou lentement vers le résultat cherché ? Ne peut-on disposer de quelque critère permettant de la prédire avant de se lancer dans sa programmation, qui peut requérir éventuellement plusieurs millions d'instructions élémentaires, puis de son exécution qui peut demander quelques minutes ou plusieurs siècles ?

Logiciens et informaticiens ont beaucoup étudié depuis trente ans cette question de la complexité des algorithmes (et plus généralement de la complexité computationnelle), les considérations économiques de coût de la computation et de coût des erreurs de programmation les y incitant. On doit à A. Kolmogoroff, en Russie, et à G. Chaitin, aux États-Unis d'Amérique, les premières formulations du concept de complexité algorithmique par la mesure de la longueur du plus petit programme qui permette de reconstruire la représentation d'un raisonnement computable (par exemple si la représentation est donnée sous la forme de 10 lettres a et 10 lettres b dans le désordre, il faudra énumérer les 20 lettres baabbbaba... pour la reconstruire ; si elle est donnée sous la forme ababab..., on pourra la décrire par l'expression plus courte : 8 fois ab).

La résolution du même problème pouvant souvent être déterminée par des algorithmes différents, on sera fort incité à rechercher les algorithmes de moindre « complexité », en les caractérisant par un indicateur de « longueur » (nombre d'instructions élémentaires) plutôt que par un indicateur de durée effective d'exécution, cette dernière dépendant de la « puissance » de la machine utilisée (laquelle augmente sensiblement chaque année). A. Turing l'avait d'ailleurs montré dès 1947 : « La complexité de la computation est concentrée sur la bande (qui porte la description du programme) et non sur la machine proprement dite » (*Collected Works*, III, p. 93).

Ces études sur la complexité de théories de l'algorithme que l'on appelle souvent les théories logiques sont en général présentées sous le nom de théories de la complexité, abrégé inadéquatement qui masque parfois les développements des sciences de la complexité dont elles ne constituent qu'une composante. Elles ont conduit à dégager deux notions qui forment aujourd'hui l'essentiel de la théorie de la complexité algorithmique, connue sous le nom « P, NP », P pour Polynomial, et NP pour Non-Polynomial, exponentiel par exemple : si n est le nombre d'instructions et de données élémentaires décrivant l'algorithme, on

établira une échelle de complexité croissante de cet algorithme, en considérant la longueur de la bande utilisée par la machine de Turing théorique qui pourrait la computer. Si cette longueur (exprimant une durée théorique de la computation) s'exprime par une fonction polynomiale du nombre n, l'algorithme sera dit de « complexité de type P » ; si sa valeur est supérieure, elle sera dite « de type NP ». Un algorithme de type NP n'est pas *a priori* effectivement computable par des moyens aujourd'hui concevables. Il ne suffit donc pas d'avoir établi des algorithmes dont on a « démontré » qu'ils sont de type décidable (au sens de Hilbert-Gödel) convergeant de façon certaine vers le résultat annoncé. Il faut aussi montrer qu'ils sont effectivement computables. Leur complexité devra être de type P bornée par une fonction polynomiale de leur représentation minimale.

Et même dans ce cas, on ne sera pas toujours certain de parvenir effectivement à un résultat acceptable : la complexité de type P n'est pas encore bien explorée. Comment être certain *a priori* qu'un programme d'un million d'instructions ne contient plus d'erreurs alors qu'on est quasi certain d'en avoir introduit par mégarde en l'écrivant ou en le recopiant, même si celui-ci fonctionne de façon apparemment satisfaisante lors des premiers essais ?

L'expérience de l'intelligence artificielle et de la programmation des heuristiques a suscité d'autres voies de recherche plus pragmatiques, dans le domaine de la computation effective. L'observation des comportements raisonnés des humains, qui conviennent tous des contraintes que leur imposent les limites de leurs propres capacités computationnelles, conduit à de nombreuses investigations fructueuses dans lesquelles les logiques déductives ont peu de part.

Le raisonnement humain permet l'élaboration d'inferences rusées et plausibles, qui, mobilisant de multiples ressources disponibles mais non initialement décrites, et de nombreuses routines établies au fil d'expériences multimillénaires (routines que décrivent par exemple maximes, proverbes et autres conventions), vont s'avérer sinon efficaces au moins effectives : on n'a peut-être pas résolu exactement le problème que l'on se posait, mais on a résolu, dans une durée tenue pour acceptable, et de façon tenue pour satisfaisante, le problème que l'on souhaite maintenant considérer, lequel n'est pas nécessairement identique au problème de départ. Ces modes de raisonnement rusés sont reproductibles et représentables sous formes computables (des séquences de règle appliquée à des symboles) et pourront donc être programmés.

Une étude célèbre de P. Langley et H.A. Simon (éd.) intitulée *Scientific discovery, computational exploration of the creative processes* (1987) illustrera ceci dans le cas familier de quelques découvertes scientifiques classiques, productions courageuses et modestes de raisonnements intentionnels de type tâtonnant. Heuristiques reproductibles qui affecteront tout à tour les représentations du problème et les représentations des raisonnements.

Exercices de rationalité de type dialectique ou plausible ou récursive, que J.B. Grize (1983) proposera d'appeler logique naturelle par contraste et par complément avec celle, déductive, de la logique mathématique : raisonnements abductifs (C.S. Peirce), ou plausibles (G. Polya), ou heuristiques (D. Lénat, J.-L. Laurière), qui sont aisément représentables sous formes de règles ou de fonctions computables. Ainsi, par exemple, les Productions au sens de E. Post, que l'on utilise dans nombre de systèmes experts, sous la forme « si... (telle condition), alors... (telle action) ». On ne peut pas dire de ces formes de raisonnements rusés qu'elles ont été conçues pour contourner le mur de la complexité algorithmique que symbolise la transition P-NP, puisqu'elles furent élaborées bien avant que la logique déductive qui le construit ne fût formalisée. La *Métis* des Grecs est bien une forme computable puisque communicable « d'intelligence et de pensée [...] ensemble complexe, mais très cohérent. d'attitudes mentales, de comportements intellectuels qui combinent le flair, la sagacité, la prévision, la souplesse d'esprit, la feinte, la débrouillardise, l'attention vigilante, le sens de l'opportunité » (M. Dehienne & J.-P. Vernant, *Les ruses de l'intelligence. La Métis des Grecs*, p. 10).

La limitation des capacités computationnelles de l'esprit humain fut mère de l'invention, et les raisonnements téléologiques de type heuristique s'avèrent souvent fort pertinents pour élaborer des comportements réfléchis en situation complexe, raisonnements ingénieux que nous pouvons communiquer et exercer commodément en les mettant sous forme computable (A. Turing le soulignant dès 1939 dans *Collected Works*, vol. 3, p. 209).

Parmi ces dispositions ingénieuses, il faut mentionner celles dégagées par l'intelligence artificielle sur la question jusqu'alors peu explorée par la logique algorithmique de la représentation des connaissances pour pouvoir les computer sans les réduire *a priori*. Les contributions sur ce thème d'A. Newell, introduisant le concept de *knowledge level* en 1982 et les techniques mnémoniques du *chunking* en 1981 (A. Newell, *Unified theories of cognition*, 1990), ou celles de J. Pitrat développant le concept de *Métacognition* (1990), constituent deux des illustrations les plus convaincantes de ces développements à l'interface des théories de la computation et de la symbolisation.

Computation et récursivité auto-organisante

Le passage d'un paradigme du calcul arithmétique à celui du paradigme de la computation symbolique que provoqua l'introduction du concept de nombre (et de fonction) computable par A. Turing en 1936 allait prendre sa pleine mesure en 1976 par une célèbre paraphrase d'une formule de W. Mac Culloch, proposée par A. Newell et H.A. Simon, dans leur *Conférence Turing* : « Qu'est-ce qu'un nombre, qu'un homme peut connaître, et un homme qui peut connaître son nombre ? » (alors même que peut-être ses neurones

commettent des erreurs !) interrogeait W. Mac Culloch en 1961 par l'article célèbre ayant ce titre (1965, p. 1-18) ; formule qu'A. Newell et H.A. Simon proposaient en 1970 de généraliser : « Qu'est-ce qu'un symbole, que l'intelligence peut utiliser, et l'intelligence qui peut utiliser un symbole ? » (in G. Luger, 1995, p. 94).

Ce passage du nombre calculable et de l'homme calculant au symbole computable et à l'intelligence computante exprime peut-être l'argument essentiel de la théorie de la computation. Le nombre ne pouvait transformer le calculateur qui le transformait, alors que le symbole s'entend par sa capacité fonctionnelle à transformer le symbole qui vient de le transformer. Le symbole, organisé (une séquence de digit), devient organisant par sa capacité à exercer récursivement sa fonction sur l'opérateur qui le transforme. Ce mode de représentation du raisonnement récursif (« quoi que le computer ait computed, il ne sera plus jamais le même ») par les symboles computables suggère déjà d'autres interprétations des théories de la computation, en particulier dans l'interprétation des phénomènes d'auto-organisation. Formulée par H. von Foerster en 1959 et 1974 (*Observing Systems*, 1980, p. 1, 24 et p. 273-286), elle sera reprise par E. Morin (*La Méthode*, t. II, p. 184, et t. III, p. 123) sous le nom de « l'hypothèse du computo » pour rendre compte intelligiblement de phénomènes biologiques et cognitifs d'auto-organisation.

► ABU-MOSTAFA Y.S., *Complexity in Information Theory*, New York, Springer Verlag, 1988. — BOOLE G., *Les Lois de la pensée* (1854), texte angl. ; trad. fr. S. Diagne, Paris, Vrin, « Mathesis », 1992 ; *An Investigation of the Laws of Thought...* — DAVIS M., *The Undecidable. Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvability Problems and Computable Functions*, New York, Raven Press, 1965. — DEHORNOY P., *Complexité et décidabilité*, Paris, Springer Verlag, 1993. — DETIENNE M., VERNANT J.-P., *Les ruses de l'intelligence. La Méthode des Grecs*, Paris, Flammarion, 1974. — DEWEY J. (1938), *Logique, la théorie de l'enquête*, texte angl., trad. fr. et présentation G. Deledalle, Paris, PUF, 1967, rééd. 1993. — FEIGENBAUM E., FELDMAN J., *Computers and Thought*, New York, McGraw Hill, 1963. — GREEN D., BOSSOMAIER T., *Complex Systems. From Biology to Computation*, Amsterdam, IOS Press, 1993. — GRIZE I.-B., *Logique naturelle et communication*, Paris, PUF, 1996. — HODGES A., *Alain Turing, the Enigma*, New York, Simon and Schuster, 1983. Traduction Nathalie Zimmermann : Alan Turing ou l'énigme de l'intelligence, Paris, Éd. Payot, 2004. — HYMAN A., *Charles Babbage, Pioneer of the Computer*, New Jersey, Princeton University Press, 1982. — LARGAULT J., *Intuitionnisme et théorie de la démonstration* (textes de Bernays, Brouwer, Gentzen, Gödel, Hilbert, Kreisel, Weigel), Paris, Vrin, 1992. — LE MOIGNE J.-L., *Intelligence des mécanismes et mécanismes de l'intelligence*, Paris, Fayard « Fondation Diderot », 1986 ; Sur un exceptionnel manifeste épistémologique : Symbols and search, in J. Pitrat (éd.), *Représentation, découverte et rationalité. Hommage à Herbert Simon*, Revue d'intelligence artificielle, vol. 16, n° 1-2/2002, Paris, éd. Lavoisier, 2002 ; sur l'épistémologie de la science informatique, sciences de la computation, in J.-L. Le Moigne, *Le Constructivisme. Tome II, Épistémologie de l'interdisciplinarité*, Paris, éd. L'Harmattan, 2002. — LUGER G.F., *Computation and Intelligence. Collected Readings*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1995. — MINSKY M., *Computation. Finite and Infinite*

Machines, Englewood Cliffs (New Jersey), Prentice Hall Inc., 1967. — NEUMANN J. VON, *The General and Logical Theory of Automate* (1948-1951), in BUCKLEY W. (1968), trad. fr. J. Miermont & D. Ernst, in *Piste*, oct. 1992, n° 3, p. 9-24 ; *The Computer and the Brain*, Yale University Press, 1958 ; trad. fr. D. Pignon, *L'Ordinateur et le cerveau*, Paris, La Découverte, 1992. — NEWELL A., « Heuristic Programming : Ill-structured Problems, in J.S. Aronofsky », *Progress in Operations Research. Relationship between O.R. and the Computer*, vol. 3, New York, J. Wiley and Son, 1969, p. 361-414 ; *Unified Theories of Cognition*, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1990. — NEWELL A., SIMON H.A., « Computer Science as an Inquiry : Symbol and Search », *Communication of the A.C.M.*, mars 1976, vol. 19, n° 3, p. 113-126. — PAGELS H., *The Dreams of Reason* (1988) ; trad. fr. M. Garène, *Les Rêves de la raison. L'ordinateur et les sciences de la complexité*, Paris, InterÉditions, 1990. — PITRAT J., *Métaconnaissance, futur de l'intelligence artificielle*, Paris, Hermès, 1990. — POLYA G., *Mathematics and Plausible Reasoning*, vol. 1 : *Induction and Analogy in Mathematics*, Princeton, Princeton University Press, 1954 ; vol. 2 : *Patterns of Plausible Inference*, Princeton, Princeton University Press, 1954 ; trad. fr. R. Vallée, *Les Mathématiques et le raisonnement plausible*, Paris, Gauthier-Villars, 1958 ; *How to solve it. A New Aspect of Mathematical Method*, Princeton, Princeton University Press, 1945, rééd. New York, Doubleday Anchor Books, 1957 ; trad. fr. Mesnage, Paris, Dunod, 1962. — PYLYSHYN Z.W., *Computation and Cognition. Toward a Foundation for Cognitive Science*, Cambridge (Mass.), MIT Press « Bradford Book », 1986. — SIMON H.A., LANGLEY P., BRADSHAW G.L., ZYTKOW J.M., *Scientific Discovery. Computational Explorations of the Scientific Processes* (P. Langley est mentionné comme premier auteur), Cambridge (Mass.), MIT Press, 1987. — TURNING A.M., *Collected Works*, vol. 3 : *Mechanical Intelligence*, Amsterdam, North-Holland DC Ince, 1992 ; « Computing Machinery and Intelligence », *Mind*, 1950, vol. LIX, n° 236 (trad. fr. in ANDERSON A.R. éd., *Pensée et machine*, Seyssel, Champ Vallon, 1983, p. 39-67). — VON NEUMANN J., *The General and Logical Theory of Automate*, 1948-1951, dans W. Buckley, 1968 ; trad. fr. J. Miermont et D. Ernst in *Piste*, oct. 1992, n° 3, p. 9-24 ; *The Computer and the Brain*, Yale University Press, 1958 ; trad. fr. D. Pignon, *L'Ordinateur et le cerveau*, Paris, La Découverte, 1992.

Jean-Louis LE MOIGNE

→ Cognition et sciences cognitives ; Cognitivisme ; Complexité ; Information et codage ; Informatique ; Langages formels ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Récurrence ; Sciences cognitives ; Turing.

COMTE Auguste, 1798-1857

À dix-neuf ans, peu attiré par une carrière d'ingénieur, Comte néglige de se présenter aux examens des écoles d'application et commence une vie précaire de professeur itinérant. Fasciné par Saint-Simon dont il devient le secrétaire, le jeune polytechnicien confie, la même année 1817, à son ami Valat que ses « travaux seront de deux ordres : scientifiques et politiques ».

Publié sous le patronage de Saint-Simon, le *Plan des travaux scientifiques nécessaires pour réorganiser la société* (1822) cherche à dériver la possibilité d'un nouveau pouvoir spirituel de la loi des trois états dont Comte donne la première formulation. Découvrant dans la systématisation objective du savoir humain

l'indispensable préalable théorique à toute éducation scientifique et la condition indirecte de toute régénération sociale, il insiste sur la division des pouvoirs temporel et spirituel, sursoit à toute élaboration directement politique et, se brouillant ainsi avec Saint-Simon, entreprend un *Cours de philosophie positive* qui l'occupera jusqu'en 1842. Associée au principe de la classification des sciences, la loi des trois états découvre l'accession à la positivité de six sciences fondamentales — mathématique, astronomie, physique, chimie, biologie, sociologie — dont seule la dernière, qu'il fonde et baptise, permet de garantir la possibilité d'une systématisation complète du savoir humain et de faire converger ses travaux scientifiques et ses impulsions politiques.

Ayant notamment pour effet de décaler l'idée d'une histoire des sciences, cette « opération philosophique » saluée par la presse républicaine conduit Comte à revendiquer en vain la création d'une chaire d'histoire des sciences en 1844, alors qu'il est privé de tout emploi. Faute d'être entendu des politiques et des savants, il s'adresse directement aux prolétaires dans le *Discours sur l'esprit positif* qui, livrant un condensé du *Cours*, marque un infléchissement vers des préoccupations essentiellement pratiques que confirmeront, en 1848, la fondation de la Société positiviste et la publication du *Discours sur l'ensemble du positivisme* dont le titre signale la naissance d'une doctrine. Dans son *Système de politique positive* (1851-1854), substituant le titre signale la naissance d'une doctrine. Dans son *Système de politique positive* (1851-1854), substituant celle d'une religion de l'Humanité dont il s'institue le chef spirituel, Comte remanie sa synthèse objective initiale au profit d'une synthèse subjective faisant de la morale la septième science et débouchant sur une politique qui donnera lieu aux exploitations les plus opposées.

● *Œuvres*, 12 vol., Paris, Anthropos, 1968.

► ARBOUSSE-BASTIDE P., *La Doctrine de l'éducation universelle dans la philosophie d'A. Comte*, Paris, PUF, 2 t., 1957. — DELVOLVÉ J., *Réflexions sur la pensée comtienne*, Paris, Alcan, 1932. — GOUHIER H., *La Jeunesse d'A. Comte et la formation du positivisme*, Paris, Vrin, 3 t., 1933, 1936, 1941. — MACHÉREY P., *La philosophie et les sciences*, Paris, PUF, 1989. — MUGLIONI J., *A. Comte, un philosophe pour notre temps*, Paris, Kimé, 1995. — PICKERING M., *A. Comte, An Intellectual Biography*, Cambridge Univ. Press, 1993. — Coll. : *Les Études philosophiques*, n° 3, juill.-sept. 1974 (numéro spécial).

François BOITUZAT

→ Continuité ; Crise de la physique moderne ; Découverte ; Élément ; Épistémologie ; Localisations prébrales ; Loi de la nature ; Phénoménisme ; Positivisme ; Précaution ; Progrès ; Réel ; Scientisme ; Travail ; Vitalisme et mécanisme.

CONCEPT

La difficulté de rendre compte du concept de « concept » tient à ce qu'il est partout dans la tradition — on le fait habituellement remonter à l'Idée

platonicienne —, mais qu'il ne prend un sens fonctionnellement et systématiquement distinct de l'Idée qu'avec Kant. L'histoire du concept épouse ainsi les méandres de celle de l'Idée. La différence minimale que l'on pourrait proposer est que le mode de rapport à l'objet de connaissance est toujours en jeu dans le concept, alors que l'Idée est elle-même cet objet, connu de préférence immédiatement. L'hypothèse de Morris Weitz, dans *Theories of concepts* (1988), est que l'on peut déterminer une théorie du concept chez tout philosophe. Richard L. Schwartz, *Der Begriff des Begriffs in der philosophischen Lexikographie. Ein Beitrag zur Begriffsgeschichte* (1983), traite du terme de concept sans le distinguer systématiquement de l'idée, comme c'est le cas dans beaucoup d'encyclopédies.

On appelle « concept » un mode de représentation universel, médiat et inférentiel du rapport à l'objet de connaissance. Le « concept » est spécifique de la connaissance, philosophique ou scientifique. Le concept se distingue en effet de l'idée en ce qu'il se présente comme résultat d'un acte de conception (du latin *concipere*, saisir ensemble) ou comme entité objective se rapportant à quelque chose d'autre que lui-même. Le concept ne se réduit ni au psychologique quoiqu'il soit le résultat d'un acte de pensée, ni à l'empirique, quoiqu'il ne se confonde pas avec l'item de pensée, ni à la linguistique, ni à sa propre définition quoiqu'il soit le corrélat de sens de certaines expressions linguistiques, ni à l'idéal quoiqu'il soit également universel. C'est une caractéristique du concept de « concept » de faire intervenir des ordres distincts et d'être comme un passe-partout qui permette d'accéder à chacun d'entre eux. C'est qu'avec lui il y va du statut du théorique, non de celui du sujet pensant ou de celui de l'objet de pensée. Selon la perspective, il peut être décrit soit comme point de condensation ou d'accumulation de problèmes théoriques, soit comme unité élémentaire de la construction théorique.

Ces caractéristiques font qu'il n'est pas facile de décrire quelque chose qui soit concept, distinct de l'idée, du mot, de la chose, de la pensée, de l'Idée, et qui soit descriptible dans l'ensemble de la tradition philosophique comme une fonction spécifique. Le mot est d'origine latine, et manque en grec — ou n'est représenté que par une constellation de termes susceptibles d'avoir d'autres significations ; c'est d'ailleurs aussi le cas en langue latine, où l'on trouve aussi bien, à côté de *conceptus*, *intentio*, *notio*. Cette situation dessine les solutions possibles de traitement du concept de concept : ou il dérive de l'idée, ou il possède une histoire distincte et complémentaire à celle-ci. C'est cette seconde solution que soutient Morris Weitz dans *Theories of concepts* (1988), qui postule l'existence d'une véritable théorie du concept tout au long de la tradition philosophique, dont les caractéristiques ne seront brisées que par le Wittgenstein des *Investigations* et quelques — rares — auteurs contemporains. Le critère qu'il propose est que le « concept » est en quelque sorte « fermé » (*closed*) par un ensemble de conditions nécessaires et suffisantes permettant de

l'identifier, critère que même les grands changements proposés par Frege dans la conception du concept ne modifieront pas.

Ainsi on peut dire que Platon a eu en vue dans les Idées quelque chose d'équivalent au concept lorsqu'il en faisait le corrélat d'une définition – qui ne se confond donc pas avec celle-ci, en particulier dans les dialogues dits socratiques ; mais il ne se confondrait pas pour autant avec l'Idée ou la forme qui est plutôt la condition même du concept : sans idée, il n'y aurait pas de concept possible, celui-ci étant la « disposition » (selon Weitz) à distinguer, à poser la question « qu'est-ce que... ? » Mais la connaissance de l'idée en tant que telle n'est pas inférentielle, et donc non conceptuelle.

C'est sans doute Aristote qui le premier a inventé le concept comme entité (entité définitionnelle selon Weitz) conçu à la fois comme abstrait de l'empirique, comme mode de connaissance à la fois médiat et général, et comme mode de classification entre le genre et l'espèce, comme intension et extension. Toutes ces caractéristiques semblent aller de soi ensemble : si le concept résulte de ce qu'il y a de commun entre plusieurs étants, il est normal qu'il soit plus général que chacun de ceux-ci, et donc connaissance médiante. La classification entre le genre et l'espèce va de pair avec la syllogistique aristotélicienne. Chacun de ces caractères sera important dans la suite de l'histoire du concept : il subira des modifications en fonction de la façon dont on pensera d'une part l'abstraction et son statut – d'où découleront les distinctions classiques entre « concept formel » (du côté de l'idée) et « concept objectif » (du côté de l'objet) –, d'autre part l'identification du logique à la syllogistique ou aux mathématiques.

Ainsi l'histoire du concept est déterminée à la fois par sa possibilité de définition et par sa relation à l'empirique. Cette double caractérisation fait hésiter le statut du concept entre l'universel qui est sa compréhension – en ce qu'il est corrélat d'une définition –, et le général – en ce qu'il est formé dans un acte d'abstraction du donné empirique qui forme son extension. Cette situation rend compte des tendances doctrinales de l'interprétation métaphysique du concept : soit plus proche du mot et de la singularité nominale, donc partiellement arbitraire eu égard aux individus de l'empirique, soit acquérant une forme d'autonomie ou de réalité le rapprochant de l'idée. Les théories du concept du Moyen Âge : nominalisme, conceptualisme, réalisme sont des choix parmi ces possibles.

Il est probable que les traditions qui distinguent parfaitement le concept de l'idée soient plutôt d'origine aristotélicienne ; néanmoins la constellation de termes qui gravite autour de « conceptus » se trouve aussi bien représentée dans des philosophies qui se distinguent au premier chef d'Aristote. Mais ce débat n'est ici que secondairement pertinent : ce qui importe est qu'à un certain moment le philosophe ne peut plus explicitement confondre concept et idée, au moins dans la mesure où il cherche à comprendre la science : avec

l'œuvre de Kant se fait systématiquement la distinction entre concept et idée, et cela dans le but de comprendre l'édifice scientifique newtonien. Ou plutôt, l'idée est bien un concept, mais qui n'est pas susceptible d'être limité par l'expérience : elle a une valeur régulatrice et non constitutive de la science comme telle. On pourrait faire l'hypothèse que le concept apparaît comme individué et fonctionnel lorsqu'il s'agit de comprendre les sciences et les relations de la philosophie aux sciences : ainsi chez Aristote, à l'époque où des domaines scientifiques apparaissent dans leur identité, chez Kant avec Newton comme aboutissement de la révolution copernicienne et de l'apparition des sciences modernes, chez les modernes – positivisme et positivisme logique – avec la diversification des sciences et l'apparition d'une logique plus mathématique que celle d'Aristote, et lorsque l'on cherche à identifier le théorique plus encore que le spéculatif. Et dans toute l'épistémologie contemporaine la notion de concept – chez Hempel, Nagel, Toulmin, mais aussi dans l'importante tradition française Cavailles, Lautman, Bachelard, Canguilhem, etc. – devient centrale et fonctionnelle, alors que l'idée n'est pas tant un objet de l'épistémologie, mais est plutôt proche de la « vue de l'esprit ». Le concept devient la garantie que l'on s'occupe de la science telle qu'elle se fait et non telle qu'elle est pensée dans la conscience scientifique.

Kant isole les concepts en refusant tout d'abord d'en faire une généralisation des données des sens comme les empiristes, mais en donnant une valeur intrinsèque à celles-ci, ce que ne savaient faire les rationalistes : il supprime ainsi un débat classique, et remplace la problématique entre les idées simples et composées par la distinction des concepts purs et des concepts empiriques. Cela suppose l'isolement non seulement du concept, mais de la sensibilité en tant que telle, rigoureusement passive et indéterminée. Le problème de la connaissance scientifique sera donc d'abord, à tous les niveaux, empirique et transcendantal, celui de la synthèse entre des éléments hétérogènes, parmi lesquels le concept. Cette nouvelle situation modifiera profondément la notion de concept : il devient une règle d'identification du donné, et, pour ce faire, ne peut plus « ressembler » d'aucune façon au donné, auquel il ne s'applique plus directement, mais au travers d'un schématisme. Ainsi s'évanouissent les paradoxes de l'application des idées aux choses, tels qu'ils avaient été reconnus par un certain nombre d'empiristes, en particulier Berkeley : comment peut-on avoir une idée générale du triangle, si cette généralité – ou cette universalité – implique dans sa représentation qu'il ne soit ni scalène, ni rectangle, ni isocèle, etc. Le paradoxe ne peut être levé qu'en supposant qu'aucune de ces déterminations ne soit donnée comme telle dans l'intuition : chacune est une détermination conceptuelle qui ne nous dit quelque chose d'une intuition empirique qu'à travers un schéma de l'imagination transcendantale, faculté de synthèse. On voit là que la conception

de Kant du concept se trouve entre deux mondes : de celui de « prédicat » comme dans toute la tradition, supposant que le concept dit quelque chose d'un sujet, et est donc directement prédicable des phénomènes. Mais en même temps, le concept prend toute son originalité dans la mesure où il est composant d'un jugement, qui peut être une loi scientifique. Kant modifiera les conditions du philosophe en particulier en montrant par la construction même de sa philosophie que le concept n'a de sens que dans le cadre d'une théorie du jugement seule capable d'élaborer les conditions de comparabilité et d'homogénéisation des facultés – plus tard les philosophes parleront de proposition plutôt que de jugement. Dans un célèbre article, Wilfrid Sellars montre que les concepts impliquent toujours des lois, sans lesquelles ils seraient vides et indistinguables.

C'est là une différence fondamentale : que le prédicat soit dans le sujet (« praedicatum inest subiecto » – selon le principe majeur de Leibniz) ou dans le jugement fait la différence entre une « phénoménologie » où les prédicats nous disent quelque chose des sujets, et une conception plus « inférentielle » du concept qui n'est plus nécessairement lié au concept défini comme genre et différence spécifique. La philosophie des sciences de Hegel – qui, on le sait, donne une telle importance au concept – peut être comprise comme une façon de surmonter cette contradiction du phénoménologique et de l'inférentiel dans le mouvement du concept. À une conception « généalogique » du concept (pour reprendre un terme de Darwin qu'il applique aux classifications) sera substituée progressivement une conception plus large du concept liée non seulement aux prédicats classiques à une place, mais aussi à deux, trois places, etc., c'est-à-dire aussi aux relations binaires, ternaires, etc., mais aussi aux mondes possibles compris comme exemplifiant les concepts tels qu'ils sont ce qui, dans la loi, peut être exemplifié. Cela a supposé tout un traitement formel du concept comme fonction (Frege), ainsi qu'une théorie de la quantification (chez Frege principalement, mais aussi avec la « logique des relatifs » de Peirce, moins connue). Dans l'expression $F(x)$, « F » représente le concept essentiellement insaturé, et « x » l'argument ou l'occurrence. C'est l'origine des fonctions propositionnelles : le concept y apparaît à la fois comme fonctionnel et insaturé. À partir de là, le problème sera de comprendre le rapport du concept à l'empirique à travers la proposition. C'est ce que tentera la philosophie analytique, dans sa volonté de prendre acte de l'invention scientifique de la nouvelle logique. Le problème du concept prendra alors deux directions : ou bien les philosophes tenteront une théorie du concept s'efforçant de comprendre comment il se rapporte au donné, c'est le cas de Russell, – en particulier avec sa théorie des descriptions (1905) – ou alors, critique d'une idée du donné, ils tenteront de comprendre la relation systématique des concepts entre eux, dans le fameux problème de la cohérence, et tendront vers une interprétation nominaliste des concepts.

Dans l'épistémologie contemporaine, la question des concepts est souvent traitée en fonction d'une théorie de la définition. Une telle approche du concept permet de déterminer le rapport du concept à l'empirique, car une définition montre comment éliminer un terme. L'une des questions qui a paru fondamentale dans les sciences modernes – et qui met en rapport les concepts de concept et de loi – est que certains concepts ne semblent pouvoir être formés que par des définitions dispositionnelles, qui ont la forme d'une conditionnelle – cela a été remarqué en particulier par Hempel, dans son article « Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science » (1952). Tel est le cas des concepts de magnétisme ou de température – ce qui rend impossible leur mise en relation immédiate à des données d'observation : le statut du concept semble alors spécifique, et être en relation avec les problèmes de déductibilité plus que d'observabilité. L'empirisme logique a alors cherché des modalités de réduction des concepts par un élargissement des définitions (Hempel, Nagel). Le problème du rapport du concept au donné ou du critère de cohérence ne se pose plus alors comme une alternative simple. Russell abandonnera lui-même la notion de « sensedata » lorsqu'il adoptera la doctrine du « monisme neutre », la notion de « donné » pourra même apparaître comme un mythe (Wilfrid Sellars, 1963). L'idée que les intuitions et les concepts forment des représentations de type différent finira par être critiquée dans la tradition analytique elle-même (voir Rorty, 1979) : dès les années 1950, des travaux de Quine, d'Austin, et surtout les *Investigations philosophiques* de Wittgenstein reformulent autrement la question du concept en le mettant en rapport au langage plus qu'au donné. C'est le « tournant linguistique ». Les théories de la connaissance au sens strict ne sont plus le seul lieu où se développent les théories des concepts.

Dès ce moment, ce qui a été mis en évidence concernant les concepts a été, plus que leur « clôture » en fonction d'une définition, leur caractère en réseaux : « puzzles » chez Wittgenstein, « chicanes » chez Derrida, ou « points d'accumulation » chez Deleuze. L'importance de la « proposition » ou de l'« énoncé » pour l'évaluation du concept s'estompe, pour laisser apparaître d'autres notions, comme celles de jeux de langage, de différence ou de plan d'immanence, ou encore de « personnage conceptuel », tels Socrate ou Zarathoustra. Dans ces tendances, la réflexion sur la philosophie, ses gestes, ses décisions a pris une telle importance que le concept plus que l'idée est le support de ce qu'il y a de spécifiquement théorique et technique dans la philosophie.

Actuellement le terme de concept est utilisé très couramment pour désigner le produit d'une conception (*design*) au sens que lui donne l'ingénierie, comme articulation de modèles de nature et de type différents en vue d'une production finalisée, intégrée et concrétisée : apparaît alors une vision nouvelle de l'aspect généalogique du concept, comme n'appartenant plus tant au « système naturel » qu'à celui de l'artificiel. Le

concept est alors ce qu'aura conçu l'ingénieur, plus encore que le scientifique. En ce sens, le concept est ce qui ouvre la philosophie non pas seulement au domaine de la science, mais aussi à celui de la technique et de la technologie.

- BACHELARD G., *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 1928 ; *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934 ; *Le Rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949 ; *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951 ; *Le Matérialisme rationnel*, Paris, PUF, 1953. — BLACK M., *Models and Metaphor. Studies in language and philosophy*, Ithaca, Cornell Univ. Press, 1962. — CANGUILHEM G., *La Formation du concept de réflexe aux XVIII^e et XVIII^e siècles*, Paris, PUF, 1955 ; *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1975. — CAVAILLES J., *Philosophie mathématique*, Paris, Hermann, 1962 ; *Méthode axiomatique et Formalisme : essai sur le problème du fondement des mathématiques*, Paris, Hermann, 1981 ; *Sur la logique et la théorie de la science*, Paris, PUF, 2^e éd., 1960 ; *Œuvres complètes de philosophie des sciences*, Paris, Hermann, 1994. — DELEUZE G. & GUATTARI F., *Qu'est-ce que la philosophie ?*, Paris, Minuit, 1991. — DERRIDA J., *De la grammatologie*, Paris, Minuit, 1967. — DESANTI J.-T., *Les Idéologies mathématiques. Recherches épistémologiques sur le développement de la théorie des fonctions de variables réelles*, Paris, Le Seuil, 1968. — DUHEM P., *La Théorie physique : son objet et sa structure*, Paris, Chevalier & Rivière, 1906, rééd., Paris, Vrin, 1981. — EINSTEIN A. & INFELD L., *L'Évolution des idées en physique. Des premiers concepts aux théories de la relativité et des quanta* (1938), trad. M. Solovine, Paris, Payot, 1974, rééd., 1990. — FREGE G., *Begriffsschrift und Andere Aufsätze* (1879), Hildesheim, G. Olms, 1988 ; *Les Fondements de l'arithmétique* (1884), trad. C. Imbert, Paris, Le Seuil, 1970 ; *Écrits logiques et philosophiques* (1891-1892), trad. C. Imbert, Paris, Le Seuil, 1971. — HEMPEL C.G., *Éléments d'épistémologie* (1966), trad. B. Saint-Sernin, Paris, Armand Colin, 1972 ; *Aspects of scientific Explanation and other Essays in the Philosophy of Science*, Londres, The Free Press, 1965. — IMBERT C.I., *Phénoménologies et langages formulaires*, Paris, PUF, 1992. — JACOB P. éd., *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique*, Paris, Gallimard, 1980 ; « Épistémologie », *L'âge de la science*, n° 2, Paris, Odile Jacob, 1989. — KANT E., *Œuvres philosophiques*, éd. publ. sous la dir. de F. Alquié, 3 vol., Paris, Gallimard « Pléiade », 1980, 1985 et 1986. — KOYRÉ A., *Études d'histoire de la pensée philosophique*, Paris, Armand Colin, 1961 (rééd., Paris, Gallimard, 1971) ; *Du monde clos à l'univers infini*, Paris, PUF, 1962 (rééd., Paris, Gallimard, 1973) ; *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1966 ; *Études newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1966 ; *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, PUF, 1966 (rééd., Paris, Gallimard, 1973). — LAUTMAN A., *Essai sur l'unité des mathématiques*, Paris, UGE, 1977. — NAGEL E., *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Londres, Routledge & Kegan, 1961. — PEACOCKE C., *Thoughts : An Essay on Content*, Oxford, Basil Blackwell, 1936. — PERUZZI A., *Definizioni. La cartografia dei concetti*, Milan, Franco Angeli, 1983. — PRINZ J. J., *Furnishing the mind : concepts and their perceptual basis*, Cambridge, Mass. : MIT Press, 2002. — RORTY R., *L'Homme spéculaire*, trad. T. Marchaisse, Paris, Le Seuil, 1990. — RUSSELL B., *Écrits de logique philosophique* (1903-1913), trad. J.-M. Roy, Paris, PUF, 1989. — On denoting (1905), *Principia Mathematica* (1910-1913), *The Philosophy of logical atomism*, selon le recueil de R.C. Marsh, Londres, Allen & Unwin, 1956. — SCHWARTZ R.L., *Der Begriffstrag zur begriffsgeschichte*, Munich, Minerva Publikation, 1983. — SELLARS W., « Concepts as involving laws and

inconceivable without them », *Philosophy of Science*, vol. 15, 1948, p. 287-315 ; *Empirisme et Philosophie de l'esprit* (1963), trad. F. Cayla, Paris, L'Éclat, 1992. — SOULEZ A. éd., *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, Paris, PUF, 1985. — STENGERS I. éd., *D'une science à l'autre : des concepts nomades*, Paris, Le Seuil, 1987 ; *Les Concepts scientifiques : invention et pouvoir*, Paris, La Découverte/Unesco, 1989. — WEITZ M., *Theories of Concepts. A History of the Major Philosophical Tradition*, Londres/New York, Routledge, 1988. — WITTGENSTEIN L., *Tractatus Logico-Philosophicus* (1921), suivi de *Investigations Philosophiques* (1953), trad. P. Klossowski, Paris, Gallimard, 1961 ; *Remarques sur les fondements des mathématiques* (1937-1944), texte suivi d'une Note des Éditeurs (G.E.M. Anscombe, R. Rhees & G.H. von Wright), trad. M.-A. Lescouret, Paris, Gallimard, 1983.

Anne-Françoise SCHMID

→ Criticisme ; Dialectique ; Kant ; Objectivité ; Opérationnalisme ; Phénoménisme ; Physicalisme ; Rationalité ; Russell ; Wittgenstein ; Wittgenstein et le positivisme logique.

CONDORCET, 1734-1794

Le marquis de Condorcet, célèbre encyclopédiste et parlementaire de la Révolution, meurt en prison à Bourg-la-Reine, après sa chute politique. Le politique, spécialisé dans les questions scientifiques et dans l'enseignement des sciences, fut aussi secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences. Le personnage scientifique est difficile à cerner. Privilégiant les généralités sur l'étude précise, multipliant les erreurs techniques, mais aussi capable de points de vue intéressants et d'intuitions remarquables, les appréciations de ses travaux sont fluctuantes.

Son calcul intégral cherche à réduire les questions d'existence et de calcul à des problèmes d'algèbre. Bien que souvent limitée, sa méthode l'amène à s'interroger sur la possibilité *a priori* de savoir si une intégrale est exprimable en termes finis ou non, et à déduire certains principes généraux sur la réduction de certaines intégrales à des formes simples.

Sa philosophie des sciences repose en partie sur celle de d'Alembert et sur celle de Locke. L'application d'une science à une autre semble le moteur d'une évolution — toujours positive bien sûr — de nos connaissances. La « mathématique sociale » essaie d'appliquer les méthodes de l'analyse au système social, avec l'idée d'y transférer la certitude des mathématiques. Le calcul des probabilités est alors nécessaire pour évaluer le degré de certitude des propositions expérimentales. C'est en particulier ce qu'il entreprend en appliquant le pouvoir d'analyse des mathématiques et les probabilités aux procédures de vote.

- RASHED R., *Condorcet. Mathématique et société*, Paris, Hermann, 1974. — Coll. : *Condorcet, mathématicien, économiste, philosophe, homme politique*, Actes du Colloque international, dir. P. Crépel & C. Gilain, Paris, Minerve, 1989.

Jean-Pierre SUTTO

→ Alembert ; Locke ; Progrès ; Vulgarisation.

CONJECTURE

MATHÉMATIQUES

Il est coutumier, en mathématiques, de baptiser « conjecture » un énoncé que l'on pense être vrai mais qui n'est pas démontré. Dans d'autres domaines des sciences, on parle plutôt d'hypothèse ; cependant le statut est différent : une hypothèse en physique, en biologie requiert des confirmations ou infirmations par l'expérience mais ne sera jamais démontrée formellement. Cette définition par la négative — est conjecture ce qui n'est pas démontré — est évidemment trop formelle, trop étroite pour appréhender la quête de l'intelligibilité sous-jacente à la conjecture mathématique. Il n'est pas question de définir ici la vérité et la démonstration, mais plutôt d'examiner les ressorts y menant. La vision des mathématiques comme un édifice reposant sur le socle des axiomes et procédant à la recherche de la vérité — des théorèmes — par déduction selon des règles formelles ne rend compte ni de leur développement historique ni de la réalité quotidienne du chercheur, pour qui la conjecture ou l'hypothèse est un pain quotidien, un ressort de l'imagination indispensable. Les conjectures apparaissent avant d'être prouvées et sont souvent « vérifiées » avant qu'un système axiomatique soit créé dans lequel une preuve peut être formalisée ; elles sont le fruit de tentatives de résoudre des problèmes par essai/erreur, par des expériences. Comme premier exemple, les énoncés de la Géométrie d'Euclide ont pour la plupart préexisté à leur insertion dans le système formel des *Éléments* qui restent encore aujourd'hui le modèle, le parangon de la littérature mathématique. L'histoire du célèbre « postulat » d'Euclide est à ce titre édifiante ; il peut se formuler ainsi : par un point du plan, il passe une droite et une seule parallèle à une droite donnée. Euclide avait formulé cet énoncé comme un axiome et il fut durant plus de vingt siècles considéré si intuitif que de nombreuses recherches tentèrent d'en fournir une démonstration. La découverte extraordinairement féconde de nouvelles géométries, dites non euclidiennes, contient et dépasse, en richesse, la preuve de l'impossibilité d'une telle démonstration. Descartes, dans ses *Règles pour la direction de l'esprit*, indique la nécessité d'une heuristique. Même si ses écrits contiennent une critique féroce des simples « conjectures » (entendues au sens de tentatives de deviner), ils soulignent le besoin d'une méthode pour trouver la vérité et constatent implicitement que la seule méthode analytique ne suffit pas.

Exemples

Comment naissent les conjectures aujourd'hui ? Que disent là-dessus les mathématiciens de ce siècle ? Les propos des mathématiciens sont évidemment plus pragmatiques sur ce sujet que ceux des philosophes. André Weil s'est exprimé de manière assez critique sur l'usage du mot conjecture : « Ceci me donne l'occasion de dire mon sentiment sur ce mot dont on a tant usé et

abusé. Sans cesse le mathématicien se dit : "Ce serait bien beau" (ou : "Ce serait bien commode") si telle ou telle chose était vraie. Parfois il le vérifie sans trop de peine ; d'autres fois il ne tarde pas à se détromper. Si son intuition a résisté quelque temps à ses efforts, il tend à parler de "conjecture", même si la chose a peu d'importance en soi. Le plus souvent c'est prématuré. En théorie des groupes, on a longtemps parlé d'une "conjecture de Burnside", qu'à vrai dire celui-ci, fort judicieusement, n'avait proposée que comme problème. Il n'y avait pas la moindre raison de croire que l'énoncé en question fût vrai. Finalement il était faux. Nous sommes moins avancés à l'égard de la "conjecture de Mordell". Il s'agit là d'une question qu'un arithméticien ne peut guère manquer de se poser ; on n'aperçoit d'ailleurs aucun motif sérieux de parier pour ou contre. Peut-être dira-t-on que l'existence d'une infinité de solutions rationnelles pour une équation $f(x,y) = 0$, en l'absence d'une raison algébrique qui la justifie, est infiniment peu probable. Mais ce n'est pas un argument... En ce qui concerne les questions posées à la fin de [Œuvres, 1967a], tant de résultats partiels sont venus depuis lors s'ajouter aux miens qu'à présent je n'hésiterais plus, je crois à parler de "conjectures", encore que le terme "d'hypothèse de travail" soit peut-être plus approprié. En tout cas, s'il m'appartenait de donner un conseil à qui n'en demande point, je recommanderais d'employer désormais le mot de "conjecture" avec un peu plus de circonspection que dans ces derniers temps. »

Cette distinction entre la « bonne » conjecture ou le problème profond et la question simplement non résolue est difficilement formalisable ; la première partie de cette citation rejoint d'ailleurs l'idée déjà évoquée de Descartes qui voyait une source d'erreurs dans la précipitation à juger sans avoir d'idées claires et distinctes ; mais la recherche de découvertes ne peut se contenter seulement d'éviter l'erreur et Weil a aussi glorifié l'imagination, l'inspiration mathématique : « Rien n'est plus fécond tous les mathématiciens le savent que ces obscures analogies, ces troubles reflets d'une théorie à une autre, ces furtives caresses, ces brouilleries inexplicables ; rien aussi ne donne plus de plaisir au chercheur. Un jour vient où l'illusion se dissipe, le pressentiment se change en certitude, les théories jumelles révèlent leurs sources communes avant de disparaître ; comme l'enseigne la *Gita* on atteint à la connaissance et à l'indifférence en même temps. La métaphysique est devenue mathématique, prête à former la matière d'un traité dont la beauté froide ne saurait plus nous émouvoir. »

Le mot métaphysique est plutôt ici synonyme de révélation. La nécessité et la fécondité de l'analogie, de la généralisation, de l'intuition est claire pour le mathématicien. La profondeur d'une conjecture n'est pas forcément visible immédiatement, les développements ultérieurs révèlent souvent de nouvelles généralisations et l'ampleur de la vision première. La « conjecture » sans doute la plus célèbre de toutes les mathématiques (parmi les problèmes non résolus) est

« l'hypothèse de Riemann » (1859) concernant la fonction « zêta » : « On trouve, en effet entre ces limites un nombre environ égal à celui-ci, de racines réelles et il est très probable que toutes les racines sont réelles. Il serait à désirer, sans doute, que l'on eût une démonstration rigoureuse de cette proposition ; néanmoins j'ai laissé cette recherche de côté pour le moment après quelques rapides essais infructueux car elle paraît superflue pour le but immédiat de mon étude. »

La tradition a baptisé « hypothèse » cet énoncé que l'on appellerait plutôt « conjecture » de nos jours. L'hypothèse de Riemann peut être testée en calculant les premières racines (cela a été fait pour plusieurs millions d'entre elles) mais ces vérifications ne font que renforcer aux yeux des mathématiciens la plausibilité de la conjecture, sans la démontrer. Un autre exemple permet d'illustrer le statut des conjectures. La meilleure façon connue d'empiler des billes dans un volume est celle du marchand d'oranges (par couches successives et décalées) et, comme le dit Rogers, « tous les physiciens savent et la plupart des mathématiciens croient [conjecturent] que » c'est la meilleure façon possible. Cette quête de la démonstration peut paraître stérile mais constitue bien sûr un pilier de la grammaire mathématique ; plus important peut-être, la preuve se révèle souvent plus riche encore que l'énoncé, en ce qu'elle suggère ou permet des liens insoupçonnés auparavant, des généralisations. Dans l'exemple précédent, il est probable qu'une démonstration fournirait aussi des idées ou même une démonstration sur la nature des meilleurs empilements possibles dans d'autres espaces. Cette notion de richesse, de fécondité de la démonstration par rapport à l'énoncé est par exemple le point de vue de Poincaré qui distingue d'ailleurs vérification et démonstration. La vérification n'apporte essentiellement rien de plus que l'énoncé, elle en est en quelque sorte une simple traduction. Divers mots ont été utilisés comme « rêve », « question », « programme », « problème », « hypothèse » qui, sans être rigoureusement synonymes de conjecture cherchent à décrire ces créations, ces intuitions précédant la découverte scientifique achevée. Grothendieck disait que ses recherches sur les « motifs » n'étaient sûrement qu'un rêve puisqu'elles ne démontraient rien ; ce travail déboucha néanmoins sur la formulation de ce que Grothendieck a baptisé de façon optimiste les « conjectures standards ». Le programme de Langlands n'a pas une formulation aussi précise et une bonne partie est décrite dans un article que l'auteur affuble de l'épithète « Ein Märchen ». Cantor pensait que l'énoncé suivant était vrai : tout ensemble infini de nombres réels a la puissance soit de l'ensemble des nombres réels, soit de l'ensemble des nombres entiers ; l'hypothèse du continu de Cantor a connu un destin singulier puisque les efforts pour la prouver ont abouti à la démonstration, par Gödel et Cohen, qu'elle était indécidable dans le système formel utilisé par les mathématiciens ; en particulier les efforts de Cantor étaient voués à l'échec. Le *jugentraum* de Kronecker s'est vu confirmé par les travaux de Weber.

Nature et rôle

Quels sont donc la nature et le sens des conjectures ? Que cherchent les mathématiciens ? Qu'est-ce qu'une « bonne » conjecture ? On peut déjà trouver une question similaire dans le *Ménon* de Platon : « MÉNON : Et comment t'y prendras-tu, Socrate, pour chercher une chose dont tu ne connais pas du tout ce qu'elle est ? Parmi les choses que tu ignores, laquelle te proposes-tu de chercher ? À supposer même que, par une chance extraordinaire, tu tombes sur elle, comment sauras-tu que c'est elle, puisque tu ne l'as jamais connue ? » La réponse n'est pas aisée, celle de Platon – formulant sa célèbre théorie des *idées*, de la réminiscence – est très adaptée aux mathématiques, mais nécessite une sorte d'acte de foi. Popper, qui a par ailleurs donné une sombre vision de Platon, décrit la formation d'une hypothèse comme un exercice actif et créateur ; il critique à cet effet le point de vue, qu'il juge réducteur, de Hume. Popper pense même que nous ne pouvons pas savoir mais seulement conjecturer, que toute découverte scientifique contient un élément irrationnel ou une intuition créatrice. Il s'appuie en cela sur des propos d'Einstein sur la recherche de lois universelles d'où une description du monde peut être déduite mais auxquelles aucun chemin déductif ne nous mènerait. Cette composante d'intuition créatrice n'exclut pas, bien au contraire, le fait que la « testabilité » constitue la marque de la scientificité, des énoncés, des théories. Ces remarques générales sur les sciences s'appliquent bien entendu aux mathématiques à la nuance près que l'on n'attend pas seulement une confirmation par des tests, expériences, mais une démonstration. Poincaré nie la possibilité d'expérimenter sans idée préconçue ; à l'impossibilité s'ajouterait d'ailleurs la stérilité. « Toute généralisation suppose dans une certaine mesure la croyance à l'unité et à la simplicité de la nature. » On notera que ce point de vue se rapproche d'un point de vue platonicien sans lui être réductible. Poincaré ajoute que toute généralisation est une hypothèse, ce qui rend limpide la nécessité de l'hypothèse ou de la conjecture. Ainsi, loin d'être l'indice d'un certain obscurantisme ou d'un aveu d'impuissance, les conjectures sont précisément des signes de fécondité ; la « bonne » conjecture apparaît non comme un pis-aller de la démonstration mais comme un élan vers la généralisation, un lieu d'expérimentation, un guide du sens, une recherche d'unité ou de perfection. Cette quête peut être très concrète comme, par exemple, la recherche de la meilleure inégalité possible ou plus abstraite comme la recherche du cadre le plus général possible. En ce sens la formulation de conjectures est une partie essentielle du processus de découverte scientifique. L'élaboration de systèmes formels, si elle constitue un apport scientifique indéniable, tend à occulter le sens des mathématiques. Ce sens est beaucoup plus difficile à décrire qu'un système formel et fait nécessairement appel à des notions subjectives, de même que l'appellation de « bonne » conjecture.

L'entrée dans le XX^e s. a été marquée, pour les mathématiques, par la conférence de Hilbert où celui-ci a présenté 23 problèmes ; il dit lui-même qu'il est souvent impossible de préjuger de la valeur d'un problème mais que c'est le profit qu'on tirera de la solution du problème qui permet de porter un jugement sur ce dernier. Terminons en citant un passage de son introduction aux problèmes futurs : « Tant qu'une branche de la Science jouit d'une abondance de problèmes, elle est pleine de vie ; le manque de problèmes dénote la mort ou la cessation du développement propre de cette branche et de même que dans toute entreprise humaine il faut poursuivre un but, de même dans la recherche mathématique il faut des problèmes. »

► HILBERT D., *Problèmes futurs des mathématiques*, in *Compte rendu du deuxième congrès international des mathématiques*, tenu à Paris du 6 au 12 août 1900, Paris, Gauthier-Villars, 1902. – POINCARÉ H., *La Science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1918. – POPPER K., *Logik der Forschung*, Vienne, 1934 (trad. fr. N. Thyssen-Rutten & P. Devaux, *La Logique de la découverte*, Paris, Payot, 1973). – RIEMANN B., *Sur le Nombre des nombres premiers inférieurs à une grandeur donnée*, Monatsberichte der Berliner Akademie, 1859 (trad. fr. L. Laugel, in *Œuvres de Riemann*, Gauthier-Villars, 1898). – WEIL A., *Œuvres scientifiques*, New York, Springer Verlag, 1979.

Marc HINDRY

→ Découverte ; Démonstration ; Induction ; Invention ; Méthode ; Probabilité [LOGIQUE] ; Réfutabilité ; Théorie ; Validation ; Vérification.

CONSTANTE DE HUBBLE

La conception que nous avons de l'univers s'est radicalement modifiée au cours du premier quart du XX^e siècle : elle est passée d'un ensemble statique d'étoiles à celui d'un ensemble de galaxies en expansion. Si le concept de systèmes stellaires analogues à notre Voie lactée et extérieurs à elle a précédé la confirmation de leur existence, l'idée que l'univers est statique était au contraire très fortement ancrée dans les esprits. Albert Einstein lui-même rejeta la solution naturelle de sa théorie de la Relativité générale appliquée à l'univers, obtenue en 1917, parce qu'elle conduisait à un univers non statique. Cela l'amena à introduire un paramètre supplémentaire, la constante cosmologique.

Dans un univers en expansion, les distances entre les galaxies augmentent au cours du temps sans pour autant que les galaxies soient en mouvement. Cette propriété peut être illustrée par le modèle d'une succession de boutons cousus sur une bande élastique ; la bande est un modèle, à une seule dimension, de l'univers ; les boutons représentent les galaxies. Quand on tire sur l'élastique, ce qui simule l'univers en expansion, les boutons-galaxies s'éloignent les uns des autres, tout en restant immobiles dans l'élastique-univers. Un observateur situé sur l'un quelconque des boutons verrait tous les autres s'éloigner de lui. Du fait

de cette expansion de l'univers lui-même, et bien que les galaxies soient, en première approximation, immobiles, leur spectre présente un décalage vers les grandes longueurs d'onde, dû à ce que la période d'une onde émise est perçue plus longue, la distance entre l'émetteur et l'observateur, et en conséquence la durée de parcours du signal lumineux, ayant augmenté pendant la durée de cette période ; par abus de langage, puisque la galaxie est en fait immobile, on parle d'une « vitesse cosmologique » V_{cos} de la galaxie, identifiée à la vitesse radiale déduite de l'utilisation formelle de la relation Doppler-Fizeau.

Il y eut plusieurs tentatives de confirmations expérimentales de l'expansion ; celles des Européens Carl Wilhelm Wirtz et Knut Lundmark n'emportèrent pas l'adhésion de la communauté ; c'est Edwin Hubble qui devait établir la loi qui porte son nom : le décalage spectral observé dans le spectre d'une galaxie, exprimé en termes de vitesse cosmologique, est proportionnel à la distance d de cette galaxie. La constante de proportionnalité, appelée constante de Hubble, fixe le taux d'expansion de l'univers. On a pris l'habitude, depuis Hubble, d'exprimer V_{cos} en km s^{-1} et d en Mpc ($1 \text{ Mpc} = 1 \text{ million de parsecs}$) et donc H_0 en $\text{km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Cependant, H_0 a la dimension de l'inverse d'un temps. On appelle « temps de Hubble » son inverse, $t_H = 1/H_0$. C'est l'âge qu'aurait l'univers si l'expansion s'était effectuée toujours au même rythme. Dans les modèles cosmologiques les plus simples, appelés « modèles de Friedman », cette expansion s'est ralentie au cours du temps, et l'âge de l'univers est donc nécessairement inférieur à t_H .

On considère souvent le modèle de Friedman particulier, appelé « modèle standard » dont la densité a la valeur critique, celle qui sépare un modèle d'univers en perpétuelle expansion d'un modèle d'univers destiné à se contracter à partir d'un certain temps ; dans ce modèle particulier, l'âge t_0 de l'univers est égal aux deux tiers du temps de Hubble.

Les plus vieux objets connus sont des amas globulaires d'étoiles, dont l'âge est évalué à partir des modèles de structure interne : on le fixe actuellement à (14 ± 2) milliards d'années.

La détermination de la constante de Hubble : méthode et difficultés

Les déterminations de H_0 obtenues au cours des dernières années se situent dans la fourchette 50-100, à laquelle correspondent respectivement un temps de Hubble de 20 à 10 milliards d'années et un âge de l'univers dans le modèle standard de 13,5 à 6,7. On comprend donc l'ampleur du problème posé, puisque, à l'intérieur de cette fourchette, les valeurs élevées sont incompatibles avec l'âge des plus vieilles étoiles.

La détermination de H_0 est simple dans son principe : il suffirait de mesurer d'une part la vitesse cosmologique et d'autre part la distance d'une galaxie pour en déduire H_0 , qui est le rapport de ces deux quantités. Cette détermination nécessite donc des mesures

de vitesses radiales et des mesures de distances. Les mesures de vitesses radiales reposent sur l'effet Doppler-Fizeau que ces dernières provoquent dans le spectre de raies des galaxies ; les mesures de distances sur des critères qui permettent de deviner la luminosité L , puissance totale rayonnée par une étoile de la galaxie (ou la galaxie elle-même), que l'on compare à la valeur apparente de cette luminosité, qui est l'éclat apparent E . Si la lumière ne subit aucune interaction sur son parcours (mais cette hypothèse est loin d'être vérifiée, et l'extinction subie par le rayonnement sur son parcours doit faire l'objet de délicates corrections), on déduit la distance de la comparaison de E et L .

Les mesures de distances reposent donc sur des étalons dont la luminosité est connue, et qui sont identifiables par des propriétés accessibles à l'observation ; on les appelle parfois des « chandelles standard ». Tout se passe comme si l'on mesurait l'éclat apparent E d'une ampoule électrique en lisant à distance l'indication « $L = 100 \text{ W}$ » portée sur elle.

La calibration de la luminosité d'une « chandelle » repose sur son observation dans notre propre Galaxie, et sur des distances stellaires, qui ne sont connues avec précision qu'assez près de nous. D'un autre côté, il est intéressant que ces chandelles soient intrinsèquement très lumineuses, car on pourra les observer dans une galaxie extérieure, à de grandes distances. Malheureusement, les étoiles lumineuses sont très rares : ce sont des étoiles à relativement très courte durée de vie, il y en a donc peu « en vie » à chaque instant. Elles sont donc, statistiquement, absentes d'un volume d'espace trop petit, et donc en particulier du voisinage immédiat de notre système solaire : nous ne disposons donc pas d'une très bonne calibration de leur luminosité, parce que nous ne connaissons pas suffisamment bien leur distance. La situation est en train de changer, grâce aux observations du satellite HIPPARCOS.

La détermination de la vitesse cosmologique se fait à partir du spectre de la galaxie, dont le décalage des raies par rapport au spectre de référence fournit la composante de vitesse radiale globale. Si la galaxie est animée par rapport à l'observateur d'une vitesse particulière, qui peut résulter d'un mouvement aléatoire et/ou d'un mouvement d'ensemble, on mesure la somme de la vitesse cosmologique et de la composante radiale des vitesses particulières. Dans le « modèle » de l'élastique on peut imaginer les boutons cousus avec un grand pied qui leur permet de se déplacer légèrement par rapport à leur point de fixation. Faute de connaître ces mouvements particuliers, on s'adresse à des galaxies suffisamment éloignées pour que la composante particulière de leur vitesse soit négligeable devant la composante cosmologique.

Voilà donc une première difficulté du problème : pour éliminer les mouvements particuliers, c'est-à-dire pour qu'il soit licite d'assimiler la vitesse radiale observée à la composante cosmologique, on doit s'adresser à des galaxies suffisamment éloignées. En revanche, on ne mesure avec précision que les distances de galaxies assez proches, de telle sorte qu'on

puisse y observer les étoiles chandelles individuellement et mesurer leur éclat apparent avec précision.

Beaucoup de travaux se sont développés dans ce domaine au cours des vingt dernières années ; il est irritant que leurs conclusions nous aient laissés toujours dans la même incertitude : H_0 dans la fourchette 50-100. Est-ce à dire que nos connaissances n'ont pas progressé, alors que nos moyens d'observation (télescopes et systèmes récepteurs) l'ont fait, d'une façon spectaculaire ?

En réalité, c'est notre connaissance des mouvements particuliers des galaxies qui s'est profondément modifiée : alors qu'on ne connaissait aux galaxies, dans les années 1970, que des mouvements aléatoires, d'intensité au plus égale à 50 km s^{-1} , on a mis en évidence des mouvements particuliers d'ensemble, c'est-à-dire que des galaxies, localisées dans la même région du ciel, sont animées de vitesses similaires, dirigées dans la même direction, pouvant atteindre 700 à 800 km par seconde. Cette découverte est fondamentale pour la cosmologie, puisqu'elle révèle la présence de grandes concentrations de masses, responsables de ces mouvements. Mais elle complique aussi beaucoup le problème de la détermination de H_0 : on doit s'adresser à des galaxies beaucoup plus éloignées que ce qu'on croyait, pour qu'il soit licite d'assimiler la vitesse radiale mesurée à la vitesse cosmologique, V_{cos} , ce qui suppose que la composante radiale de la vitesse particulière soit négligeable devant V_{cos} . Ainsi, à mesure que les progrès techniques permettaient d'étendre, par un facteur de l'ordre de 10, la profondeur des mesures de distances, la découverte de l'importance des mouvements particuliers repoussait d'un facteur similaire la valeur de la distance à partir de laquelle la mesure de H_0 est possible : au total, on n'a rien gagné !

Perspectives d'avenir

Cette situation est en train de changer, grâce en particulier aux observations spatiales des télescopes Hubble et HIPPARCOS. Le premier permet d'observer des étoiles jouant le rôle de chandelles standard dans des galaxies relativement éloignées ; le second est en passe de calibrer avec précision la luminosité de ces chandelles standard, grâce à la détermination de la distance de celles que l'on observe dans notre Galaxie.

Récemment, le télescope spatial Hubble a permis d'observer des étoiles variables céphéides dans une galaxie de l'amas de galaxies de la Vierge, qui est l'amas le plus proche de nous. Les céphéides sont des étoiles dans les régions externes desquelles s'instaure un régime de pulsations périodiques : au cours de la phase de contraction, la température des régions superficielles s'élève, ce qui conduit à un accroissement de la luminosité ; puis lui succède une phase d'expansion, pendant laquelle la température et donc la luminosité décroissent. Les modèles théoriques de structure interne des céphéides expliquent que la période P des pulsations est reliée à la luminosité moyenne de l'étoile : plus l'étoile est lumineuse, plus sa période est

élevée. Une fois la relation calibrée, il suffit de mesurer la période de variation et l'éclat apparent moyen d'une céphéide pour en déduire sa distance.

Les premiers résultats obtenus à ce jour ne donnent pas encore la possibilité de conclure ; ils permettent en revanche de souligner la complexité du problème. En effet, le télescope spatial a observé un grand nombre de céphéides dans cette galaxie, M 100. Les incertitudes sur chacune des observations individuelles donnant lieu aux courbes de lumière observées sont très faibles ; celle sur le résultat final qui donne une distance de $17,1 \pm 1,8 \text{ Mpc}$ est dominée pour l'essentiel par les corrections d'extinction. On notera la grande prudence des auteurs qui affectent leur résultat d'une grande barre d'erreurs. Ce résultat a fait l'objet d'une campagne d'annonce dans la grande presse : l'univers n'aurait que 8 milliards d'années, ce qui le rendrait « plus jeune que ce qu'il contient »... Il est intéressant de discuter comment on a pu passer de la mesure effectuée, à savoir la distance d'une galaxie de l'amas de la Vierge, à cet âge de l'univers. La première étape consiste à considérer que la distance de la galaxie observée s'identifie à celle de l'amas, ce qui est loin d'être certain ; la seconde repose sur la détermination de la vitesse cosmologique de l'amas : la même valeur, largement admise par tous, de la valeur observée du décalage spectral moyen de l'amas se traduit en une vitesse égale à $1\,000 \pm 30 \text{ km s}^{-1}$. Mais cette vitesse observée n'est pas la vitesse cosmologique, parce que notre Galaxie, et plus précisément le groupe de galaxies auquel elle appartient, qu'on appelle Groupe local par rapport auquel ces observations sont effectuées, est animé d'une vitesse particulière, due à l'attraction que l'amas de galaxies de la Vierge exerce sur lui ; la composante radiale de cette vitesse est mal connue, évaluée entre 100 et 400 km s^{-1} , ce qui conduit à V_{cos} entre 1 100 et 1 400 km s^{-1} . En choisissant une vitesse de 1 400 les auteurs ont obtenu $H_0 = 82 \pm 17$. Dans le modèle cosmologique standard, implicitement choisi, il en résulte l'âge de l'univers annoncé de 8 milliards d'années.

Les présentations du résultat ont concentré l'effet d'annonce sur H_0 , sans mentionner comment la vitesse cosmologique a été déterminée, puis sur l'âge de l'univers, déterminé dans un modèle particulier. En choisissant une vitesse cosmologique égale à 1 100 au lieu de 1 400, la valeur $H_0 = 82 \pm 17$ devient 65 ± 13 et $t_H = 15$ milliards d'années : il devient alors difficile de conclure que l'univers est « trop jeune », même dans le modèle standard, où $t_0 = 11$ milliards d'années.

En outre, les premiers résultats obtenus à partir des observations de HIPPARCOS apportent de nouvelles informations. D'une part, il semble que la luminosité intrinsèque des céphéides ait été sous-estimée, d'environ 10 %, ce qui conduit à augmenter de 10 % les distances des galaxies et donc à diminuer la constante de Hubble de 10 % ; en outre, la méthode de datation des plus vieilles étoiles semble remise en question. La détermination de la valeur de la constante de Hubble est un problème difficile, par la complexité

des phénomènes sous-tendus ; il est probablement en passe d'être rapidement résolu, en particulier par des observations effectuées au-delà de l'amas de galaxies de la Vierge. Sans pouvoir encore trancher de façon définitive, on ne peut pas conclure à une incompatibilité entre l'âge des plus vieux objets connus et le temps de Hubble.

● *The Realm of the Nebulae*, New York, Dover, 1958.

► HOYLE F., *Astronomy and Cosmology. A Modern Course*, San Francisco, W.H. Freeman, 1975. — PECKER J.C. éd., *Astronomie*, Paris, Flammarion, 1985. — SCHATZMAN E., *L'expansion de l'univers*, Paris, Hachette, 1989. — SCHNEIDER J. éd., *Aux confins de l'univers*, Paris, Fayard, 1987. — WEINBERG S., *Les 3 premières minutes de l'univers*, Paris, Le Seuil, 1979.

Lucienne GOUGUENHEIM

→ Big bang ; Expansion de l'univers ; Principe anthropique ; Univers.

CONSTANTES PHYSIQUES

Les quatre constantes universelles que nous discuterons dans cet article sont la constante de Newton G , la vitesse de la lumière dans le vide c , la constante de Boltzmann k et la constante de Planck h . La prise en compte de ces quatre constantes structure le cadre général de la physique, elle scande la démarche historique d'unification de la physique. Nous montrerons qu'elles traduisent des limitations de principe, mais que ces limitations ne forment pas un mur infranchissable ; elles déterminent plutôt des horizons que la théorie va s'efforcer de solidariser et de faire bouger.

L'horizon de la mécanique

La mathématisation de la physique, telle qu'elle a été initiée par Galilée, Descartes et Newton, fait intervenir des grandeurs physiques mesurables censées décrire des propriétés observables de la nature. Parmi les diverses grandeurs physiques possibles certaines sont considérées comme plus fondamentales que les autres. Ainsi les grandeurs physiques de la mécanique, la longueur L , le temps T et la masse M , sont considérées comme les trois grandeurs fondamentales et irréductibles de toute la physique. Les grandeurs physiques qui s'expriment à partir des grandeurs fondamentales sont dites dérivées. Elles sont caractérisées par leur contenu dimensionnel qui exprime les proportions dans lesquelles les quantités fondamentales interviennent dans leur définition.

Le principe d'inertie (première loi de Newton) stipule qu'en l'absence de force, loin de toute influence extérieure, un objet matériel se déplace en mouvement rectiligne uniforme par rapport à ce que l'on appelle un référentiel d'inertie. Les lois de la mécanique s'énoncent de la même façon dans des référentiels d'inertie en mouvement relatif rectiligne uniforme. La seconde loi de Newton relie force et accélération : une force

constante appliquée sur un objet lui transmet une accélération parallèle à la force, qui lui est proportionnelle et inversement proportionnelle à la masse. La troisième loi de Newton est celle de l'égalité de l'action et de la réaction. C'est la quatrième loi, celle de l'attraction (ou gravitation) universelle, qui fait intervenir la constante G . Appliquée par exemple au système solaire, elle stipule que le soleil exerce sur une planète une force attractive alignée sur la droite qui relie les centres des deux astres, proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance de leurs centres. La constante de Newton est le coefficient de proportionnalité qui équilibre les contenus dimensionnels des deux membres de l'équation qui exprime cette loi. Ce n'est que plus loin, lorsque nous l'associerons à d'autres constantes universelles que nous apparaîtra la signification fondamentale de la constante de Newton.

Sous l'action des continuateurs de Newton, comme Euler, Lagrange, Hamilton et Jacobi, et grâce à une mathématisation de plus en plus poussée, la mécanique rationnelle (ou analytique), que nous qualifierons à partir de maintenant de classique, s'est considérablement développée, à tel point qu'à la fin du XIX^e s. le programme « mécaniciste » de ramener toute la physique à la mécanique pouvait sembler réaliste. Tout le reste du présent article sera consacré à montrer comment il a été possible de surmonter les difficultés rencontrées dans l'accomplissement du programme mécaniciste, par la prise en compte de nouvelles constantes universelles.

De la découverte des rayons X en 1895 par Röntgen, de la radioactivité en 1896 par Becquerel et en 1898 par Pierre et Marie Curie, de l'électron en 1897 par Thomson, jusqu'à 1930, la physique a traversé une phase de profonds bouleversements conceptuels d'où a émergé le cadre général de la science contemporaine. Cette phase a été marquée par l'élargissement de la mécanique rationnelle dans deux domaines, celui d'abord de l'intégration à la mécanique de l'hypothèse atomique et celui de l'extension de la mécanique à la description des phénomènes ondulatoires.

La mécanique statistique

À partir de l'hypothèse atomique, et au prix du renoncement à la prédictibilité déterministe au profit d'une prédictibilité probabiliste, Boltzmann était parvenu, à la fin du XIX^e s., grâce à la thermodynamique statistique, à ramener à la mécanique l'ensemble des phénomènes thermiques. Dans cette théorie, les lois de la mécanique rationnelle s'appliquent aux atomes ou molécules, les constituants infinitésimaux et en nombres immenses du moindre morceau de matière ordinaire. À l'échelle macroscopique, les grandeurs physiques qui décrivent l'état de la matière sont définies à partir de moyennes statistiques effectuées sur les configurations microscopiques. Alors que ces configurations microscopiques sont en nombres immenses, un tout petit nombre de grandeurs

physiques suffisent à caractériser les états de la matière macroscopique. Certaines grandeurs macroscopiques comme l'énergie ou la pression sont directement reliées à la mécanique classique ; mais d'autres comme la température ou l'entropie relèvent d'un élargissement de la mécanique à ce que l'on appelle la mécanique statistique, et rendent compte de phénomènes qui se situent au-delà de l'horizon de la mécanique classique. Ainsi le concept d'entropie permet-il de rendre compte du fait qu'un très grand nombre de configurations microscopiques différentes (ce que l'on appelle des complexions) peuvent conduire à la même énergie macroscopique. L'entropie est proportionnelle au logarithme du nombre de complexions, et la constante de Boltzmann est le coefficient de proportionnalité. Livré à lui-même, en l'absence d'échange d'énergie avec l'extérieur, un système va évoluer, à énergie constante (premier principe de la thermodynamique), vers son état le plus probable, celui maximisant le nombre de complexions ; son entropie, fonction croissante du nombre de complexions, ne peut que croître ou au moins rester constante (second principe de la thermodynamique).

La mécanique relativiste

Le second grand bouleversement de la mécanique est celui de la théorie de la relativité d'Einstein. Avec les travaux de Faraday, Maxwell et Hertz, on avait réussi, à la fin du XIX^e s., à unifier l'électricité, le magnétisme et l'optique au sein de l'électromagnétisme, et l'on pensait pouvoir intégrer cette théorie en formation au cadre général du mécanicisme. On a d'abord imaginé, pour justifier un modèle mécanique de la propagation des ondes lumineuses ou électromagnétiques, un milieu qui serait le support matériel de ces ondes, ce que l'on a appelé l'éther. Mais ce modèle s'est trouvé contredit par plusieurs observations liées au caractère constant ou invariant de la vitesse de propagation de la lumière : ainsi les expériences d'interférométrie de Michelson et Morley étaient censées mettre en évidence le mouvement relatif de la Terre par rapport à l'éther. Elles ont échoué, non pas à cause d'une insuffisance du dispositif expérimental (qui était d'ailleurs d'une extrême élégance), mais parce qu'il apparaissait que c'est la lumière elle-même qui se propage, en toutes circonstances à la même vitesse, et qu'elle n'a que faire de l'éther. Le concept de champ, élaboré par Faraday et affiné par Lorentz, a permis de se débarrasser de cet indésirable éther : le champ électromagnétique est une structure dynamique infinie correspondant à la donnée, en chaque point de l'espace et à tout instant, des forces électrique et magnétique qu'y éprouverait une particule test ponctuelle. Le programme de l'intégration de l'électromagnétisme à la mécanique serait accompli s'il était possible d'assimiler la théorie électromagnétique aux équations du mouvement du champ électromagnétique. Mais cette intégration se heurte à l'obstacle de la constance de la vitesse de la lumière : la relativité galiléenne, à la

racine de la mécanique rationnelle classique, implique la loi de composition des vitesses qui interdit à toute vitesse d'être invariante. D'ailleurs, il apparaît que les équations de Maxwell n'obéissent pas aux propriétés de symétrie impliquées par la relativité galiléenne, mais qu'elles sont invariantes par les transformations du groupe de Lorentz.

Einstein se saisit du concept de champ et en fait le concept le plus fondamental de la physique. Pour pouvoir intégrer à la mécanique rationnelle la théorie de l'électromagnétisme, qu'il considère comme l'archétype d'une théorie de champ, ce qu'il remet en cause ce n'est pas l'électromagnétisme mais la mécanique rationnelle elle-même. Il accepte comme une donnée objective l'invariance de la vitesse de la lumière c qu'il interprète maintenant comme la constante universelle, borne supérieure de toute vitesse de propagation, traduisant l'impossibilité d'interaction instantanée à distance. Pour Einstein, la mécanique rationnelle classique n'est plus alors qu'une approximation, valable pour les objets matériels en mouvement à vitesse faible devant c , mais, pour la lumière ou pour le mouvement de particules microscopiques de vitesse proche de c , il lui faut élaborer une mécanique relativiste, qui englobe et dépasse la mécanique classique. Cette refonte de la mécanique concerne la cinématique, c'est-à-dire la conception de l'espace et du temps en tant qu'arène des phénomènes mécaniques, et la dynamique, c'est-à-dire la description des attributs du mouvement des objets matériels. Le qualificatif de relativiste attribué à cette nouvelle mécanique se justifie par le fait que de nombreuses notions qui étaient considérées comme absolues en mécanique classique deviennent maintenant relatives. Il en est ainsi de la notion de simultanéité : tant que la distance séparant deux événements est suffisamment petite pour que l'on puisse négliger le temps mis par la lumière à la parcourir, on peut penser que leur simultanéité est une notion indépendante des systèmes de coordonnées permettant de repérer les événements dans l'espace et le temps. Or, fait valoir Einstein, si l'on tient compte du temps de propagation de la lumière, on s'aperçoit qu'il est impossible de décider de manière absolue de la simultanéité de deux événements spatialement séparés. En cinématique relativiste, donc, ni la simultanéité, ni le temps, ni la métrique spatiale ne sont absolus. Ils sont relatifs au système de coordonnées servant à repérer les événements dans l'espace-temps, un continuum à trois dimensions d'espace et une dimension de temps. Le principe d'inertie de la mécanique classique est conservé, mais il s'applique maintenant à des changements de référentiels en mouvement rectiligne uniforme dans l'espace-temps. L'invariance associée à cette nouvelle relativité est l'invariance par les transformations du groupe de Lorentz, précisément celle des équations de Maxwell. La mécanique relativiste s'étend aussi à la dynamique du point matériel. D'après la plus fameuse des équations d'Einstein, même au repos, une particule de masse m renferme une énergie (potentielle) égale à mc^2 . Une particule peut être de

masse nulle ; dans ce cas, elle se propage à la vitesse de la lumière dans tout référentiel. Le photon, la particule que la théorie quantique associe à la lumière, est une particule de masse nulle.

La relativité générale

La théorie de la relativité a été qualifiée de « res-treinte » par Einstein lui-même parce que la relativité ne concernait que les changements de référentiels d'inertie : en relativité restreinte, les lois du mouvement s'expriment de la même façon dans deux référentiels d'inertie, en mouvement relatif rectiligne uniforme. Il a fallu dix années à Einstein pour étendre ce principe de relativité à l'indépendance complète des lois du mouvement par rapport à tout choix de référentiel, ce qu'il appelle la relativité générale. La première étape de cette généralisation consiste à étudier la façon dont changent les lois du mouvement lorsque le référentiel est uniformément accéléré. Puisque c'est le référentiel qui est accéléré, tous les objets matériels ont, par rapport au référentiel, la même accélération quelle que soit leur masse. Mais cette indépendance de l'accélération dans la masse des objets est la propriété caractéristique de la gravitation, inscrite dans la seconde et la quatrième loi de Newton et dans l'universalité de G , qu'Einstein érige en principe d'équivalence. À partir de ce principe, un changement quelconque de référentiel peut être remplacé par un champ gravitationnel adéquat, et réciproquement, un champ gravitationnel quelconque peut être remplacé par un changement adéquat de référentiel. On ne peut pas généraliser la théorie de la relativité sans s'attaquer en même temps à une théorie nouvelle, géométrique de la gravitation. En relativité générale, les lois du mouvement s'expriment de la même façon dans tout référentiel : les équations sont invariantes sous un changement général et local des coordonnées spatio-temporelles. La nouvelle théorie de la gravitation rend compte de la façon dont la matière influe localement sur la métrique de l'espace-temps, c'est-à-dire ce qui permet de mesurer les longueurs et les durées. La relativité générale reste fidèle à l'ambition mécaniciste, puisque la mécanique relativiste généralisée s'applique aussi à la gravitation, mais maintenant les trois grandeurs fondamentales, la masse, la longueur et la durée, sont soumises à deux contraintes liées aux deux constantes universelles G et c . Le fait que la matière influe sur la métrique de l'espace-temps implique qu'en relativité générale il n'est plus possible de séparer la cinématique de la dynamique ; telle est la limitation traduite par la constante universelle G .

La mécanique quantique

Indépendamment de la théorie de la relativité et presque simultanément une autre grande avancée est intervenue lorsque Planck a tenté de réconcilier la thermodynamique de Boltzmann et la théorie de Maxwell. Planck, qui avec Einstein était l'un des rares physiciens

à avoir compris les difficiles travaux de Boltzmann, ne croyait pas à l'hypothèse atomique, mais il pensait que la thermodynamique statistique qui avait permis de fonder les principes les plus intangibles de la physique devait pouvoir s'appliquer au problème du rayonnement du corps noir. On appelle corps noir un corps quelconque en équilibre thermique avec le rayonnement qu'il émet et absorbe. Le meilleur exemple en est l'enceinte d'un four à température constante. Il se trouve, et l'observation en avait été faite à la fin du XIX^e s., que le spectre de fréquence de ce rayonnement est une fonction universelle, complètement indépendante des propriétés particulières du corps noir, et qui ne dépend que de la température. Le comportement à basse fréquence de ce spectre était bien compris, mais dès que l'on tentait d'extrapoler ce spectre dans la région des hautes fréquences on se heurtait à d'insurmontables difficultés. Pour les lever, Planck tente un modèle phénoménologique pour rendre compte de l'émission et de l'absorption du rayonnement. Il modélise le corps noir par un ensemble de résonateurs qui émettent et absorbent le rayonnement électromagnétique par quanta d'énergie. L'énergie portée par ces « grains d'énergie » est proportionnelle à la fréquence : $E = h\nu$, où la constante de Planck h est la constante de proportionnalité. Alors qu'avec la seule théorie de Maxwell il n'y avait aucune limite à la fréquence du rayonnement émis par le corps noir, avec le modèle de Planck la simple conservation de l'énergie interdit l'émission de fréquences arbitrairement élevées. Grâce à son modèle des grains d'énergie, Planck se trouvait à même d'appliquer la thermodynamique statistique à son problème, car il pouvait caractériser et compter les complexions pour aboutir à une expression de l'entropie. Il aboutit ainsi à une formule, à trois constantes h , c et k qui donne un excellent accord avec les données expérimentales, sur l'ensemble du spectre de fréquences.

En 1905, l'année même où il élaborait la théorie de la relativité restreinte, Einstein accomplit un nouveau pas de géant. Il approfondit le travail de Planck en se débarrassant du modèle phénoménologique des résonateurs : il émet l'hypothèse révolutionnaire que dans le rayonnement du corps noir, c'est le champ électromagnétique lui-même qui est constitué de grains d'énergie proportionnelle à la fréquence. Cette hypothèse redonne immédiatement la formule de Planck, mais en prime, elle lui permet d'élucider un autre problème laissé en suspens, l'existence d'un seuil de fréquence dans l'effet photoélectrique. Il ouvre ainsi la voie à une conception corpusculaire de la lumière : les grains d'énergie sont des grains de lumière, ce que quelques années plus tard on a appelé des photons. Le rayonnement du corps noir relève de la thermodynamique statistique des photons. Dans l'effet photoélectrique, un photon peut, à condition qu'il soit assez énergétique, arracher un électron d'un atome.

Ainsi, pour résoudre certains problèmes laissés en suspens par la théorie électromagnétique de Maxwell, Planck et Einstein firent-ils surgir une nouvelle

constante universelle, la constante de Planck, dont ils firent qu'entrevoir les incalculables implications. C'est petit à petit que la signification de cette constante universelle a pu être dégagée. La constante de Planck traduit une limitation fondamentale qui s'impose à tout sujet connaissant dans son rapport cognitif avec la nature : à moins de faire une expérience durant un temps infini, on ne peut pas observer une particule microscopique sans lui transférer un tant soit peu d'énergie, et si réciproquement on veut observer un objet microscopique avec une grande précision spatio-temporelle on doit lui communiquer une énergie d'autant plus élevée que la précision souhaitée est élevée. Toute observation, toute mesure, est une interaction entre un objet et un appareil impliquant un transfert d'énergie ΔE , pendant un temps ΔT ; l'action ΔA mise en jeu, égale au produit de ΔE par ΔT , ne peut pas être inférieure au quantum d'action égal à la constante h découverte par Planck, divisée par 2π :

$$\Delta A = \Delta E \Delta T \geq \hbar = \frac{h}{2\pi}, \quad (1)$$

telle est, mathématiquement exprimée, la limitation fondamentale que traduit la constante de Planck. Les inégalités d'Heisenberg généralisent l'inégalité (1) à d'autres couples de variables dont le produit a le contenu dimensionnel d'une action comme une coordonnée spatiale et la composante correspondante de l'impulsion, ou quantité de mouvement, le moment cinétique et l'orientation angulaire. Ces inégalités signifient que certaines paires de variables ne peuvent être mesurées simultanément avec des précisions arbitraires : la précision sur la mesure de l'une se paie par l'imprécision sur la mesure de l'autre. Cette corrélation pose un problème d'une redoutable difficulté : en effet, si par exemple les conditions de l'observation sont adaptées à la mesure de la position elles ne le sont pas à celle de l'impulsion, et donc, aussi bien dans la préparation de l'expérience que dans son compte rendu, on ne peut plus faire abstraction des conditions de l'observation. La difficulté réside dans le fait que la prise en compte des conditions de l'observation ne doit pas nuire à la maniabilité des concepts : si pour rendre compte par exemple du comportement de particules élémentaires il fallait inclure dans les concepts une description explicite du détecteur à l'aide duquel elles sont observées, il est évident que ces concepts deviendraient absolument inutilisables. Pour lever cette difficulté il a été nécessaire de modifier de fond en comble le formalisme de la physique.

Comme le quantum d'action est indivisible, les processus mettant en jeu une action égale au quantum d'action sont des processus élémentaires, qu'il n'est pas possible de décrire de manière causale à l'aide des équations différentielles de la mécanique classique. La seule prédictibilité possible concernant ces processus est probabiliste. L'absorption ou l'émission d'un photon par un atome qui change de niveau d'énergie, la désintégration spontanée d'un noyau radioactif ou

d'une particule instable, une réaction particulaire provoquée dans une expérience auprès d'un accélérateur sont des processus que nous devons renoncer à décrire individuellement de manière déterministe ; il nous faut les intégrer à une description probabiliste. Tous les concepts quantiques, même quand ils sont censés décrire un système dépendant d'un petit nombre de degrés de liberté, ont donc un contenu probabiliste inaliénable. C'est ce renoncement à une description causale des processus individuels qu'Einstein, pourtant l'un des fondateurs de la théorie quantique, a toujours refusé.

L'avancée cruciale de la mécanique quantique réside dans la prise en compte de ce que l'on appelle l'indiscernabilité. En mécanique classique, deux particules microscopiques de même espèce sont « étiquetables », discernables ; il est possible de suivre leurs trajectoires dans l'espace et le temps. Ce n'est plus vrai en mécanique quantique. De manière générale, deux processus ou phénomènes sont dits quantiquement indiscernables si, pour les distinguer, il faut faire une expérience mettant en jeu au moins un quantum d'action. L'exemple paradigmatique de cette propriété est fourni par la fameuse expérience de Young avec des électrons : on fait passer des électrons émis par une source quasi ponctuelle au travers d'un cache percé de deux trous et on enregistre les impacts de ces électrons sur un détecteur plan situé à quelque distance du cache. L'effet spectaculaire, prédit par la théorie quantique et observé expérimentalement, consiste en l'apparition d'une figure d'interférence (typique d'une dynamique ondulatoire) progressivement construite par les impacts des électrons. Les deux voies de passage des électrons, soit par un trou soit par l'autre, sont des voies quantiquement indiscernables. Un des grands paradoxes de la théorie quantique réside dans le fait que si l'on veut lever l'indiscernabilité, c'est-à-dire déterminer par quel trou passent les électrons, on détruit inévitablement la figure d'interférence. L'aptitude à produire des effets d'interférence, associée à l'indiscernabilité et détruite par la levée de cette indiscernabilité, est appelée la cohérence quantique. Pour en rendre compte, on a forgé le concept essentiel de toute la théorie quantique, le concept d'amplitude de probabilité. Une amplitude de probabilité est un nombre complexe (défini par un module et une phase, ou par une partie réelle et une partie imaginaire) dont le carré du module est une probabilité. Par son module, une amplitude de probabilité rend compte du caractère probabiliste de la prédictibilité quantique, et par sa phase elle rend compte de l'indiscernabilité cohérente pouvant donner lieu à des effets d'interférence. Dans le cas de l'expérience de Young avec des électrons, le formalisme des amplitudes de probabilité permet de rendre compte des observations : l'amplitude de probabilité d'un impact d'électron sur l'écran, dont le module au carré est égal à la probabilité d'impact, est la somme des deux amplitudes de probabilité associées chacune au passage par un des deux trous ; comme ces amplitudes sont des nombres complexes, des interférences

sont possibles alors qu'elles seraient totalement incompréhensibles dans le cadre de la mécanique classique de particules matérielles. La disparition des franges d'interférence lorsque l'on détermine par quel trou sont passés les électrons traduit la perte de la cohérence quantique, prix dont on paie la levée de l'indiscernabilité.

La méthodologie quantique : une méthodologie « horizontale »

La discussion précédente montre bien que la limitation fondamentale que traduit le quantum d'action n'est pas un mur infranchissable, mais qu'il s'agit plutôt d'un horizon, qu'il est toujours loisible de déplacer par la pensée théorique. Au sens strict du terme, un horizon est autant objectif (s'il n'y avait pas de monde, il n'y aurait pas d'horizon) que subjectif (l'horizon dépend de la position de l'observateur). La ligne d'horizon est immatérielle, elle n'a pas de contenu de réalité : elle se déplace au gré du mouvement de l'observateur. Mais à son propos nous avons au moins une certitude : c'est sur le monde réel que nous la traçons. Grâce à ce concept de ligne d'horizon, le monde peut maintenant être pensé comme le lieu géométrique de toutes les lignes d'horizon possibles.

L'amplitude de probabilité est le concept central de la méthodologie quantique, que nous qualifions d'horizontale pour signifier que les concepts quantiques ne sont plus censés décrire directement la réalité microphysique, mais plutôt les « lignes d'horizon » que la connaissance expérimentale trace sur cette réalité. L'amplitude de probabilité décrit la ligne d'horizon de l'horizon de prédictibilité/discernabilité délimité par le quantum d'action. Un concept horizontal répond à la double exigence de la physique quantique : englober la prise en compte des conditions de l'observation (l'horizon en dépend de manière essentielle), et rester suffisamment malléable pour permettre une mathématisation de la physique (quoi de plus mathématisable que le mouvement d'une ligne d'horizon ?). On voit alors se dessiner une conception dialectique de l'objectivité en physique quantique : 1) Les limitations pratiques de la connaissance du monde microscopique, qui se traduisent par l'existence du quantum d'action, imposent la prise en compte, dans le formalisme même, des conditions de l'observation. 2) Cette prise en compte s'effectue en reconnaissant le caractère horizontal des concepts quantiques. Ce faisant, on vide les concepts de leur contenu de réalité, mais on les maintient au contact de cette réalité : la fameuse fonction d'onde de l'équation de Schrödinger, qui est une amplitude de probabilité, ne prétend pas décrire immédiatement et directement le comportement de l'électron « en soi », mais de rendre compte d'expériences effectuées dans des conditions bien déterminées. 3) Ce nouveau statut des concepts permet alors le moment théorique de la reconstruction de l'objectivité, la pensée du monde comme lieu géométrique de toutes les « lignes d'horizon » possibles : pour tout processus ou

transition, on déterminera l'ensemble des voies quantiquement indiscernables que peut emprunter le processus, on attachera à chacune de ces voies une amplitude de probabilité de transition, on sommerà de façon cohérente (c'est-à-dire avec la possibilité d'interférences) toutes ces amplitudes pour construire l'amplitude totale du processus, dont le carré du module donnera la probabilité. Ce programme rapidement décrit est celui de l'intégrale de chemins de Feynman. 4) La méthodologie est alors bouclée par le retour au critère de la pratique : la sommation de toutes les amplitudes de probabilité associées aux voies indiscernables peut permettre de prédire des effets nouveaux, comme, par exemple, des figures d'interférences, ou leur disparition dans certaines conditions, tous effets directement vérifiables ou réfutables expérimentalement.

La mécanique statistique et quantique

De proche en proche, la méthodologie horizontale s'étend à la prise en compte de toutes les constantes universelles. Cette extension se fait à l'aide de « mariages de constantes ». Nous avons déjà rencontré la relativité générale, mariage de la théorie de Newton et de la relativité restreinte, qui prend en compte c et G et leur fait jouer le rôle de constantes de structure de la matière-espace-temps. Mais d'autres mariages ont été réalisés, avec des succès spectaculaires. Ainsi, la statistique quantique prend en compte simultanément h et k , et étudie les comportements quantiques de systèmes macroscopiques.

Il aura fallu attendre le milieu du XX^e s. pour que se dégage l'interprétation informationnelle de la constante de Boltzmann. C'est à partir de cette interprétation que Léon Brillouin est parvenu à « exorciser le démon de Maxwell », ce personnage allégorique qui, capable de trier les molécules d'un gaz à l'équilibre en fonction de leurs vitesses, pourrait, en contradiction avec le second principe de la thermodynamique, extraire de l'énergie mécanique à partir d'une source unique de chaleur. Examinant le processus de mesure à partir duquel le démon serait capable de déterminer la vitesse des molécules pour pouvoir les trier, Léon Brillouin montre qu'au-dessous d'une certaine quantité d'information, exprimée en entropie, ou plutôt en néguentropie, égale à la constante de Boltzmann multipliée par le logarithme de 2, l'information gagnée par le démon ne compense pas l'information perdue à cause de la perturbation, de nature quantique, liée au processus de mesure. Ce raisonnement de Léon Brillouin suggère qu'il existe une relation très profonde entre mécanique quantique et mécanique statistique, entre action et information. L'information est la matière de la connaissance, mais il n'y a pas d'information sans interaction. En dernière instance, l'information se réduit à une réponse par oui ou par non à une certaine question, ce que l'on appelle un « bit » d'information : l'essence de l'information est le discontinu. L'irruption du discontinu dans les interactions peut

alors être comprise comme la conséquence d'un principe quantique d'équivalence de l'action et de l'information. La constante de Planck h est interprétée comme le coût minimal, exprimé en action d'un « bit » d'information et la constante de Boltzmann k comme la quantité d'information, exprimée en néguentropie, qu'il est possible d'obtenir à partir d'un quantum d'action.

La mécanique quantique et la mécanique statistique sont les disciplines qui prennent en compte respectivement h et k . La statistique quantique les prend en compte simultanément et explicitement. Cette discipline, qui se trouve aujourd'hui au cœur des technologies les plus avancées, a servi de banc d'essai à toute la panoplie des concepts de la physique quantique. Ainsi, c'est en statistique quantique que la distinction entre bosons et fermions prend tout son sens physique. Alors que deux fermions ne peuvent coexister dans le même état, des bosons peuvent et même tendent à s'agréger tous dans le même état. Les atomes d'hélium 4 sont des bosons qui peuvent, à très basse température, se condenser dans un même état, tant et si bien que la propriété de cohérence quantique, évoquée ci-dessus, sera effective même à des distances macroscopiques. Telle est l'explication que la statistique quantique donne aux surprenantes propriétés de l'hélium superfluide.

La mécanique quantique et relativiste, ou théorie du champ quantique

Avec les concepts d'espace de Fock, de quasi-particules, de vide quantique, de mer de Fermi, de « trous », la statistique quantique a préparé le terrain pour l'émergence du concept fondamental de champ quantique qui est au cœur de la réconciliation des deux théories qui ont longtemps paru antagoniques, la mécanique quantique et la relativité restreinte. C'est l'antagonisme entre d'une part la notion de champ classique, solution sans singularité d'équations différentielles et d'autre part la notion classique de point matériel si nécessaire à la mécanique rationnelle des systèmes matériels qui a bloqué Einstein dans sa recherche d'une théorie unifiée de la gravitation et de l'électromagnétisme. Au prix du renoncement à une description déterministe des processus individuels, la théorie du champ quantique, qui prend en compte simultanément h et c , résout cette antinomie. Cette théorie représente un nouvel élargissement de la mécanique rationnelle qui englobe les deux théories à une constante dont elle fait la synthèse (la mécanique quantique non relativiste et la relativité restreinte non quantique) et les redonne respectivement aux approximations non relativiste et non quantique. Les succès obtenus avec le modèle standard de la physique des particules qui en est le fruit prouvent que le renoncement, qui répugnait à Einstein, à la description déterministe des processus individuels, n'a rien fait perdre à cette théorie, en termes de pouvoir prédictif.

L'horizon de la gravitation quantique

Malgré ces succès, le défi de la réconciliation de la relativité générale et de la mécanique quantique, c'est-à-dire de la quantification de la gravitation, n'a toujours pas été relevé. L'interpellation que lançait Einstein en 1950 résonne toujours aux oreilles des physiciens théoriciens : « Je ne vois aucune raison de supposer que la signification heuristique du principe de relativité générale doive être limitée à la gravitation et que le reste de la physique puisse être traité séparément sur la base de la relativité restreinte, dans l'espoir que plus tard le tout pourrait s'ajuster d'une façon cohérente à un plan relativiste général... Le relativement peu que nous connaissons aujourd'hui comme effets de la gravitation n'est pas une raison concluante pour ignorer le principe de relativité générale dans les investigations théoriques d'un caractère fondamental. »

De fait, le rapprochement de la relativité générale et de la mécanique quantique, qui aboutirait à une physique à trois constantes (h , c et G) se révèle terriblement difficile. À la difficulté inhérente à la mécanique quantique de séparer l'objectif du subjectif s'ajoute la difficulté de séparer, dans le cadre de la relativité générale, la cinématique de la dynamique, le cadre du contenu.

Dès la découverte de la constante qui porte son nom, Planck remarquait qu'à partir de h , c et G , il est possible d'extraire une masse fondamentale, un temps fondamental de l'ordre de 10^{-44} seconde, une longueur fondamentale de l'ordre de 10^{-35} centimètre. Se pourrait-il que ce temps de Planck et cette longueur de Planck soient des limites à la divisibilité de l'espace-temps et mettent ainsi en cause l'idée d'un continuum d'espace-temps, essentielle à l'existence même de la mécanique ? La gravitation quantique ne serait-elle pas une frontière indépassable de la mécanique ?

Les recherches concernant la quantification de la gravitation empruntent actuellement deux voies séparées. La voie de la théorie de la supercorde consiste à essayer de dépasser la théorie du champ quantique à l'aide d'une théorie dans laquelle les particules élémentaires sont associées aux excitations d'une minuscule corde dont la dimension est de l'ordre de la longueur de Planck. Cette nouvelle théorie engloberait la théorie du champ quantique, éviterait les insurmontables difficultés qu'elle rencontre lorsque l'on tente de l'appliquer à la gravitation et la redonnerait à l'approximation des basses énergies, c'est-à-dire lorsque la gravitation est négligeable. La théorie de la supercorde est purement géométrique ; elle ne dépend que de deux constantes universelles, c , la constante de structure de l'espace-temps et une longueur fondamentale, la taille de la supercorde, de l'ordre de la longueur de Planck. Dans cette théorie, la constante de Planck perdrait son statut de constante fondamentale, elle ne servirait plus que de pont entre l'univers de la supercorde et celui du champ quantique.

L'autre voie ne tend pas à réduire le nombre de

constantes universelles fondamentales mais au contraire à accroître le nombre de celles qui sont prises en compte. C'est la voie que préconise Stephen Hawking avec sa théorie quantique et thermodynamique des trous noirs, une théorie qui fait intervenir les quatre constantes universelles évoquées dans le présent article h , c , G et k .

- BATON J.P. & COHEN-TANNOUJH G., *L'horizon des particules*, Paris, Gallimard, 1989. — BOUDENOT J.C., *Électromagnétique et gravitation relativistes*, Paris, Ellipses, 1989. — BRILLOUIN L., *Science and Information Theory*, New York, Academic Press, 1962. — COHEN-TANNOUJH G. & SPIRO M., *La Matière Espace-Temps*, Paris, Fayard, 1986 ; *Les constantes universelles*, Paris, Hachette « Pluriel », 1998. — FEYNMAN R., *Lumière et Matière*, Paris, InterEditions, 1987. — HAWKING S., *Une brève histoire du temps*, Paris, Flammarion, 1989. — KASTLER A., *Cette étrange matière*, Paris, Stock, 1976. — NEWTON I., *Principia Mathematica*, Paris, Bourgois, 1985. — PRIGOGINE I. & STENGERS J., *Entre le temps et l'éternité*, Paris, Fayard, 1988. — WEISSKOPF V., *La révolution des quanta*, Paris, Hachette, 1989.

Gilles COHEN-TANNOUJH

→ Espace-temps ; Force ; Lumière ; Inertie (Principe d') ; Irréversibilité ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Planck ; Quantique ; Relativité ; Trou noir ; Virtuel.

CONSTRUCTIVISME

MATHÉMATIQUES

Le constructivisme en philosophie des mathématiques possède deux composantes. D'un point de vue logique, il rejette un certain type de preuves, à savoir les preuves, justement qualifiées de « non constructives », qui prétendent établir l'existence d'un objet mathématique doté de certaines propriétés sans pour autant présenter aucun exemplaire de l'objet en question : d'un point de vue ontologique, il voit les objets mathématiques comme des constructions mentales, et non comme des réalités indépendantes préexistant à l'activité du mathématicien. Par ailleurs, le constructivisme ne se limite nullement à une critique des mathématiques classiques, et il en propose, sous diverses formes, une réforme. Il constitue à ce titre l'un des rares exemples d'une philosophie qui ait entrepris non seulement de clarifier la pratique scientifique usuelle, mais aussi de la modifier avec quelque succès.

L'une des premières preuves d'existence à propos de laquelle la controverse entre les constructivistes et leurs adversaires ait pris un tour doctrinal explicite est sans doute la démonstration par Hilbert, au début des années 1890, du fait que la totalité des invariants et covariants d'un système de formes algébriques n -aires peut toujours être engendrée par un nombre fini d'entre eux. Là où Gordan, qui avait passé sa vie sur la question, avait laborieusement montré comment calculer expressément une telle base dans le cas particulier des formes binaires, Hilbert obtient le résultat général en établissant simplement que l'inexistence d'une base

engendrerait une contradiction, s'attirant ainsi les sarcasmes de son prédécesseur : « Das ist nicht Mathematik. Das ist Theologie. » La controverse ne touche pas le point de savoir s'il convient ou non de préférer les preuves constructives : chaque partie s'accorde bien évidemment pour estimer qu'elles sont plus instructives, et qu'il vaut mieux connaître un objet doté d'une propriété donnée que de savoir seulement qu'il en existe un. Elle concerne plutôt la valeur probative des démonstrations non constructives, jugée nulle par les constructivistes, et indiscutable par leurs adversaires.

Cette querelle était largement inédite. Les désaccords qui avaient opposé les mathématiciens et les philosophes des époques précédentes ne portaient pas sur l'idée, unanimement reçue, que la constructibilité était bel et bien un critère d'existence, mais plutôt sur les deux points litigieux suivants. D'une part, il s'agissait de s'accorder sur le type de construction capable d'assurer l'existence des objets mathématiques : devait-on, par exemple, admettre la légitimité des constructions « mécaniques », effectuées autrement qu'à la règle et au compas ? D'autre part, il importait de préciser la portée ontologique du critère de constructibilité et, tout particulièrement pour les philosophes les plus soucieux d'insister sur l'éternité inengendrée des objets mathématiques, de prévenir les contresens consistant à prendre la constructibilité non pas comme un critère, mais comme une définition de l'existence mathématique : Platon, qui dénonce à l'envi la « sottise » des géomètres qui s'imaginent créer les figures, alors qu'ils ne font que découvrir celles qui existent, proposait simplement d'étendre aux êtres géométriques que l'on peut figurer à l'aide de la règle et du compas l'existence mathématique idéale qui revient à la droite, au cercle et à la sphère en vertu de leur caractère absolu et constant.

Tout autre est le constructivisme moderne – et donc, compte tenu de ce qui précède, le constructivisme tout court –, qui voit dans la constructibilité la définition même de l'existence, et non plus le simple indice d'une existence absolue, indépendante de l'activité du mathématicien. Son émergence à la fin du XIX^e s. est une réaction à une profonde mutation des mathématiques, au terme de laquelle les objets mathématiques ont, si l'on peut dire, proliféré au-delà de toute possibilité de désignation réglée. Le concept de fonction, qui avait longtemps coïncidé avec l'idée d'une correspondance assignable entre un système d'arguments x_1, \dots, x_n et une valeur y obtenue en effectuant un certain nombre d'opérations plus ou moins familières sur ces arguments, en vient alors à désigner une correspondance absolument quelconque, simplement assujettie à n'associer qu'une seule valeur à un système donné d'arguments. Dès lors, les mathématiques cessent d'être naturellement constructives, et le constructivisme demande précisément qu'elles le restent, quitte à renoncer volontairement à certaines techniques de définition ou de démonstration jugées hasardeuses. Selon cette doctrine, dont on voit qu'elle est littéralement réactionnaire, les objets dont on affirme

l'existence devront toujours pouvoir être régulièrement assignables (principe de spécification). La seule version légitime du théorème sur l'existence d'une infinité de nombres premiers, par exemple, sera celle que donnait Euclide, indiquant que pour tout nombre premier p il existe un nombre premier plus grand inférieur à $p! + 1$.

Ce constructivisme « de haute époque », principalement illustré par Kronecker, n'aurait probablement pas eu un grand avenir s'il n'avait pu être interprété, dans la phase suivante (la « Crise des Fondements »), comme un diagnostic particulièrement prémoniteur des risques encourus à s'écarter de l'« intuition », ou tout au moins à étendre inconsidérément au cas de totalités infinies les modes de raisonnement éprouvés dans le cas fini. À partir de 1908, Brouwer explicite et radicalise le point de vue de Kronecker, en y ajoutant la critique du principe du tiers-exclu $AV \rightarrow A$: il n'y a aucun sens à parler de la vérité ou de la fausseté d'un énoncé mathématique indépendamment de la connaissance que nous avons de cette vérité ou de cette fausseté ; nous ne devons considérer un énoncé comme vrai que si nous en avons une preuve, et comme faux que si nous sommes d'ores et déjà en mesure d'établir qu'une preuve putative de l'énoncé pourrait toujours être transformée en une preuve d'un énoncé absurde. Le tiers-exclu ne doit donc pas s'appliquer aux énoncés que nous ne serions actuellement en mesure ni de justifier ni de réfuter. Ces considérations logico-sémantiques sont relayées par une ontologie hostile à la conception platonicienne : loin de préexister à l'activité qui les construit, les objets mathématiques sont de libres créations de l'esprit humain, et ils ne sont dotés que des propriétés susceptibles d'être démontrées par lui à un instant donné.

Bien que cette doctrine « intuitionniste » de Brouwer soit la version la plus connue du constructivisme, elle n'est pas la seule qui ait été développée dans les années 1920. Le principe de spécification, en vertu duquel aucun objet ne doit être admis qui ne soit effectivement présent ou construit, peut être en effet entendu de façon plus ou moins stricte. L'intuitionnisme n'est pas lui-même extrêmement sévère sur ce point, d'une part parce qu'il se réfère à une effectivité « de principe » (l'important est l'existence d'une « méthode » permettant d'engendrer l'objet, et non pas la possibilité pratique pour une créature en chair et en os d'appliquer cette méthode jusqu'à son terme), et d'autre part parce que Brouwer admet, à côté des nombres réels dont les décimales successives sont données par une loi générale effective, des nombres réels dont les décimales résulteraient d'une suite de « choix libres » du sujet mathématicien, et à propos desquels on ne saurait donc jamais posséder qu'une information partielle (compte tenu de cette dernière composante, l'analyse intuitionniste diffère profondément de l'analyse classique, puisque toute fonction réelle de variable réelle Y est, par exemple, continue...). D'autres variétés de constructivisme sont plus libérales encore, en ce qu'elles n'adressent aucune objection véritable à la

logique classique, et qu'elles réservent leurs critiques aux techniques usuelles de définition des objets mathématiques. C'est le cas, sous des formes diverses, avec les ainsi nommés « semi-intuitionnistes français » (Baire, Borel, Lebesgue), mais surtout avec Poincaré, qui plaide pour l'abandon des définitions « imprédictives » où un objet est défini par référence à une collection à laquelle il appartient lui-même (si l'on cherche à construire la collection en question en introduisant successivement les objets qui la composent, on ne saurait introduire l'objet ainsi défini sans que la construction soit achevée, alors même que l'achèvement de la construction repose sur cette introduction). Hermann Weyl est le premier, en 1918, à avoir systématiquement évalué les conséquences de cette restriction prédicativiste sur les théorèmes de l'analyse classique, avant de se rallier à l'intuitionnisme, puis de l'abandonner lui-même en raison de difficultés liées à l'applicabilité des mathématiques.

En effet, certains théorèmes fondamentaux de l'analyse, comme le théorème de Bolzano-Weierstrass (chaque ensemble infini borné de réels admet un point d'accumulation), ne peuvent être démontrés sans utiliser le principe du tiers-exclu. La perspective constructiviste demande donc que l'on renonce à une grande partie des mathématiques classiques, pour ne rien dire du « paradis » cantorien des cardinaux transfinites. Cette austérité, ainsi que la très grande complexité des mathématiques qui peuvent être développées en conformité avec les réquisits intuitionnistes, a engendré dans les années 1920 une très vive réaction dans les mathématiques « classiques ». Hilbert, qui voyait dans Brouwer la réincarnation du maléfique « Verbotsdiktor » qu'avait été, à ses yeux, Kronecker à la fin du XIX^e s., et qui considérait que la situation d'un mathématicien privé du tiers-exclu était en tout point comparable à celle d'un boxeur à qui l'on aurait confisqué ses gants, ou d'un astronome démuné de son télescope, s'engagea ainsi dans une riposte qui voulait être une « réduction à l'absurde » du constructivisme. Admettant, plus ou moins par hypothèse, que les théorèmes « abstraits » ou « infinitaires » des mathématiques classiques étaient de simples « manières de parler » dénuées de signification littérale, il entreprit de montrer constructivement qu'en tout cas ils ne permettraient de prouver aucun énoncé doté de contenu constructif qui ne fût déjà constructivement prouvable : le constructiviste aurait été ainsi obligé de convenir que les mathématiques classiques ne recélaient rien qui, de son propre point de vue, dût être considéré comme faux, à moins précisément que ses propres principes ne présentassent déjà la même défec-tuosité. Bien que ce « programme » réductionniste, consistant en somme à justifier les mathématiques non constructives sur des bases constructives, ait échoué devant les résultats d'incomplétude de Gödel (le premier théorème montre que si l'arithmétique est cohérente, il existe un énoncé « doté de contenu » qui ne peut être décidé qu'en recourant à des principes non strictement constructifs), il ouvre des perspectives

fascinantes, encore aujourd'hui activement explorées, à la philosophie des mathématiques. Ainsi, il suggère de façon assez générale que l'on pourrait rendre compte de la légitimité des mathématiques classiques, non constructives, en se contentant de l'ontologie modeste des mathématiques constructives : selon cette voie « déflationniste », préconisée notamment par H. Field, les mathématiques classiques devraient être justifiées de façon purement instrumentaliste, au titre d'auxiliaire précieux, quoiqu'en principe éliminable, dans l'« extraction » des vérités constructives.

La variété de constructivisme à l'œuvre dans le programme original de Hilbert était, en réalité, plus stricte que l'intuitionnisme lui-même. Il s'agissait d'une perspective finitiste dans laquelle on était censé se limiter à des considérations combinatoires ayant trait à des objets « quasi concrets » comme des suites de symboles, et où l'on répudiait toute espèce d'objet abstrait, non visualisable (le système d'arithmétique « primitive récursive » APR décrit par Skolem en 1923 correspond à peu près à ces exigences). L'échec du programme de Hilbert montre qu'il est impossible de « réduire » (en son sens) la totalité des mathématiques classiques à leur partie finitiste, mais il laisse ouverte la possibilité de la réduire à une partie constructive moins austèrement définie. Vers les années 1960, cette perspective a été explorée par Gödel, puis Feferman, respectivement dans le cadre de l'intuitionnisme et du prédicativisme. Une autre ligne de recherches voudrait que l'on réduise une partie seulement (la plus grande possible, et en tout cas significative pour la compréhension du monde physique) des mathématiques classiques à leur noyau strictement finitiste. Ce programme, activement poursuivi depuis une vingtaine d'années, a notamment donné naissance à la tradition des *reverse mathematics* de H. Friedman, où l'on cherche quelle base constructive (la plus restreinte possible) permettrait d'engendrer un ensemble donné de théorèmes mathématiques. Les résultats obtenus dans cette voie, que l'on pourrait résumer en disant que les mathématiques applicables « de notre temps » peuvent être développées dans des extensions conservatives de APR, fournissent indiscutablement un argument de poids au réductionnisme constructiviste.

Plutôt qu'à détailler le foisonnement des diverses tendances contemporaines du constructivisme, on conclura cette note en indiquant deux caractéristiques qui assurent aujourd'hui à cette orientation une assise solide, et qui donnent une allure fort téméraire à la prophétie de Bourbaki, pour lequel il ne s'agit là que d'une « école [...] dont le souvenir n'est sans doute destiné à subsister qu'à titre de curiosité historique ». D'une part, la théorie des fonctions calculables et l'informatique théorique ont d'ores et déjà conféré un sens opératoire indiscutable à la notion même de construction. D'autre part, l'effort de clarification entrepris par des philosophes comme M. Dummett a montré de manière convaincante que le constructivisme peut être lavé du psychologisme et du solipsisme qui furent ses péchés originels.

► DUMMETT M., *Elements of Intuitionism*, Oxford Univ. Press, 1977 ; *Philosophie de la logique* (1978), trad. Pataut, Paris, Minuit, 1991. — FEFERMAN S., *Infinity in Mathematics : Is Cantor Necessary ?*, in TORALDO DI FRANCA G. dir., *L'infinito nella scienza*, Rome, Enciclopedia Italiana, 1987. — HARTRY H.F., *Science Without Numbers*, Princeton Univ. Press, 1980. — LARGEAULT J., *Intuitionnisme et théorie de la démonstration*, Paris, Vrin, 1992. — TAIT W.W., *The Law of Excluded Middle and the Axiom of Choice*, in GEORGE A. dir., *Mathematics and Mind*, Oxford Univ. Press « Logic and Computation in Philosophy », 1994. — TROELSTRA A.S. & VAN DALEN D., *Constructivism in Mathematics*, vol. 1, Amsterdam, North-Holland Publ., 1988.

Jacques DUBUCS

→ Catégories et foncteurs ; Démonstration ; Preuve ; Vérification.

CONTINGENCE

Le relatif effacement du mot contingence est déjà ancien. Il n'en est guère fait usage dans le langage ordinaire, où l'on parle plus volontiers de hasard pour désigner le caractère inattendu d'événements ou de coïncidences. Nombre de philosophes ont parlé de contingence pour en préciser le statut. Cependant, sans doute parce que nous nous sommes éloignés de cette conception religieuse de l'univers qui nous portait à concilier la prescience divine, la liberté humaine et les lois de la nature, sans doute aussi parce que les nombreuses combinaisons de ces trois termes, Dieu, la nature et la liberté, destinées à affirmer ou à nier la contingence, ne recèlent plus de surprises, les renouvellements philosophiques de la notion sont rares. La philosophie de la liberté de Sartre constitue ainsi la dernière des grandes tentatives pour fonder l'impossibilité ou nous sommes de prévoir rigoureusement le futur sur les libres décisions par lesquelles nous introduisons des coupures dans le cours du temps. Par ailleurs le développement considérable des théories probabilistes en physique pouvait laisser attendre un regain d'actualité pour la notion de contingence. Il n'en a rien été. La biologie est aujourd'hui le seul domaine où la notion de contingence soit d'un emploi assez répandu pour retenir l'attention des épistémologues. Ce constat invite à quelques commentaires.

Est contingent ce qui, étant, pourrait ne pas être. Derrière cette définition formelle se profile le problème des futurs contingents, ces événements à venir qui auraient la propriété, tout en étant inscrits dans une nature soumise à des lois, de pouvoir être ou n'être pas, selon la décision prise, et cela sans qu'il y ait à revenir sur le dogme d'un Dieu tout-puissant et tout-connaissant. De ce délicat problème théologico-philosophique, la science moderne, à partir du XVIII^e s. et pendant deux cents ans, nous éloigne. La contingence est expulsée des explications scientifiques de la nature par la mécanique céleste, qui fonde la possibilité de calculer l'état d'un système à n'importe quel moment à partir de la connaissance de son état à un instant

donné. L'essor de la mécanique quantique et des théories probabilistes en physique, depuis soixante ans, n'a pas fait renaitre l'intérêt pour l'idée de contingence. La critique de l'idée de déterminisme a en effet eu pour résultat de mettre en évidence que le déterminisme est un postulat et non un concept scientifique à portée ontologique. L'abandon de la thèse métaphysique qu'enveloppait l'idée de déterminisme amoindrit en retour les enjeux de l'indéterminisme et de son corrélat, la contingence. L'impossibilité de prévoir rigoureusement l'état futur d'un système ne conduit pas à renoncer à la science, et n'accrédite pas les conclusions radicales en faveur d'une liberté humaine dont le hasard ancré au cœur de la matière contiendrait la promesse. Le surinvestissement d'une contingence ontologique abusivement déduite de la physique quantique étant écarté, la notion aurait pu retrouver une acception scientifique destinée à fixer le sens des limites de la prédiction en microphysique. Mais l'idée de hasard, et surtout ses formes connues sous le nom de probabilité mathématique suffisent à rendre compte de ces limites, et en apportent une connaissance qui se substitue avantageusement aux ambiguïtés de la notion traditionnelle de contingence.

L'inconvénient majeur de cette notion est d'imposer une alternative rigide entre deux options. Ou bien un événement, compte tenu des lois de la nature et des conditions initiales, est strictement déterminé : il ne peut pas ne pas se produire, il interviendra nécessairement. Ou bien, ces conditions étant données, il peut se produire ou non, seul le hasard en décide, il est alors dit contingent. Le problème pseudo-épistémologique qui se pose alors est de savoir si le hasard est un produit de notre ignorance ou s'il caractérise la nature, si une contingence pure est inscrite au cœur de l'Être. Cette fausse alternative est dénuée de sens scientifique. D'une part l'idée de « Hasard ontologique est aussi sublimé que vide » (Wagensberg, 1985), d'autre part la détermination d'un ensemble de nombres qui décriraient des conditions initiales avec une précision infinie est dénuée de sens physique. Entre une information infinie et une information aussi précise que l'on voudra, il y a un abîme. La première nous fournirait une trajectoire unique d'un système, sans place pour le hasard, la seconde une famille délimitée, mais comportant une part de hasard, de trajectoires. Poincaré (*Le Hasard*, 1914) a ainsi montré comment, connaissant les lois qui régissent le mouvement d'un dé (lois de Newton, élasticité des matériaux, etc.), on obtient, à partir de tout intervalle aussi restreint que l'on voudra, un nombre égal de trajectoires menant à l'affichage de chaque face du dé. On peut donc parler de probabilité dans un contexte strictement mécaniste. Pour le physicien l'absence de hasard ne serait pensable que moyennant un passage par l'infini, c'est-à-dire qu'elle serait impensable. Le travail scientifique de détermination des phénomènes ne consiste jamais à occulter le hasard, mais à le définir, à le mesurer, à établir des distinctions entre différents niveaux, ordres ou hiérarchies du hasard, selon les domaines abordés.

Considérons deux suites de nombres. La première présente une régularité, on peut donc la décrire à l'aide d'un algorithme simple. La seconde suite ne présente pas une telle régularité, aucun algorithme ne permet de la « compresser », et elle n'est pas accessible à la prédiction : pour connaître le nombre suivant, il faut attendre le prochain tirage. Ainsi une suite de nombres est aléatoire si l'algorithme minimal capable de l'engendrer contient le même nombre d'informations que la suite elle-même. Cette définition du hasard n'est pas sans portée épistémologique, dès lors que l'effort de théorisation scientifique est comparé à l'édification d'un algorithme capable d'engendrer les séries empiriques : puis de les étendre à la prédiction d'états ultérieurs du système. Dans cette perspective, la contingence se définit par l'incompressibilité, et il devient possible d'établir qu'une suite est plus ou moins aléatoire qu'une autre.

Ces distinctions peuvent éclairer certaines controverses récentes entre biologistes. Lorsque Stephen Jay Gould, par exemple, assure que les événements évolutifs sont contingents il assume l'héritage darwinien et s'oppose à ceux qui en méconnaissent le principe. La contingence désigne simplement ici la non-directivité et la non-prédictibilité de l'évolution. Cependant Darwin ne se limitait pas à penser le hasard à titre de rencontre de deux séries causales indépendantes, celle des petites variations héréditaires et celle des changements environnementaux. Il attribuait au hasard un rôle explicatif, l'inscrivant à l'intérieur des processus naturels. Il y a là l'origine d'un débat entre ceux qui rapportent le changement évolutif à des mutations aléatoires et ceux qui, comme Charles Devillers, montrent que tout organisme est soumis à des contraintes génétiques ou fonctionnelles... et ne peut évoluer dans n'importe quelle direction. Ces controverses scientifiques invitent à une étude des différents niveaux du hasard engagés dans les diverses branches de la biologie. À défaut, elles alimentent des querelles idéologiques que l'on pouvait espérer dépassées.

► ARISTOTE, *De l'interprétation*, Paris, Vrin, 1969 ; *Métaphysique*, trad. fr. J. Tricot, Paris, Vrin, 1964. — BEATTY J., « The probabilistic revolution in evolutionary biology — an overview », in KRUGER L., GIGERENZER G. & MORGAN M.S. éd., *The Probabilistic Revolution* (1987), Cambridge (Mass.)/Londres, A. Bradford Book/MIT Press, 2^e éd., 1989, vol. 2, p. 229-232. — CHAITIN J., « Randomness and Mathematical Proof », *Scientific American*, 212 (47), 1975. — DEVILLERS C. & TINTANT H., *Questions sur la théorie de l'évolution*, Paris, PUF, 1996. — GOULD S.J., *Full House*, New York, Harmony Books, 1996. — KANT E., *Critique de la raison pure*, Paris, Gallimard, 1990. — MONOD J., *Le hasard et la nécessité*, Paris, Le Seuil, 1970. — POINCARÉ H., *Le hasard*, Paris, Flammarion, 1914. — SARTRE J.-P., *L'Être et le Néant*, Paris, Gallimard, 1943. — WAGENSBERG J., *L'âme de la méduse*, Paris, Le Seuil, 1997.

Jean Paul THOMAS

→ Déterminisme ; Évolutionnisme ; Hasard ; Nécessité.

CONTINUITÉ

Le débat sur la continuité ou la discontinuité du développement de la connaissance scientifique comporte deux aspects. La question semble se poser avant tout dans le domaine de l'histoire des sciences : il s'agit alors de savoir comment rendre compte de la succession des théories scientifiques dans une même discipline. Mais elle concerne également un problème qui relève de la philosophie de la connaissance et de l'épistémologie, celui du rapport de la connaissance commune et de la connaissance scientifique.

Ces deux questions ne sont pas analytiquement liées l'une à l'autre. On peut être continuiste et discontinuiste à la fois, suivant que l'on considère l'une ou l'autre ; ainsi Kant pense-t-il que l'accession au savoir scientifique relève d'une révolution (discontinuité), mais qu'une fois fondées, les sciences se développent suivant un processus cumulatif (continuité). Ces deux questions sont donc relativement indépendantes, mais philosophes et épistémologues n'ont pas manqué de les relier l'une à l'autre. On peut même dire que c'est à de telles occasions que la thèse de la continuité, comme celle de la discontinuité, a été défendue avec le plus de force. La continuité n'a pas le même statut suivant qu'elle est pensée par les concepts de tradition, d'évolution ou de progrès. Il en va de même pour les différents noms de la discontinuité : révolution, rupture, coupure, refonte. Mais quel qu'il soit, un concept de la continuité ou de la discontinuité reçoit toujours un aspect normatif lorsqu'il répond conjointement à la question historique et à la question épistémologique. On l'aperçoit dans une pensée de la discontinuité comme celle de Bachelard, où chaque avancée de la science se marque par la rupture avec des obstacles épistémologiques, c'est-à-dire par une répétition et une confirmation de la rupture initiale de la connaissance scientifique avec la connaissance commune. On l'aperçoit également dans des pensées continuistes comme celles de Comte et de Husserl. La phénoménologie husserlienne soutient que la vérité dépend d'une donation à la conscience naïve, non scientifique, et que la science ne consiste qu'en une épuration, en un passage à la limite de cette expérience originaire. Ainsi faudrait-il voir dans l'évolution des théories scientifiques la perpétuation d'une tradition garante de vérité dans la mesure où elle assume le rapport à l'origine et la permanence de sa présence. Le positivisme comtien présente la version inverse. Ce n'est plus la continuité avec l'origine, mais la prise de distance progressive à l'égard du savoir premier qui garantit la vérité de l'esprit positif, dernier stade de l'évolution de l'esprit humain. Soulignons que Comte présente sans doute la version la plus complète et la plus élaborée du continuiste. Ne se contentant pas de marquer la continuité du savoir scientifique et d'un savoir non scientifique dont on pourra toujours penser que le concept est trop large, il décrit un procès historique parvenant à rendre compte de la continuité des différents degrés de rationalité de la connaissance préscientifique (pensée

théologique, pensée métaphysique) ainsi que de la continuité des différentes disciplines scientifiques. La démarche contient également le mérite d'articuler cette théorie de l'évolution de l'esprit humain avec une théorie de la hiérarchie des sciences où l'on voit comment les méthodes et les objets des différentes sciences se transforment progressivement les uns dans les autres. Comme souligne ainsi que le problème de l'accès à la scientificité ne peut être résolu *in abstracto* au moyen d'une définition générale de la science, mais qu'il se pose différemment suivant la nature des disciplines considérées. C'est là un thème qui par la suite fut défendu de différentes manières : pour des raisons de fait, comme lorsque Schumpeter remarque que la connaissance du sens commun va plus loin en économie qu'en n'importe quel autre domaine, à tel point qu'il est difficile par exemple de savoir si Aristote propose l'ébauche d'une analyse scientifique des phénomènes économiques, ou si elle appartient totalement à la connaissance préscientifique ; pour des raisons de droit comme chez les théoriciens qui tentèrent de montrer, contre Comte, que les méthodes des sciences humaines sont irréductibles à celles des sciences de la nature et qu'elles supposent toujours une solidarité avec le savoir préscientifique.

La question de la continuité peut également recevoir des réponses plus modestes et moins systématiques que celles qui viennent d'être invoquées. Si Piaget pouvait soutenir que l'épistémologie se doit de produire la théorie de la connaissance à même de rendre compte de l'accès de l'intelligence à la connaissance scientifique et de l'évolution des théories scientifiques, force est de constater que la plupart des débats sur l'histoire des sciences ne puisent plus leurs principaux arguments dans une théorie de la connaissance. Ces débats affrontent eux-mêmes une double question : celle de la continuité ou discontinuité des différentes théories se développant successivement dans une discipline constituée dont la scientificité est reconnue (par exemple la physique et la séquence Galilée-Newton-Einstein), et celle de la discontinuité ou continuité d'une telle discipline avec le savoir qui la précède et qu'elle périmé (par exemple le rapport de la théorie galiléenne avec la physique médiévale).

Cette seconde question ne se réduit pas à celle de la continuité du savoir scientifique avec le savoir non scientifique puisque le savoir périmé par la fondation d'une nouvelle discipline n'est pas nécessairement identifiable à un savoir préscientifique. Cette question peut donc être traitée pour elle-même, comme une pure question historique. Duhem fournit l'illustration d'une telle démarche : tout d'abord persuadé de la rupture de la physique classique avec la physique antique, il fut ensuite convaincu du contraire par une étude de la physique médiévale où il découvrit les divers chaînons qui reliaient Galilée et Newton à Aristote. La démarche de Duhem est symptomatique de la logique de nombreuses défenses du continuisme. Lorsqu'elles s'instituent, les disciplines scientifiques doivent se faire reconnaître par une lutte avec le savoir antérieur qui

tend à masquer leurs origines véritables et le rapport qui les lie effectivement avec lui. Que la rupture d'une discipline avec son passé appartienne à la représentation naïve qu'une discipline a d'elle-même plutôt qu'à son histoire réelle, c'est le soupçon de nombreux historiens continuistes. Notons cependant que si le préjugé doit toujours être soupçonné, il n'est pas toujours faux, et qu'en matière d'histoire des sciences, il est aussi des préjugés continuistes, comme ceux qui conduisent à toujours trouver dans le passé des influences et des précurseurs du présent. Ce dernier préjugé nous conduit à une aporie du débat sur la continuité historique. D'une part, il semble nécessaire de rendre compte de la spécificité des problématiques et des langages qui font l'originalité des différentes disciplines et qui les rendent irréductibles les unes aux autres ; on est ainsi conduit à une approche discontinuiste, elle fut notamment celle de Foucault, qui permet de rompre avec le mythe des précurseurs en scindant l'histoire en strates hétérogènes. Mais cette représentation risque de nier l'histoire elle-même, en empêchant de voir que le présent est toujours le produit du passé. À vrai dire, que le présent dépende du passé, c'est l'évidence, et la question est plutôt celle de la nature des transformations qui mènent au présent. On devine que la réponse ne sera jamais simple et que l'on pourra toujours déceler la permanence du passé, qu'il s'agisse de thèses, de concepts, de méthodes ou d'instruments. Continuité ou discontinuité ? On ne pourra trancher en dressant l'inventaire de ce qui est nouveau et de ce qui ne l'est pas, mais seulement en déterminant si ce que l'on considère comme le cœur de la science a subi des modifications significatives. Face à une théorie scientifique déterminée, il ne sera donc pas impossible d'aboutir à des conclusions divergentes selon la philosophie de la science que l'on fait sienne.

La question du devenir des théories au sein d'une discipline déterminée rencontre elle aussi les termes de cette aporie, mais elle doit aussi résoudre des difficultés spécifiques. La première tient à la prise en compte de ce qui se présente comme deux régimes de développement du savoir. La seconde renvoie à la question du progrès scientifique.

L'alternative continuité-discontinuité prend un sens spécifique dans la mesure où à l'intérieur d'une même discipline le savoir connaît deux types de développements qui semblent distincts : celui de la succession des théories (par exemple la séquence Galilée-Newton-Einstein) et celui du développement d'une même théorie (par exemple le développement du programme newtonien). Un théoricien de la discontinuité insistera sur la permanence du cadre théorique au cours du développement d'une même théorie, en faisant ainsi apparaître tout ce qui distingue ces deux devenir ; tel est le sens de l'opposition établie par Kuhn entre « science normale » et « science révolutionnaire ». Mais on pourra également remarquer à la suite de Lakatos que le développement d'une théorie suppose en fait de nombreux aménagements (la refonte du programme newtonien par Laplace et son école en fournit

l'illustration). L'opposition de ces deux devenir perd alors de son évidence, et faute d'émettre comme ce dernier l'hypothèse d'un « noyau dur » invariant, on en viendra à soutenir comme Toulmin et Laudan que la dynamique du développement d'une théorie déterminée n'est pas fondamentalement différente de celle du changement de théories.

La question de la continuité rencontre également le problème du progrès scientifique. Le fait que des théories se succèdent au sein d'une même discipline trouve son explication la plus évidente dans l'idée que les nouvelles théories représentent un progrès par rapport aux anciennes théories. Cette thèse suppose qu'il existe un certain degré de continuité dans la succession des théories. Il faut en effet qu'il y ait un minimum de continuité pour que les théories passées puissent être lues à partir des théories présentes et que leur vérité soit reconnue bien que jugée inférieure. Mais cette thèse ne conduit pas nécessairement à une position continuiste puisqu'elle n'implique pas que le nouveau savoir conserve les anciens principes et qu'il ne consiste qu'en une application plus conséquente, plus approfondie ou plus étendue, de ces principes. On s'en aperçoit chez Bachelard, qui fait du progrès scientifique le résultat d'un procès discontinu dans lequel de nouvelles théories rompent avec d'anciennes théories, périssent une part de leur savoir tout en sanctionnant une autre. Il est cependant légitime de se demander si la discontinuité dans le changement de théories n'est pas plus radicale encore. C'est ce qu'ont conclu Kuhn et Feyerabend sur la base d'une analyse des rapports sémantiques entre théories. Si l'on admet, comme le fait Bachelard du reste, que le changement de théorie s'accompagne de changements de signification qui s'appliquent même aux concepts conservés dans la nouvelle théorie, il est alors difficile de constater la vérité – même partielle – de l'ancienne théorie à partir de la nouvelle théorie. Même sans admettre l'incommensurabilité sémantique des théories, on devra reconnaître avec Bunge que les relations entre théories sont difficilement éliminables, surtout dans le cas de la physique relativiste et de la mécanique quantique, qui n'entretiennent toutes deux qu'un rapport asymptotique complexe avec la mécanique classique. L'épistémologue semble donc confronté ici à l'alternative suivante : adopter une position sceptique et relativiste, ou admettre un minimum de continuité pour rendre compte du progrès scientifique.

► BACHELARD G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951. – BÉNSAÛDE-VINCENT B., *Lavoisier, Mémoires d'une révolution*, Paris, Flammarion, 1993. – BUNGE M., *Philosophy of Physics*, Dordrecht, D. Reidel Publ. Co., 1973 (trad. fr. F. Balibar, *Philosophie de la physique*, Paris, Le Seuil, 1975). – COMTE A., *Cours de philosophie positive* (1830-1842), Paris, Hermann, 1975. – DUHEM P., *Les origines de la statique*, Paris, Hermann, 1905-1906. – FEYERABEND P., *Against Method*, Londres, New Left Books, 1975 (trad. fr. B. Jurdat & A. Schlumberger, *Contre la méthode*, Paris, Le Seuil, 1979). – FOUCAULT M., *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966. – FOX R., « The Rise and Fall of the Laplacian

Physics », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 4, 1974, p. 89-136. – HABER S., *Les sciences humaines*, Paris, Quintette, 1995. – HUSSERL E., *Die Krisis der Europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie*, La Haye, Husserl-Archiv te Leuven/Martinus Nijhoff, 1954 (trad. fr. G. Granel, *La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale*, Paris, Gallimard, 1976). – KANT E., *Critique de la raison pure* (1781, 1787), trad. fr. A. Tremesaygues & B. Pacaud, Paris, PUF, 1944. – KUHN T.S., *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962, 1970 (trad. fr. L. Meyer, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983). – LAKATOS I., *The Methodology of Scientific Research Programmes*, Cambridge, Cambridge Univ. Press (trad. fr. C. Malamoud & J.-F. Spitz, *Histoire et méthodologie des sciences*, Paris, PUF, 1994). – LAUDAN L., *Progress and its Problems: Towards a Theory of Scientific Growth*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1977 (trad. fr. P. Miller, *La dynamique de la science*, Bruxelles, Mardaga, 1987). – PIAGET J., *Introduction à l'épistémologie génétique*, Paris, PUF, 1949. – POPPER K., *Objective Knowledge, an Evolutionary Approach*, Oxford, Clarendon Press, 1972 (trad. fr. C. Bastyns, *La connaissance objective*, Bruxelles, Complexe, 1978). – SCHUMPETER J., *History of Economic Analysis*, Londres, Allen & Unwin, 1955 (trad. fr. sous la dir. de J.-C. Casanova, *Histoire de l'analyse économique*, Paris, Gallimard, 1983). – SERRES M. dir., *Éléments d'histoire des sciences*, Paris, Bordas, 1989. – TOULMIN S., *Foresight and Understanding*, New York, Harper & Row Publishers, 1963 (trad. fr. J.-J. Lecercle, *L'explication scientifique*, Paris, A. Colin, 1691); *Human Understanding*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1972.

Emmanuel RENAULT

→ Bachelard ; Découverte ; Épistémologie ; Kuhn ; Paradigme ; Révolution scientifique ; Rupture ; Théorie.

CONTROVERSE BOHR-EINSTEIN

Les débuts de la mécanique quantique constituent un chapitre d'histoire de la philosophie autant qu'un moment marquant de l'histoire de la physique. En effet, la théorie a été l'objet de très nombreuses discussions philosophiques, qui furent le fait de tous les protagonistes de cette grande aventure. Parmi tous les débats qui eurent lieu entre 1900 et la fin des années 1930, le plus remarquable fut peut-être celui qui opposa Einstein à Bohr. M. Jammer le décrit ainsi : « Ce fut l'un des grands débats scientifiques de l'histoire de la physique, et peut-être ne peut-il être comparé qu'à la controverse Newton-Leibniz à la fin du dix-huitième siècle. Dans les deux cas il s'est agi d'un affrontement entre des conceptions philosophiques diamétralement opposées, au sujet de problèmes fondamentaux de la physique ; dans les deux cas ce fut un affrontement entre deux des esprits les plus éminents de leur temps [...] » (*The Philosophy of quantum mechanics*, p. 120).

Débat philosophique, débat scientifique ? La controverse n'a pas porté sur la prise en compte de faits expérimentaux nouveaux, ni sur la compréhension du nouveau formalisme mathématique de la mécanique quantique. Son enjeu était méthodologique et concernait l'évaluation

des procédures de formation de concepts utilisées dans la théorie nouvelle. Bohr et Einstein, comme tous les autres fondateurs de la mécanique quantique, étaient d'accord sur la nécessité d'analyser soigneusement les concepts des théories antérieures afin de déterminer avec précision les limites de leur domaine d'application. Il fallait tracer celles de nos idées intuitives sur le monde qui servaient implicitement d'axiomes dans nos représentations théoriques, sans revêtir cependant le caractère d'absoluité nécessaire à cette fonction. C'est ce qu'Einstein avait fait lors de l'élaboration des théories de la relativité, suivant en cela les injonctions de Mach. C'est cette entreprise que lui-même, comme Bohr, Heisenberg, Born ou Schrödinger, voulait poursuivre dans la construction de la mécanique quantique. Cependant, les vues de Bohr et d'Einstein quant à la réalisation de ce projet ont rapidement divergé.

L'opposition entre Bohr et Einstein porte sur le destin des concepts des théories classiques : sont-ils des formations intellectuelles nécessaires à l'énonciation de tout discours scientifique, ou bien peuvent-ils – doivent-ils – être remplacés par des concepts radicalement nouveaux ? « Le langage de Newton et de Maxwell restera toujours le langage des physiciens », écrit Bohr (« Maxwell and modern theoretical physics », *Nature*, 127, 1931, p. 692). Il faut selon lui trouver un moyen de conserver le langage des théories classiques dans la description des phénomènes quantiques. La réalité physique des processus quantiques n'est pas décrite de façon complète par le formalisme de la théorie réinterprété « à la Bohr », répond en substance Einstein.

L'opposition entre Bohr et Einstein commence dans les années 1920 pour atteindre son point de cristallisation en 1935, et ne jamais se résoudre ensuite. La découverte par Planck du caractère irréductiblement discontinu de la matière ainsi que la prise en compte de la dualité onde-corpuscule ont conduit les physiciens qui travaillaient dans le domaine microscopique à considérer l'abandon de l'électromagnétisme et de la mécanique classique comme une nécessité dès les premières années du *xx*^e s. En 1913, Bohr construit un modèle de l'atome d'hydrogène qui va explicitement à l'encontre des lois classiques, mais qui permet de produire des prédictions étonnamment fiables. Dès lors, la question qui devient centrale pour lui est la suivante : où précisément les concepts des théories classiques deviennent-ils inapplicables et entrent-ils en contradiction avec les données expérimentales ? La première réponse qu'il donne à cette question est la formulation en 1920 d'un principe heuristique, le principe de correspondance, selon lequel les prédictions de la nouvelle théorie microscopique doivent correspondre asymptotiquement avec celles des théories classiques dans les domaines où ces dernières s'appliquent. Ce principe devait selon lui conduire à formuler une « généralisation rationnelle » des théories classiques.

En 1925, Heisenberg, Born et Jordan mettent au point une première formulation complète de la mécanique quantique, sous la forme d'une « mécanique des

matrices ». En 1926, Schrödinger produit une seconde formulation, la « mécanique ondulatoire », et démontre qu'elle est équivalente à la première. Bohr fait alors porter sa réflexion sur l'articulation entre théories classiques et mécanique quantique. La formulation par Heisenberg des relations d'indétermination, qui limitent la précision avec laquelle on peut déterminer la valeur d'une variable (la variable *q* par exemple, qui est le correspondant quantique de la variable classique de position) si on connaît précisément celle de sa variable conjuguée (la variable *p* de quantité de mouvement dans l'exemple précédent) conduit Bohr à prôner une « révolution dans les concepts ». Selon lui, en effet, les représentations spatio-temporelles et causales de la physique classique sont radicalement inadéquates pour décrire le domaine quantique. Ces réflexions débouchent sur le principe de complémentarité, énoncé pour la première fois par Bohr en 1927 à la conférence de Côme, et sur lequel il reviendra sa vie durant. Ce principe, que certains considèrent comme notoirement obscur (cf. A. Fine), est le moyen inventé par Bohr pour défaire les paradoxes résultant de la rupture avec la physique classique nécessitée par la découverte des phénomènes quantiques. Il postule l'existence d'une relation, la relation de complémentarité, entre certains concepts classiques (par exemple, le concept de position et celui de quantité de mouvement, ou encore, le concept de temps et celui d'énergie), dont l'usage simultané est problématique dans le domaine quantique. Ainsi, selon les relations de Heisenberg, on ne peut déterminer à la fois une valeur précise de la variable *p* et une valeur précise de la variable *q* pour un même processus quantique ; les deux concepts de position et de quantité de mouvement ne peuvent donc pas selon Bohr être employés dans la même description du phénomène étudié. Ils produisent des descriptions qui sont incompatibles, mais « complémentaires » l'une de l'autre. Le processus quantique ne doit plus être décrit par l'attribution simultanée d'un ensemble de propriétés, mais seulement par une série de représentations partielles et incompatibles les unes avec les autres. Dans ces descriptions partielles doivent en outre intervenir impérativement les conditions de l'observation du processus. En effet, les conditions d'expérimentation font partie de la définition même du phénomène quantique, car elles exercent une influence incontrôlable sur le processus étudié.

Une des conséquences majeures du principe de complémentarité, qui devient vite le pôle de toutes les discussions philosophiques sur la mécanique quantique, est qu'un processus quantique ne peut pas être représenté à la fois dans l'espace-temps et selon le principe de causalité. Les concepts de la physique classique qui servaient à déterminer la « réalité physique », à savoir la localisation spatio-temporelle de l'objet, la conservation de son énergie (qui est la formulation physique du principe de causalité), la continuité de son évolution, et l'indépendance de son comportement par rapport à celui qui l'observe, valent presque tous en éclats en mécanique quantique, sauf le principe de

conservation de l'énergie. Selon Bohr, ces concepts s'excluent mutuellement quand ils sont appliqués au domaine quantique et ne peuvent être employés de façon simultanée. D'autre part, Bohr considère qu'une fonction d'onde ψ décrit un unique processus quantique, et que les probabilités qui lui sont liées sont à analyser à l'aide de la notion de complémentarité, sans faire intervenir d'ensembles statistiques sur lesquels on ferait des moyennes. Bohr envisage ainsi les rapports entre mécanique quantique et théories classiques sur le fondement d'une redéfinition nécessaire des concepts classiques. Il considère que c'est la voie d'une interprétation cohérente du formalisme de la mécanique quantique, qui s'applique selon lui à des phénomènes uniques.

Einstein, au contraire, est d'emblée méfiant vis-à-vis de l'aspect irréductiblement statistique des prédictions de la mécanique quantique. Cela constitue une première raison de son désaccord avec Bohr. Selon lui, une théorie irréductiblement statistique ne peut être fondamentale. Sa célèbre conviction, exprimée dans une lettre à Born du 4 décembre 1926, selon laquelle « Dieu ne joue pas aux dés », ne sera jamais entamée par les raffinements des interprétations de la mécanique quantique fondées sur le principe de complémentarité. Einstein ne se résoudra jamais à abandonner le modèle classique de la description des phénomènes physiques, à la fois spatio-temporelle et causale, et cherchera à défaire les paradoxes engendrés par les processus quantiques par d'autres moyens que Bohr.

Après que Bohr a énoncé le principe de complémentarité, qui devient le cœur de « l'interprétation de Copenhague », Einstein entreprend de construire une série d'expériences de pensée visant à montrer qu'il existe certains cas où représentations spatio-temporelle et causale ne s'excluent pas mutuellement, et que par conséquent le principe de complémentarité ne peut s'appliquer universellement. Lors des 5^e et 6^e congrès Solvay, en 1927 et 1930, Einstein met ainsi à l'épreuve le principe de complémentarité, et Bohr est contraint à affiner son interprétation pour qu'elle prenne en compte les expériences de pensée d'Einstein. Cet effort d'Einstein culmine dans l'écriture en 1935 de l'article « EPR », en collaboration avec B. Podolsky et N. Rosen. À chaque expérience de pensée proposée par Einstein, Bohr avait répondu par des arguments montrant que le principe de complémentarité devait s'appliquer quoi qu'en dise Einstein. À l'article « EPR », Bohr répond par un article portant exactement le même titre : « Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète ? » Alors qu'Einstein répond « non » à cette question, Bohr y répond par l'affirmative.

Le problème central de cette étape du débat entre Bohr et Einstein est la détermination de la façon dont nous pouvons appréhender la « réalité physique ». Einstein et ses collaborateurs énoncent un « critère de réalité » – si, sans perturber le système en aucune façon, nous pouvons prédire avec certitude (c'est-à-dire avec une probabilité égale à 1) la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de la réalité physique correspondant à

cette grandeur physique – et une « condition de complétude » pour une théorie physique – chaque élément de la réalité physique doit avoir un correspondant dans la théorie physique –, et tirent de ces deux principes la conclusion selon laquelle la mécanique quantique ne permet pas une description complète de la réalité physique. Bohr répond que le « critère de réalité » cité comporte une « ambiguïté essentielle », et que l'article « EPR » ne fait que démontrer « l'inadéquation essentielle du point de vue ordinaire de la philosophie naturelle pour une analyse rationnelle des phénomènes [quantiques] », et non l'incomplétude des descriptions produites par l'utilisation de la fonction d'onde ψ . Par la suite, ni Bohr ni Einstein ne reviendront sur leur position. Les autres physiciens, pour la plupart, ne se préoccupèrent plus de ces débats épistémologiques, et chercheront avant tout à explorer les conséquences de la théorie plutôt que ses fondements. Pour ce faire, ils se reposeront sur le principe de complémentarité, qui a le mérite de fournir une interprétation cohérente, si ce n'est parfaitement claire, de la mécanique quantique. Einstein, de son côté, cherchera la théorie qui doit selon lui servir de fondement à la mécanique quantique dans un approfondissement de la théorie de la relativité générale, qui est une théorie continue. Jusqu'à sa mort, en 1955, il se refusera à la « révision radicale de notre attitude par rapport à la réalité physique » préconisée par Bohr. Pour Einstein, la tâche à accomplir n'est pas de s'interroger sur les possibilités de la définition des mots que nous employons pour décrire les processus quantiques, mais de produire une théorie qui ne « fuie » pas dans les statistiques. Dans une lettre à Schrödinger du 31 mai 1928, Einstein écrit : « La philosophie (ou la religion) légitimant de Heisenberg-Bohr est subtilement agencée de manière à fournir, provisoirement, à celui qui y croit de profonds coussins dont il peut difficilement s'extirper. Laissons-le donc s'y reposer » (in *Œuvres choisies*, vol. 1, p. 213). L'attitude d'Einstein est caractérisée par le refus d'un tel assoupissement. La « philosophie de Bohr » viole pour lui un idéal de représentation du monde physique qu'il exclut d'abandonner. La controverse Bohr-Einstein apparaît ainsi comme un conflit portant sur les buts épistémologiques de la physique fondamentale, c'est-à-dire sur l'adéquation des procédures de représentation qu'il convient d'utiliser dans les différents domaines de phénomènes. Bohr insiste sur la prégnance du langage de la physique classique, et Einstein sur l'idéal de connaissance qu'elle représente.

● BOHR N., « Can quantum-mechanical description of reality be considered complete ? », *Physical Review*, 1935, 48, p. 696-702 ; *Atom physics and human knowledge*, New York, J. Wiley & Sons, 1958 (trad. fr. E. Bauer et R. Omnès, revue par C. Chevalley, *Physique atomique et connaissance humaine*, éd. C. Chevalley, Paris, Gallimard, 1991, et en particulier « Discussion avec Einstein sur les problèmes épistémologiques de la physique atomique », p. 195-248). – EINSTEIN A., Lettre à Schrödinger du 31 mai 1928, in *Albert Einstein. Œuvres choisies*, vol. 1, *Quanta*, Paris, Le Seuil/Éd. du CNRS, 1989, p. 213-214. – EINSTEIN A., PODOLSKY B. & ROSEN N., « Can quantum-mechanical description of reality be considered

complete ? ». *Physical Review*, 1935, 47, p. 777-780 (trad. fr., « Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète ? », *Albert Einstein. Œuvres choisies*, vol. 1, *Quanta*, Paris, Le Seuil/Ed. du CNRS, 1989, p. 224-230).

► D'ESPAGNAT B., *À la Recherche du réel*, Paris, Presses Pocket « Agora », 3^e éd., 1991. — HOOKER C.A., « The Nature of quantum mechanical reality : Einstein versus Bohr », in COLONY R.C. éd., *Paradigms and paradoxes*, Pittsburgh, Univ. of Pittsburgh Press, 1972, p. 67-302. — JAMMER M., *The Philosophy of quantum mechanics. The interpretation of quantum mechanics in historical perspective*, New York, J. Wiley & Sons, 1974, chap. 5 et 6. — PETRUCCIOLI S., *Atoms, metaphors and paradoxes. Niels Bohr and the construction of a new physics*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1993, chap. 6.

Anouk BARBEROUSSE

→ Complémentarité ; Correspondance (Principe de) ; Indiscernabilité ; Mesure en mécanique quantique ; Observable ; Quantique ; Réel ; Virtuel.

CONTROVERSES

L'ANALYSE DE CONTROVERSES DANS L'ÉTUDE DES SCIENCES DEPUIS TRENTE ANS : ENTRE OUTIL MÉTHODOLOGIQUE ET OBJET DE L'HISTOIRE DES SCIENCES

L'analyse de controverses est au cœur du renouvellement de l'étude et de l'histoire des sciences des années 1970 et 1980, le constat fait peu de doute. Il suffit, pour s'en convaincre, de regarder les publications dans les grandes revues scientifiques – le genre analyse de controverses est alors en pleine explosion –, et de constater le nombre de polémiques qu'il suscite – en sociologie comme en histoire et en philosophie des sciences. Son apogée, si l'on devait donner une seule date, se situerait vers 1985, année de publication de trois livres majeurs : *Changing Order*, par le fondateur et théoricien du genre, Harry Collins ; *The Great Devonian Controversy*, par le grand historien de la géologie, Martin Rudwick ; et *Leviathan et la pompe à air*, par Steve Shapin et Simon Schaffer. Récit de deux controverses emboîtées, ce dernier livre se clôt par une sortie hors du genre des « analyses de controverses ».

Des objectifs et moyens mobilisés par les analyses de controverses dans l'étude des sciences des années 1970 et 1980

Si je peux dire que *Leviathan et la pompe à air* se clôt par une sortie hors du genre des analyses de controverses scientifiques, c'est que ce genre, contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, ne se définit pas alors par un objet. Ce qui fonde ce programme n'est pas l'évidence ou l'universalité « des controverses » – il existerait des polémiques et des affaires dans les sciences et on devrait les étudier – mais un projet philosophique articulé sur une démarche méthodologique. Ce qui constitue le genre et sa fécondité est d'abord une manière de regarder l'activité des sciences, de dire ce

qu'est la fabrication sociale, discursive et matérielle des énoncés de sciences – une manière qui vise à montrer l'inintérêt du récit scientifique ordinaire. La contrainte méthodologique consiste à suivre très finement les acteurs dans leurs actes et fabrication d'énoncés, de le faire de façon non téléologique, en prenant tous également au sérieux – de façon symétrique comme dira Bloor. Cette démarche est donc construite à la rencontre d'un projet intellectuel qui vise à dés-essentialiser les sciences en les décrivant dans la complexité de leurs actes ; d'un choix de focale : une micro-histoire ; et d'une démarche anti-rétrospective, aux antipodes de l'histoire jugée bachelardienne, qui est centrée sur la manière dont les acteurs en viennent à définir collectivement un sens.

Le plus souvent, l'idée consiste à choisir un énoncé de science ordinaire, un « fait » expérimental ou une démonstration par exemple (l'énoncé et la preuve de Coulomb que « la loi de l'électrostatique est en $1/r^2$ »), de repérer les énoncés contradictoires et les controverses qui ne manquent jamais d'apparaître (sur la nature de ce qui est à énoncer, la fiabilité de la preuve, les contre-exemples, les reproductions ou démonstrations parallèles), puis de les traiter en détail en donnant à chaque acteur sa cohérence et sa logique. Combinant l'idée de *thick description* de l'anthropologue Clifford Geertz et le principe de symétrie de David Bloor, l'idée est de choisir un acte de savoir bien précis, de regarder finement les logiques qui mènent aux divers énoncés – et de montrer que la science ne se déploie pas selon l'image d'Épinal qu'on en donne le plus souvent : la nature ne parle jamais d'elle-même, les faits sont contestés et contestables, les choses ne sont jamais aussi simples qu'on le dit ; l'ambiguïté est constitutive des sciences – dans les mots qu'elle emploie, ses traductions, ses machines, ses graphes. Les preuves expérimentales ou mathématiques ont rarement été évidentes au moment de leur production, elles ont rarement été sans poser problème et sans contestation – parce qu'il n'est pas simple de faire qu'une proposition devienne un fait solide qui résiste aux autres et au temps. Les analyses de controverses étant toujours des études de cas précises et très détaillées, et la variété interprétative pouvant toujours être documentée (si on prend le temps d'aller y regarder), leur caractère démonstratif est très fort : par l'analyse de controverses, il est toujours possible de réouvrir les « boîtes noires » et certitudes trop grandes des sciences sur leurs modes de production.

Pour bien comprendre ce qui est en jeu dans ces « analyses de controverses », je me propose de présenter la première étude du genre, menée par Harry Collins. Elle porte sur la mise en évidence (ou non) d'ondes gravitationnelles par les physiciens des années 1970. L'histoire que raconte Collins peut être résumée ainsi. Un physicien (appelons-le Weber) prétend un jour avoir établi l'existence d'ondes gravitationnelles au travers d'une expérience lourde et complexe. Ce travail est d'abord ignoré par ses collègues ; la raison en est que la théorie (la relativité

générale en l'occurrence) prédit des ordres de grandeur que le dispositif de Weber ne peut atteindre (il n'est pas assez sensible). Weber réagit en réalisant une expérience nouvelle impliquant deux détecteurs situés sur deux continents – et qui indiquent une simultanéité de détection troublante ; cette simultanéité lui permet d'arguer que le phénomène n'est pas un artefact local, qu'il détecte un phénomène de dimension cosmique – et qu'on ne peut donc l'invalider facilement. Et de fait quatre équipes se lancent dans la recherche malgré les doutes théoriques initiaux. Après de longues expériences (qui impliquent beaucoup d'électronique, de mécanique de très grande précision, des basses températures, des simulations, etc.) ces équipes concluent toutes, malgré les désaccords qu'elles ont entre elles, qu'elles ne détectent rien, que Weber n'a certainement rien détecté de « vrai » non plus – et l'histoire se clôt là : après quelques années de travail, Weber est renvoyé à sa solitude.

Collins conclut plusieurs choses de ce cas devenu paradigmatique pour les analyses de controverses : 1 / qu'il faut de bonnes raisons pour changer de sujet de recherche en science. La dynamique des sciences ne va pas de problème en problème mais suit des logiques de travail multiples, des logiques de savoir-faire, de culture expérimentale ou théorique ; 2 / lorsqu'on décide de « reproduire » l'expérience d'un autre, pour la vérifier ou la contester, on ne la refait (presque) jamais à l'identique. Les cinq détecteurs de cette histoire ne sont par exemple pas identiques – ce qui se comprend par le fait que personne ne dispose des mêmes ressources et savoir-faire, et que chacun vise une question un peu différente ; 3 / avec des dispositifs différents, les résultats d'expérience sont souvent difficilement comparables, voire contradictoires – ce qui à nouveau ne correspond pas bien à l'idée de l'expérience qui tranche entre théories. Une équipe peut par exemple obtenir un résultat qui concorde avec celui d'une autre, et penser que la seconde a néanmoins tort, que sa preuve n'est pas convaincante – ce qui est vrai de toutes les équipes de cette histoire ; 4 / dans les sciences, et malgré les controverses fréquentes qu'on y trouve, on cherche toujours à aplanir les différents, à arriver à un accord. Dans les sciences physiques, la calibration des équipements est un moyen courant pour y parvenir (l'idée consiste à envoyer un signal connu sur tous les détecteurs et de voir lequel le déforme le moins ; ce détecteur, comme les résultats qu'il produit, seront alors considérés comme les meilleurs). Malheureusement, lorsqu'il y a désaccord sur les faits, le désaccord « régresse » souvent sur ce qui doit constituer la « bonne » calibration (le désaccord migre sur le type de signal à envoyer – qui n'est qu'un succédané imparfait) ; 5 / en fait c'est souvent lorsque le matériel est standardisé et que les hommes sont acculturés les uns aux autres et à leurs techniques réciproques, que le consensus peut émerger. L'ensemble de ces résultats conduit bien sûr à poser les questions épistémologiques d'une toute autre façon, avec une toute autre ampleur.

Deux grandes conséquences découlent de ces travaux. La première est qu'il n'est pas de nécessité transcendante aux preuves scientifiques : celles-ci sont toujours produites localement – et bien juger de leur pertinence générale est précisément ce en quoi consiste le travail scientifique. La seconde conséquence est que le *dissensus* est premier dans les sciences car, même si on suppose le monde régulier et stable, il ne se donne jamais à voir dans sa vérité nue. Ce sont les acteurs humains qui en proposent des lectures et suggèrent ce que pourrait être l'ordre de la Nature. Parce que la réalité ne s'appréhende que par bribes et à travers des prismes (cognitifs, sociaux et matériels) toujours déformants, il est normal qu'émerge une pluralité de propositions légitimes et intéressantes. On pourrait ici objecter que ces points, en termes théoriques ou philosophiques, ne sont pas très originaux – ce qui n'est pas faux – mais la différence peut être considérable dans les conclusions qu'on en tire. Bachelard vient immédiatement à l'esprit comme penseur pouvant avoir développé des idées qui ne semblent pas aux antipodes de celles-ci, mais l'image d'ensemble qu'il offre est tout autre. À l'héroïsme bachelardien du savant terrassant les lieux communs et surmontant les obstacles épistémologiques en direction d'un progrès somme toute assez cumulatif succède, dans les analyses de controverses, la mise en évidence (plus pessimiste) de la nature irréductiblement locale et contingente du jugement qu'est l'acte de démonstration ou de monstration. À la bataille de l'esprit scientifique en prise avec le préjugé succède l'image de groupes toujours-déjà pris dans les *a priori* et le social et qui, collectivement, essaient de construire un sens partagé. Au discours théorique et « positif », en bref, succèdent des approches critiques et au ras du sol.

Les effets de cette rupture du regard furent très importantes – et notre compréhension des sciences, de leur dynamique, de leurs ancrages sociaux, comme des questions épistémologiques, a beaucoup changé. Une fois passé le premier mouvement, sont apparues l'ethnométhodologie des pratiques scientifiques (les sciences ont été un moment fort de renouvellement de l'ethnométhodologie), l'anthropologie de laboratoire (sous diverses formes) et bientôt un flot de questions historiques. Parce que les analyses de controverses dés-essentialisent les sciences, elles aident à prendre conscience de leur caractère historique. Je ne donnerai ici qu'un exemple. Si on admet que toute activité scientifique est une activité pratique d'interprétation et d'invention contextuellement située, la question des sciences conçue comme une succession temporelle, une accumulation séquentielle de découvertes qui, étant « vraies », se diffusent, se substitue alors une approche plus spatiale des savoirs, une approche proposant une cartographie des pratiques savantes, une géographie historique des régimes sociaux de validation insistant sur la réappropriation active de ces faires

et savoir-faire. Partant de la diversité irréductible des lieux où « du savoir » est produit (un arsenal, un salon aristocratique, un cabinet de curiosité, une start-up, une université technique) et des techniques mises en œuvre, il convient d'admettre l'hétérogénéité des régimes de légitimation – et montrer les moyens de normalisation par lesquels les acteurs en viennent finalement à s'accorder sur des lectures... que le futur démentira toujours.

Des limites des analyses de controverses

Le mouvement que je viens d'évoquer (si sommairement) aura certainement sonné de façon familière au lecteur. Il aura identifié un air de parenté avec l'évolution d'une grande part des sciences sociales durant les trente dernières années. Le programme d'analyse de controverses est, en un sens, le pendant de la *micro-storia* (pour des historiens qui cherchent alors, en ces mêmes années 1970, à s'éloigner des paradigmes quantitativistes), il est le pendant du tournant geertzien en anthropologie, il est aussi le moment de la sociologie boltanskienne. Ce qui caractérise cet air de famille commun à beaucoup de sciences sociales des trois dernières décennies est d'abord le choix d'un grossissement privilégié d'analyse, le niveau des micro-analyses et des micro-interactions, des temporalités courtes et des espaces circonscrits – ou, de façon peut-être plus importante, de la fabrication et de la négociation du sens entre acteurs. L'étude des institutions et des grands cadres de la culture est en effet abandonné au profit de l'analyse des actes spécifiques et situés de production de connaissance et de classement, de tout ce qui contribue à l'émergence et à la fixation des significations dans le social – et ces analyses montrent un intérêt pour la dimension réflexive de l'activité humaine. On prend ses distances d'avec l'explication causale de type structurale, jugée trop grossière, déterministe et inattentive au jeu et à l'autonomie des acteurs, on se méfie des longues durées et de l'inertie des « mentalités ».

Deux lectures de ce suivi méticuleux d'acteurs en inter-action et nous permettant de comprendre comment ils en viennent à faire sens de leur monde sont toutefois possibles – et elles se déploient successivement dans les *science studies*. La première prend la forme stricte de l'analyse de controverses telle que définit par Bloor et Collins. Le résultat en est une ré-évaluation profonde des questions épistémologiques et philosophiques, nous venons de le montrer, mais aussi un choix politique de réhabilitation des vaincus contre les vainqueurs : dans l'analyse de controverse « symétrique » et très localement déterminée, les vaincus sont finalement au cœur du travail puisqu'ils y retrouvent une cohérence généralement ignorée par l'histoire rétrospective des sciences. Dans les *science studies* plus récentes, en revanche, le suivi méticuleux des acteurs s'applique à des dynamiques plus larges et complexes – celle des réseaux et de leurs reconfigurations, la place des objets techniques et de

l'instrumentation dans ces logiques, le réordonnement du social par les « centres de calcul scientifiques », etc. – toutes choses salutaires et essentielles car les sciences sont très loin d'être définies par le seul laboratoire. Logiquement, toutefois, dans ces analyses beaucoup plus amples et immergées dans le social, « le vaincu » n'est plus clairement identifiable et la question de l'asymétrie vaincus/vainqueurs n'est plus l'axe organisateur des narrations.

Il n'en reste pas moins que la volonté demeure de rester au plus près des acteurs – même s'il n'est plus d'injustice à réparer –, d'être également « charitable » avec tous, comme on dit en anglais. Le but étant de saisir ce qui conduit les uns et les autres à agir comme ils le font dans des univers complexes, le but étant de les comprendre et de déchiffrer par quelle série d'actes et de négociations se matérialise une solution éventuellement partagée, il n'y a toujours pas de sens à prendre position dans les querelles intestines des acteurs, ni à s'éloigner des catégories qui sont les leurs. On regarde la dynamique d'une « affaire », par exemple, on décrit des imputations réciproques de responsabilité, ou on montre les modalités d'une mise en coordination. La démarche est pragmatique, comme l'a bien noté Bernard Lepetit, et on regarde « comment l'on s'accorde entre sujets, sur des sujets et sur des choses », « comment l'accord social se fait, échoue à se défaire ou se défait ». En bref, la tendance est à une neutralité axiologique et sceptique radicale vis-à-vis des valeurs des acteurs, elle est plutôt de construire des *grammaires de la justification ou du faire* – et non d'éventuellement prendre en compte les systèmes de valeurs non mobilisés par les acteurs mais qui ont de la pertinence pour que nous puissions juger de leurs actes.

Dans l'étude des sciences – où l'évolution a peut-être été plus radicale du fait de l'opposition à l'idéologie elle-même excessive et toujours renaissante du scientisme – mais aussi dans une part de la sociologie – celle qui est la plus interactionniste et « théorique » –, cette tendance à l'agnosticisme pragmatique a pris des formes propres. Elle a souvent conduit, à « désincarner » les acteurs, à faire qu'ils n'aient plus beaucoup d'épaisseur propre, qu'ils aient peu de « propriétés » indépendantes des réseaux dans lesquels ils agissent. Le social (au sens où l'on parle d'histoire sociale) s'affaiblit alors étrangement, les sociétés décrites tendent à devenir « grises », à se réduire à des univers plats de tractations où l'on ne fait que suivre ceux qui réussissent à imposer comme légitime leurs caractérisations des choses. Paradoxalement peut-être, une neutralité scientifique redevient de règle et l'usage humaniste et politique du principe de symétrie bloorien comme outil de défense des perdants de l'histoire n'a plus cours. Il n'est plus d'espace moral ou politique à partir duquel ancrer ou imaginer d'autres lectures des événements, à partir duquel ouvrir des espaces alternatifs – par exemple à la prolifération des nouveautés techno-scientifiques imposée par les maîtres des réseaux.

Pratiquant de la sorte, répétons-le, on fait apparaître

une richesse et une complexité dont manquent radicalement les approches précédentes. Après Bloor, Collins ou Latour, comme après Boltanski, Geertz et la *micro-storia*, on ne reviendra plus à l'univers heureux des grandes fresques, des grands récits – ou on le fera sur un autre mode, plus réflexif, plus attentif à définir explicitement les critères au nom desquels les récits peuvent s'ordonner. De même, le suivi méticuleux d'acteurs en controverse reste l'outil le plus efficace qu'on puisse imaginer pour miner les positions d'autorité qui se reconstruisent en permanence autour des sciences. Ce qu'on gagne sur un terrain se perd toutefois souvent sur un autre. Voulant faire science dans un sens strict (se restreindre au suivi bien documenté des actions en se tenant hors de la haute mer où les opinions foisonnent), les sciences sociales risquent alors de préférer la pureté doctrinale à l'impureté du monde, la certitude de la chose bien construite à la prise de risque pour démêler des affaires compliquées. Une sorte de rigueur froide et systématique peut en venir à trop normer le travail des sciences sociales – et surtout à faire oublier l'évidence qu'il est de bonne politique scientifique, si le but est de pénétrer la complexité de tout système social, de savoir alterner, de savoir varier les modes et niveaux d'analyses, les outils et les cadres de jugement *a priori*, les regards et les valeurs au nom desquelles on mène l'investigation – de retenir, plus fondamentalement, qu'il n'est pas d'espace social et intellectuel unique et privilégié à partir duquel les mortels puissent parler de façon définitive.

Si on m'autorise un détour par un milieu que je connais bien – mais au risque de tomber dans l'argument d'autorité pour des sciences sociales toujours inquiètes de leur scientificité – je dirais que les sciences physiques ont toujours connu des tensions de ce genre, et que les physiciens des solides, par exemple, ont toujours revendiqué, contre les puristes des particules élémentaires, l'importance de leur *dirty science*, de leur science moins codifiée et volontairement variable dans les outils qu'elle utilise. Ils ont montré qu'elle avait une valeur intellectuelle et heuristique supérieure, qu'il est bénéfique de se déplacer d'un niveau de représentation à un autre, d'une simulation ou d'une modélisation à une autre – et de multiplier les simplifications et partis pris de départ, même s'ils sont incompatibles entre eux. Le risque est bien sûr celui de l'éclatement, de la perte de la (sacro-sainte) cohérence. Mais tourner le dos à la complexité intrinsèque du monde n'est pas la solution, nous en convenons tous – et peut-être vaut-il mieux des gammes d'images construites à partir d'approches et d'*a priori* différents mais permettant de meilleures prises qu'une épure méthodologiquement impeccable mais par trop partielle et infidèle à la variété des situations et des valeurs. À mon sens, cette attitude, et l'épistémologie qui la sous-tend, ne peuvent pas ne pas être la nôtre dans les sciences sociales, l'histoire et la philosophie.

► BLOOR D., *Knowledge and Social Imagery*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1976. – GEERTZ C., *The Interpretation of*

Cultures, New York, Basic Books, 1973. – HACKING I., *Concevoir et expérimenter* (1983), Paris, Bourgois, 1989. – HARRY M. C., *Changing Order : Replication and Induction in Scientific Practice*, Londres, Sage, 1985. – LATOUR B., *La science en action* (1^{re} éd. en langue anglaise, 1987), Paris, La Découverte, 1989. – LEVI G., *Le pouvoir au village* (1^{re} éd. italienne, 1985), Paris, Gallimard, 1989. – LEPETIT B. (dir.), *Les formes de l'expérience*, Paris, Albin Michel, 1995. – LYNCH M., *Art and artifact in laboratory science*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1985. – RUDWICK M. J. S., *The Great Devianant Controversy*, Chicago, The Univ. of Chicago Press, 1985. – SHAPIN S. & SCHAFER S., *Leviathan et la pompe à air* (1^{re} éd. en langue anglaise, 1985), Paris, La Découverte, 1993.

Dominique PESTRE

→ Continuité ; Paradigme ; Révolution scientifique ; Rupture ; Thématique.

CONVENTIONALISME

L'origine du terme « conventionnalisme » est difficile à établir : les auteurs auxquels on attribue habituellement cette doctrine, Gaston Milhaud, Édouard Le Roy, Pierre Duhem et Henri Poincaré, ne semblent pas l'avoir utilisé. Le *Vocabulaire critique de la philosophie* d'André Lalande rassemble ces conceptions sous le nom de « nominalisme scientifique », alors que Popper, dans *La Logique de la découverte scientifique*, parle de « conventionnalisme » comme d'un terme généralement admis.

Cette doctrine, susceptible d'interprétations plus ou moins larges, a d'abord pour fondement une séparation de principe entre les données intuitives des sens et les constructions intellectuelles permettant d'élaborer le corps de la théorie scientifique. Elle n'a pu voir le jour qu'à la suite de la distinction kantienne entre concept et intuition, ou encore entre la spontanéité de l'entendement et la passivité de la sensibilité, unifiés dans une connaissance par le schématisme de l'imagination transcendantale. En effet, les premiers conventionnalistes insistent sur l'acte créateur que suppose l'élaboration des lois et même celle des « faits scientifiques ». L'hypothèse scientifique est alors conçue comme un « langage commode » (Gaston Milhaud, 1896, *Revue de Métaphysique et de Morale*), ou comme un libre décret, incommensurable avec les données de l'intuition, chez Édouard Le Roy (1899 et 1901, *Revue de Métaphysique et de Morale*).

Habituellement, c'est à Henri Poincaré que l'on attribue en premier lieu le conventionnalisme. Il a été pourtant l'un des premiers à critiquer la doctrine de Le Roy sous le nom de « nominalisme absolu » à la fin de *La Valeur de la science* (1905) ; il dit n'admettre le nominalisme que dans des limites étroites. Le Roy lui-même s'est défendu de jamais avoir été nominaliste (voir le *Vocabulaire*...).

Le conventionnalisme n'est donc pas suffisamment caractérisé par le nominalisme, ni par le libre décret du savant. C'est un nominalisme qui porte sur les hypothèses et les lois plutôt que sur les concepts, qui a donc

une idée particulière de leur formation et de leurs relations. Cette doctrine s'est distinguée en premier lieu par la fonction attribuée dans la théorie scientifique aux postulats et aux définitions. Les postulats contribuent à spécifier indirectement et de façon structurelle plutôt qu'individuelle les êtres mathématiques, justement par une définition dite « par postulats » plutôt que nominale. Les définitions : la théorie étant une libre création du savant, les lois peuvent aussi bien servir de définition du phénomène que l'on cherche à décrire. Quant aux notions primitives d'une théorie, elles sont implicitement définies par ses axiomes et postulats. L'idée de définition implicite se trouve déjà dans la théorie des définitions de Gergonne (1819). Selon Poincaré, le 5^e postulat d'Euclide est une « définition déguisée » de la distance. Cela signifie qu'en modifiant ce postulat on change de définition de la distance, et qu'ainsi un dictionnaire permettra de passer de la géométrie euclidienne aux géométries non euclidiennes, ce qui les rend comparables. Il y a un invariant commun entre les géométries, celle d'Euclide peut alors servir de modèle pour les autres et assurer le caractère non contradictoire de celles-ci ; mais elle n'est alors qu'un langage commode pour la description des phénomènes physiques. Ernest Nagel a fait remarquer que le conventionnalisme géométrique de Poincaré n'aurait pas lieu d'être s'il avait distingué la géométrie pure de la géométrie appliquée. Dans une telle conception, la cohérence devient un critère fondamental d'objectivité, et l'on admet avoir prouvé l'existence d'un être mathématique lorsqu'il n'implique pas contradiction dans le système théorique. De plus, une relation mécanique ou physique pouvant être remplacée avantageusement par une relation géométrique, on peut voir les lois de la physique comme conventionnelles : il suffit de distinguer en elles la régularité définie par une relation mathématique et d'en distinguer un petit « phénomène perturbateur ». C'est ainsi, selon Poincaré, que les physiciens, par un « nominalisme inconscient » mettent leurs principes à l'abri de la réfutation expérimentale. On a là, à peu près rassemblés, les ingrédients du conventionnalisme : une certaine conception de la définition où la définition par postulats est paradoxalement préférée à la définition nominale ; l'admission des postulats ; l'importance du système théorique ; l'idée qu'il n'est donc pas possible de vérifier ou de falsifier une loi isolément ; l'usage de distinctions faites pour mettre les lois à l'abri du rejet par l'expérience.

Tous ces ingrédients n'ont pas toujours autant d'importance. Dans le conventionnalisme plus récent le problème n'est pas tant de déterminer le statut des géométries non euclidiennes ou celui des principes de la mécanique que de savoir s'il est possible de confirmer ou d'infirmer une loi. C'est Duhem qui a donné sa forme à ce problème dans *La Théorie physique* (1906), à la fois en critiquant l'idée qu'il puisse y avoir une expérience cruciale et en montrant que toute vérification ou infirmation ne pouvait toucher que l'ensemble de l'édifice des lois. Un « fait brut » donne lieu à une multitude de « faits

scientifiques » entre lesquels aucun critère ne nous permet de choisir si ce n'est un ensemble d'hypothèses et de conventions, ne serait-ce que celles que l'on admet pour rendre possible la mesure. *A fortiori*, lorsqu'une loi semble infirmée, ce qui est à éliminer dans la théorie ne se limite pas à la loi. On ne peut faire une simple ablation locale de l'erreur, et le savant a la difficile liberté de choisir le plus judicieusement possible ce qui est à revoir dans l'édifice théorique. Lakatos oppose le « conventionnalisme révolutionnaire » de Duhem au « conventionnalisme conservateur » de Poincaré : il ne s'agit pas de décider qu'une théorie doit être mise à l'abri de l'expérience, mais de souligner que le savant a le choix, dans les changements théoriques, entre des alternatives que l'expérience ne peut seule trancher. « Cohérentisme » et « conventionnalisme » sont devenus ainsi parfois synonymes : c'est le cas en particulier chez Otto Neurath, qui pensait qu'un énoncé ne pouvait être comparé qu'à un ensemble d'autres énoncés, et que sa confrontation à une « réalité » tenait du projet métaphysique. La position de Duhem suppose, selon des termes plus contemporains, un holisme épistémologique : c'est par ce trait que l'on caractérise habituellement la thèse de Duhem-Quine.

Quine ajoute une caractéristique supplémentaire au cohérentisme de Duhem. Rien ne nous permet de distinguer de façon stricte un énoncé d'observation d'un énoncé théorique, ni même un énoncé analytique d'un énoncé synthétique : tout terme scientifique est chargé de théorie, et ce n'est que l'ensemble de termes théoriques qui, de toute façon, pourrait être confronté aux termes observationnels, pris également dans leur ensemble. Par cette thèse Quine rompt définitivement avec l'empirisme logique.

Plus généralement, « conventionnalisme » est parfois devenu équivalent de « anti-réalisme », au sens où rien ne nous permet d'inférer de la science ce qui existe dans le monde extérieur – c'est ainsi qu'Edgington est classé parmi les conventionnalistes (en particulier par Popper, qui cite également Hugo Dingler). On peut alors classer sous le label de « conventionnaliste » tout philosophe des sciences qui pense que l'édifice des lois scientifiques nous en apprend plus sur l'esprit humain que sur la nature. De toute façon, le conventionnalisme est une critique de l'idée de « loi de la nature » : les relations entre l'un et l'autre ne vont plus tout à fait de soi, si bien que paradoxalement les lois scientifiques s'appliquent d'autant mieux à la « nature » qu'elles sont librement construites, parce que la « correspondance » entre la science et la nature va de soi dans la mesure où le concept de « nature » est forgé par les mêmes moyens. Par cet aspect, le conventionnalisme a souvent été rapproché du pragmatisme ou de l'utilitarisme – autre formulation du « langage commode » de Milhaud et de Poincaré. Lorsque Neurath, dans plusieurs de ses écrits, fait la géographie internationale des progrès de l'anti-métaphysique et de l'empirisme, il cite souvent Poincaré et les pragmatistes, parmi ceux qui ne sont pas nécessairement tenants de l'« empirisme logique » au

sens strict. Par tous ces traits, le conventionnalisme a eu aussi la réputation de postuler l'équivalence de théories rivales (c'est même la définition qu'en donne le *Vocabulaire* de Lalande) – si bien que certains épistémologues qui se disent nominalistes se refusent d'être conventionnalistes – tel Bas van Fraassen.

Le conventionnalisme a été souvent l'aune à laquelle se sont élaborées les philosophies des sciences empiriques. Karl Popper convient qu'aucun argument technique ne peut être opposé aux conventionnalistes, seul un choix fondamental peut permettre la critique de cette doctrine, justement l'importance de la signification de l'empirisme des sciences empiriques. Les conventionnalistes usent d'un « stratagème » pour mettre les lois hors d'atteinte de l'expérience, celui de faire d'un concept identifiable dans le corps de la science deux concepts, dont l'un reçoit un nouveau nom. Mais n'est-ce pas toujours ainsi que l'on découvre de nouvelles entités ? La décision entre le conventionnalisme et la pratique de la recherche scientifique n'est pas praticable sans justement admettre un certain nombre de conventions sur la méthodologie de la science ou sa pratique sociale.

► COUTURAT L., « Sur le nominalisme de M. Le Roy », *RMM*, 8, p. 87-93. – DUHEM P., *La Théorie physique. Son objet, sa structure*, Paris, Chevalier & Rivière, 1906 ; rééd., Paris, Vrin, 1981. – FEIGL H. & SELLARS W. éd., *Readings in philosophical Analysis*, New York, Appleton-Century-Crofts, 1949 (contient en particulier Willard van Orman Quine, 1936 : « Truth by convention »). – GAGNEBIN S., *Essai sur les idées de M. Le Roy*, Lausanne, Imprimerie coopérative de la Concorde, 1912. – GERGONNE, *Essai sur la théorie des définitions*, 1819. – GIEDYMIN J., *Science and Convention : Essays on Henri Poincaré's philosophy of science and the conventionalist tradition*, Oxford, Pergamon Press, 1982. – HARDING S.G. éd., *Can Theories be refuted ? Essays on the Duhem-Quine Thesis*, Dordrecht/Boston, D. Reidel, 1976. – LAKATOS I., *Histoire et Méthodologie des sciences* (1978), trad. C. Malamoud & J.-F. Spitz, Paris, PUF, 1994. – LEROY É., « Science et Philosophie », *Revue de Métaphysique et de Morale*, 7 et 9, 1899, 1901 ; *La Pensée mathématique pure*, Paris, PUF, 1960. – MILHAUD G., « La science rationnelle », *Revue de Métaphysique et de Morale*, 4, 1896 ; *Essai sur les conditions et les limites de la certitude logique*, Paris, Alcan, 1894 ; *Le Rationnel*, Paris, Alcan, 1898. – NAGEL E., *The Logic of Measurement*, Columbia Univ. Press, 1934 (en particulier chap. 4) ; *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Londres, Routledge & Kegan, 1961. – NEURATH O., *Gesammelte philosophische und methodologische Schriften*, éd. R. Haller & H. Rutte, Vienne, Holder-Pichler-Tempsky, 2 vol., 1981. – POINCARÉ H., *La Science et l'Hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902 ; *La Valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905 ; *Science et Méthode*, Paris, Flammarion, 1908 ; *Dernières Pensées*, Paris, Flammarion, 1913. – POPPER K.R., *La Logique de la découverte scientifique* (1936), trad. N. Thyssen-Rutten & P. Devaux, Paris, Payot, 1973. – ZAHAR É., *Poincaré's philosophy : from conventionalism to phenomenology*, Chicago, Open Court, 2001.

Anne-Françoise SCHMID

→ Conjecture ; Corroboration ; Expérience cruciale ; Modèle ; Nominalisme antique ; Opérationnalisme ; Preuve ; Réalisme.

COPERNIC Nicolas, 1473-1543

Astronome et cosmologue polonais de langue latine, qui édifica le premier système construit à partir de l'hypothèse du mouvement de la Terre, il est l'initiateur du grand bouleversement théorique qui s'est poursuivi tout au long du XVII^e s. et qui trouve sa formulation dans le concept de Révolution copernicienne. Personnage « pluridimensionnel » qui a donné lieu à des appréciations contrastées, il s'est situé sur trois terrains : celui de la politique, dans une conjonction complexe de lutte entre la Pologne et les chevaliers Teutoniques ; celui de l'astronome, et celui de la tradition philosophique humaniste qui reste aristotélicienne et tente d'intégrer des critiques et des enseignements contradictoires.

Son premier ouvrage dans lequel il expose sa thèse est le *Bref exposé de Nicolas Copernic sur les hypothèses des mouvements célestes qu'il a constituées* (1511-1512). Ses arguments sont repris dans le livre I du *De revolutionibus orbium coelestium* comprenant six livres (1541). Le livre II porte sur les étoiles, le III sur les mouvements de la Terre, le IV sur la Lune, le V sur les mouvements des planètes en longitude, et le VI sur les mouvements en latitude des planètes. Le cas Copernic pose le problème des effets différés d'une théorie scientifique, de la nature de ses forces de conviction, et de sa structure propre. Les arguments de Copernic sont remarquables ; à la fois historiques et conceptuels ils renversent la construction cosmologique aristotélicienne, sur ses propres bases. Le mouvement de la Terre a eu comme conséquences essentielles une réhomogénéisation de l'Univers, fin des distinctions équivoques des cosmologies précédentes, la mise en évidence de principes de mouvement qui conduisent à la physique classique. La déconstruction de la phénoménologie géocentrique a pour corrélat la pensée d'un sujet hors de la nature qui se pense comme sujet libre.

► HUGONNARD-ROCHE H., ROSEN E. & VERDET J.P., *Introduction à l'astronomie de Copernic*, Paris, A. Blanchard, 1975. – KOYRÉ A., *La révolution astronomique*, Paris, Hermann, 1961. – SZCZECINIARZ J.-J., *Copernic et la révolution copernicienne*, Paris, Flammarion, 1998.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Géocentrisme ; Héliocentrisme ; Révolution scientifique.

CORPS NOIR

Il n'est guère d'exemple plus clair de problème, apparemment anodin et sans application économique, dont la solution ait conduit à des bouleversements théoriques importants (en l'occurrence révolutionnaires) que celui dit du « rayonnement du corps noir », encore appelé en allemand « rayonnement noir », expression mystérieuse où le jour se mêle à la nuit, provocatrice d'associations mentales autorisant l'esprit à vagabonder du côté des

sorcières, de l'occultisme, de l'œuvre au noir... Newton en filigrane.

Chacun sait que la couleur d'un corps chauffé dépend de sa température. On dit couramment « un fer porté au rouge » signifiant par là que sa température est élevée, moins élevée cependant que celle d'une tige « chauffée à blanc » : de façon plus exacte, les ouvriers de la métallurgie sont capables de déterminer la température d'une coulée de fusion « à l'œil », c'est-à-dire uniquement d'après la couleur du bain fondu. On désigne du nom de « rayonnement du corps noir » la distribution en fréquences de la lumière émise par un corps porté à une certaine température et maintenu en « équilibre thermique » à température. À noter que l'on exclut de la distribution considérée le spectre de raies correspondant à l'émission de lumière par le corps considéré à des fréquences bien précises qui lui sont propres. Le rayonnement du corps noir a au contraire une distribution spectrale continue, répartie sur toute la gamme des fréquences électromagnétiques (rappelons que ce que nous appelons habituellement lumière et qu'il vaudrait mieux nommer lumière visible n'est qu'une onde électromagnétique parmi d'autres caractérisée par une fréquence comprise entre $0,4$ et $0,8 \times 10^{14}$ Hz). La couleur d'un corps chauffé correspond donc à une répartition continue du rayonnement émis sur l'échelle des fréquences, généralement concentrée pour l'essentiel dans un domaine correspondant à la couleur vue. Il est paradoxal d'avoir appelé « rayonnement noir » ce qui est précisément associé à une couleur. C'est que pour faire l'étude expérimentale de cette distribution il faut réaliser une situation dans laquelle on recueille toute l'énergie émise par le corps chauffé, ce qui n'est bien évidemment pas le cas lorsqu'on se contente de regarder un métal chauffé à l'air libre. On réalise les conditions expérimentales les meilleures en maintenant à température constante les parois d'un four hermétiquement clos, à l'exception toutefois d'un minuscule trou au travers duquel passe la lumière émise par les parois chauffées et dont on réalise l'analyse en fréquences.

On peut se demander quel intérêt il y a à analyser la lumière qui se trouve enfermée dans un four à température constante. Cet intérêt est purement spéculatif : en analysant le rayonnement émis par un corps chauffé, on avait, à la fin du XIX^e s., l'espoir d'établir un lien d'une part entre l'électromagnétisme développé par Maxwell, considéré comme la théorie de la lumière, mais où il n'est jamais question de température, et d'autre part la thermodynamique, étude des modifications liées à la chaleur et la température comme son nom l'indique plus ou moins. Ces deux théories avaient en effet été élaborées de façon indépendante, même si quelqu'un comme Maxwell a contribué tout autant à l'élucidation des bases microscopiques de la thermodynamique (théorie considérée comme macroscopique parce qu'elle traite de phénomènes observables à l'échelle humaine) qu'à l'électromagnétisme (qui d'ailleurs porte son nom).

Un problème préoccupait en particulier les

physiciens de la fin du siècle : celui de l'irréversibilité. Comment comprendre que des lois invariantes par renversement du temps (c'est-à-dire en « remontant » le temps, comme l'on dit, comme si le cours naturel du temps le portait vers le bas), telles que les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme, puissent donner lieu lorsqu'on les applique aux « atomes » dont sont constitués les corps (la théorie atomique était encore une hypothèse) et qu'on fait usage de méthodes statistiques pour passer du niveau microscopique au niveau macroscopique (24 ordres de grandeur au-dessus), comment comprendre donc que ces lois puissent donner naissance à des phénomènes indubitablement irréversibles — déterminant donc une direction d'écoulement du temps (la « flèche » du temps), ce dont nous faisons tous les jours l'expérience ? Telle était l'une des motivations principales de Max Planck quand il entreprit à la fin des années 1890 l'étude théorique du corps noir : Planck espérait pouvoir déduire le second principe de la thermodynamique, qui précisément établit qu'il existe une flèche du temps, à partir des lois de l'électromagnétisme. Plus précisément, il se proposait d'étudier l'interaction entre un ensemble d'oscillateurs « harmoniques » figurant les atomes des parois chauffées et le rayonnement qu'ils émettent et absorbent. Ces oscillateurs, composés d'une charge positive et d'une charge négative oscillant au voisinage de la charge positive, étaient en effet censés émettre du rayonnement, en vertu d'un des résultats fondamentaux de la théorie de Maxwell selon lequel toute particule chargée, pourvu qu'elle soit animée d'un mouvement accéléré, émet du rayonnement (rayonnement du dipôle). Étant donné que l'énoncé le plus théorique du second principe de la thermodynamique établit que l'état d'un système en équilibre thermique est caractérisé par une certaine fonction (dont on sait qu'elle mesure le « désordre » du système), appelée entropie, Planck chercha tout naturellement quelle forme mathématique de l'entropie pourrait redonner une distribution de l'énergie électromagnétique enfermée dans le corps noir qui corresponde aux résultats expérimentaux obtenus par ses collègues de l'université de Berlin. Il devina ainsi une forme mathématique étonnamment simple de l'entropie et il en déduisit une formule (dite formule de Planck) donnant la distribution d'énergie électromagnétique en fonction de la fréquence, formule admirablement conforme aux derniers résultats expérimentaux.

Évidemment Planck ne pouvait se satisfaire d'avoir « deviné » la forme de l'entropie. Il lui fallait trouver une raison physique pour que l'entropie ait cette forme-là et pas une autre. Se fondant sur ce qu'il croyait être la théorie combinatoire de Boltzmann qui lie l'entropie au nombre de combinaisons possibles permettant d'obtenir un certain état macroscopique du système, Planck constata, à son grand déplaisir, que, pour obtenir la forme d'entropie qu'il avait devinée et qui conduisait à une répartition spectrale de l'énergie conforme à l'expérience, il lui fallait supposer que l'énergie électromagnétique enfermée dans le corps

noir était divisée en ce qu'il appela des *quanta* (expression courante en allemand, désignant une quantité indivisible). Ce résultat l'embarrassa fort car l'énergie, concept dont la gestation fut longue et difficile, n'avait jamais été pensée autrement que comme continue ; c'était une fonction définie sur des espaces continus, prenant elle-même ses valeurs dans un ensemble continu. Autrement dit, loin de trouver un argument physique permettant d'expliquer la forme devinée pour l'entropie, Planck se voyait contraint (les calculs étaient imparables) à accomplir un acte sacrilège : l'origine physique de sa formule, par ailleurs si conforme à l'expérience, ne pouvait être que la quantification de l'énergie, en contradiction avec le dogme de sa continuité. On conçoit que ce soit en « un acte de désespoir » qu'il se résolut à cette conclusion. Planck était d'ailleurs persuadé que la quantification de l'énergie à laquelle il avait abouti n'était qu'un artefact de la méthode combinatoire de Boltzmann et n'avait donc aucune réalité physique.

De fait, Planck avait cru appliquer correctement la théorie de Boltzmann : ce n'était pas le cas : il avait raisonné de façon trop formelle et, en particulier, il n'avait pas défini avec suffisamment de soin la probabilité qui intervient dans la théorie de Boltzmann. Pour faire comprendre en quoi consistait l'illusion de Planck, il convient de rappeler que la mécanique statistique, fondée par Boltzmann, est une théorie qui entend expliquer les phénomènes macroscopiques (et les lois macroscopiques) à partir de la constitution atomique de la matière. Les « atomes » (appelés molécules à l'époque) sont considérés comme des particules de la physique classique, c'est-à-dire qu'ils sont soumis aux lois du mouvement énoncées par Newton. Connaissant les forces agissant sur chaque atome, on est en principe en mesure de déterminer la trajectoire de celui-ci. Évidemment ce calcul ne peut être fait pour tous les atomes (dont le nombre, rappelons-le, est de l'ordre de 10^{24} dans le moindre gramme de matière), et n'a d'ailleurs aucun intérêt puisque, de toute façon, les grandeurs que l'on mesure et observe sont en très petit nombre (pression, volume, température, charge électrique, aimantation, etc.). Se pose alors le problème de la description du système considéré puisque sa description macroscopique est insuffisante et sa description microscopique exacte impossible. On a alors recours aux probabilités, comme il est de règle en physique chaque fois qu'on a une connaissance partielle, imparfaite de ce dont on veut parler. L'introduction des probabilités est justifiée par l'énormité du nombre 10^{24} . On est alors amené à considérer que l'état macroscopique du système (c'est-à-dire l'état défini par les valeurs que prennent un certain nombre de grandeurs observables, macroscopiques), qui ne peut être identifié de façon certaine à telle configuration (ou état) microscopique, est caractérisé par l'ensemble des probabilités qu'a cet état macroscopique de coïncider avec chacun des états microscopiques possibles du système, compte tenu des conditions expérimentales, c'est-à-dire finalement des contraintes imposées par les valeurs des grandeurs

macroscopiques (température, volume...) auxquelles le système se trouve soumis et qui figure dans sa description macroscopique.

Ce que l'on appelle généralement la méthode combinatoire (ou des complexions) de Boltzmann désigne une manière de calculer ces probabilités par la considération des diverses configurations possibles au niveau microscopique. On conçoit que dans certains cas il suffise de compter le nombre de façons d'arranger les constituants entre eux, compte tenu des contraintes expérimentales, pour pouvoir calculer, grâce à l'analyse combinatoire, la probabilité relative d'un certain état macroscopique par rapport à un autre et en déduire la différence d'entropie pour ces deux états de coïncider avec tel ou tel état microscopique. On imagine assez bien que ce type de méthode puisse porter à oublier le contenu physique de ce que l'on calcule.

C'est ce qu'Einstein, alors âgé de 22 ans, reprochait, dès 1902, à la méthode combinatoire de Boltzmann : elle faisait intervenir de fausses probabilités sans signification physique, de nature purement combinatoire, alors qu'une véritable théorie physique doit être capable de donner une signification physique à chacun des termes dont elle se sert, surtout lorsque l'usage qu'elle en fait est mathématique. Aussi avait-il entrepris une réélaboration de la théorie de Boltzmann dans laquelle l'entropie est liée (par la même relation formelle que celle donnée par Boltzmann) à une véritable probabilité statistique (et à une combinaison abstraite). En 1905, *annus mirabilis* selon l'expression convenue, Einstein publia un article dans lequel il ne fait aucunement référence au calcul de Planck et ne garde que la fameuse formule validée par les résultats expérimentaux. Il entreprend alors, sur la base de cette formule, de calculer la variation d'entropie correspondant au rassemblement, à un moment donné, de toute l'énergie du four dans un volume partiel (fictif) de celui-ci. Assuré que l'entropie est liée à une véritable probabilité, Einstein inversa la relation de Boltzmann qui donne l'entropie en fonction de la probabilité afin d'obtenir la probabilité en fonction de l'entropie. Il est alors facile de constater que cette probabilité est la même que celle qu'aurait un ensemble de molécules enfermées dans un volume de se rassembler, sous l'effet des fluctuations, dans une partie (fictive) du volume. De là à penser que le rayonnement électromagnétique est constitué de grains, d'atomes — de quanta d'énergie comme dit Einstein, qui prend garde à ne pas utiliser tout à fait les mêmes expressions que Planck, persuadé qu'il est que le calcul de Planck est uniquement formel, impossible à interpréter en termes physiques —, il n'y a qu'un pas qu'Einstein franchit prudemment : « On est conduit à se demander si les lois de la production et de la transformation de la lumière n'ont pas la même structure que si la lumière était constituée de quanta d'énergie. » (« Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière », *Annalen der Physik*, 1905.)

Ici s'achève l'histoire du « rayonnement noir » dont est sortie la mécanique quantique. En effet, Einstein,

après avoir montré que la lumière était constituée de grains d'énergie (appelés photons depuis 1922), ne s'arrêta pas en si bon chemin : deux ans plus tard, il démontrait que l'énergie de la matière est elle aussi quantifiée. Reprenant ces idées en 1913, Bohr introduisit le premier modèle contre-intuitif de l'atome ; la mécanique quantique allait naître officiellement en 1927. Comme on sait, Einstein n'en fut jamais satisfait... mais c'est une autre histoire.

L'histoire du corps noir porte en elle-même plusieurs enseignements épistémologiques. Nous n'en retiendrons qu'un : on voit comment une recherche qui avait pour but d'expliquer l'irréversibilité du monde macroscopique sur la base de la constitution atomique de la matière dont les éléments sont soumis à des lois réversibles dans le temps a abouti ailleurs que là où son auteur voulait aboutir. Si l'étude du rayonnement noir n'a pas permis de résoudre le paradoxe de l'irréversibilité, en revanche elle a mis au jour la structure quantique du monde microscopique. Une question s'impose : existe-t-il un lien entre cette structure quantique et le caractère irréversible du monde macroscopique ? La réponse n'est pas évidente. En effet, les lois de la mécanique classique (réversibles dans le temps) sont extrêmement sensibles à d'infimes modifications des conditions expérimentales. En sorte que la marche vers le désordre qui donne le sens de la flèche du temps se produit quelle que soit la manière (classique ou quantique) dont on représente le comportement des objets microscopiques.

Ajoutons, pour terminer, qu'Einstein a eu de la chance. Il se trouve que lorsqu'on tient compte de la nature non classique (c'est-à-dire proprement quantique) des quanta de lumière, la statistique à laquelle ils obéissent n'est pas celle sur laquelle s'est fondé Einstein pour établir la probabilité pour que l'énergie lumineuse se trouve rassemblée dans une partie du volume total. Les deux statistiques ne sont équivalentes que dans des conditions bien particulières (faible densité d'énergie, ou de photons, ce qui revient au même). Il se trouve, et c'est un hasard heureux, qu'Einstein (qui devait lui-même découvrir l'existence de statistiques proprement quantiques, en 1924) en 1905 a effectué sa démonstration précisément dans ces conditions, en sorte que le résultat auquel il aboutit est celui que l'on trouve à la limite lorsqu'on tient complètement compte de la quantification.

» BRUSH S.G., *Statistical Physics and the Atomic Theory of Matter*, Princeton Univ. Press, 1983. — DARRIGOL O., « Statistics and Combinatorics in early quantum theory », *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 19, 1988. — DUGAS R., « Einstein et Gibbs devant la thermodynamique statistique », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, n° 241, 1955. — EINSTEIN A., *Œuvres choisies en français*, vol. 1, particulièrement « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière », mars 1905, Paris, Le Seuil/CNRS, 1989. — KUHN T.S., *Blackbody Theory and the Quantum Discontinuity, 1884-1912*, Oxford Clarendon Press, 1978 (éd. revue et augm., Chicago, Univ. of Chicago Press, 1987). — PLANCK M., « Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum », *Verhandlungen der*

Deutschen physikalischen Gesellschaft, vol. 2, 1900 (trad. angl. in TER HAAR D., *The Old Quantum Theory*, Oxford, Pergamon Press, 1967).

Françoise BALIBAR

→ Chaleur ; Entropie ; Irréversibilité ; Planck ; Quantique ; Temps.

CORPUSCULE

PHYSIQUE

Question 19 de l'*Optique* de Newton : « Are not the Rays of Light very small Bodies emitted from shining Substances ? » Ce que Marat (celui-là même que Charlotte Corday assassina dans sa baignoire) traduit : « Les rayons de la lumière ne sont-ils pas formés de très petits corpuscules lancés par les corps lumineux ? » Traduction généralement adoptée qui risque de masquer en partie un fait essentiel de l'histoire de la physique, à savoir qu'à l'époque de Newton il allait de soi que la lumière et la matière sont de même nature.

C'est, en effet, ce que Newton affirme en utilisant le même mot (« Body », avec une majuscule selon la coutume de l'époque) pour parler à la fois de la matière (il écrit parfois « gross Bodies » pour préciser) et de la lumière, formée de « small Bodies ». Certes « corpuscules » est en soi une traduction naturelle et élégante, tirant parti des possibilités que le français tient du latin ; mais dans « corpuscule » la racine « corps » est, sinon cachée, du moins altérée par un suffixe — d'autant plus que Marat dote ces corpuscules d'une très petite taille, comme si le suffixe n'indiquait pas déjà qu'il s'agit de petits corps, et donc comme si les corpuscules n'étaient pas des corps, de la même espèce (à la taille près) que ceux dont est faite la matière. En sorte que l'on pourrait croire (et on verra qu'il ne s'agit pas là d'une hypothèse d'école) que Newton — en violation de son credo rappelé un peu plus loin : « La Nature est conforme à elle-même » — établit une distinction de nature entre lumière et matière. Et ce d'autant plus que Marat traduit « Substances » par le même mot « corps » — cette fois-ci en flagrant contradiction avec ce que nous considérons aujourd'hui comme les règles élémentaires de la traduction.

À vrai dire, il ne s'agit pas là d'un simple pinaillage byzantin et pédant. Ou du moins, il ne s'agirait que de cela si la physique ultérieure, celle développée en particulier au XIX^e s., ne nous avait pas appris à considérer que la lumière et la matière sont de nature radicalement différente : l'une, la matière, étant justement de nature corpusculaire (relevant du discontinu, du dénombrable et du localisé — en sorte que deux corpuscules ne peuvent occuper un même point de l'espace) et l'autre, la lumière, de nature ondulatoire, totalement antithétique de la précédente (relevant du continu, de l'étendue sans limite spatiale, de la faculté de superposition en un même point).

Pour se faire une idée de la force d'imprégnation de cette conception on se souviendra qu'avant 1905 la

question se posait de savoir si la lumière obéissait ou non à des lois différentes de celles qui régissent la matière ; on en était même venu à concevoir que la lumière puisse ne pas être contrainte par l'exigence de relativité, principe fondateur de la théorie de la matière. C'est en affirmant que la lumière et la matière, autrement dit toute la nature, doivent être soumises au principe de relativité — dût-on pour cela modifier notre conception du temps — qu'Einstein résoudra l'apparente contradiction dans laquelle se trouvait la physique à la fin du XIX^e s.

On mesurera également à quel point l'idée que les constituants de la lumière et de la matière puissent ne pas être en tout point opposés est ancrée en nous à l'étonnement qui saisit un lecteur élevé dans la tradition de la fameuse dualité onde-corpuscule lorsqu'il lit cette phrase de Feynman, volontairement provocatrice mais terriblement juste : « La lumière est faite de particules » (*QED, The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton Univ. Press, 1985). Feynman, on l'aura remarqué, ne dit pas, comme on le lit souvent, que la lumière est dans certaines conditions de nature ondulatoire et dans d'autres de nature corpusculaire ; il affirme avec force : la lumière est faite de particules ; un point, c'est tout. Cet énoncé est radicalement opposé à la théorie classique du rayonnement, d'où nous tirons, encore aujourd'hui, près de cent ans après sa remise en cause, notre conception « naturelle » de la lumière. L'ambition de la physique classique (qui, dans ce contexte, doit être entendue comme celle d'avant 1905) est d'expliquer le monde par le jeu des interactions entre les particules (ou corpuscules, les deux mots sont synonymes) et les champs (dont la propagation est de nature ondulatoire), les particules étant à la fois la source des champs du fait de leur mouvement et ce sur quoi ils agissent et qu'ils mettent en mouvement. Il est clair que l'énoncé de Feynman — la lumière (considérée comme un champ jusqu'en 1905) est faite de particules — ne peut trouver sa place à l'intérieur de ce cadre conceptuel.

C'est Einstein qui en 1905 a porté le premier coup théorique à cette conception (déjà mise en difficulté par des résultats expérimentaux). Plutôt que de s'émouvoir sur le prétendu « génie » d'Einstein, « inventeur » à l'âge de 26 ans de la théorie de la relativité et de la quantification du rayonnement, il vaut mieux constater qu'il n'y a rien d'étonnant à ce que ce soit le même individu et quasiment au même moment qui ait à la fois affirmé, renouant ainsi avec la conception unitaire de la nature dont Newton avait été le porte-parole deux siècles auparavant, que la lumière et la matière doivent être soumises aux mêmes principes (dont dérivent les lois relatives à l'une et à l'autre) et que la matière et la lumière sont de même nature, en l'occurrence corpusculaire. Il faut remarquer, ne serait-ce que pour résister à la vulgate qui fait d'Einstein un original météorique (il fut suffisamment iconoclaste pour qu'il ne soit pas nécessaire d'en rajouter), qu'avant 1905 certaines tentatives avaient été faites en vue d'unifier

la lumière et la matière en les considérant comme faites toutes deux de champs ; c'est ce qu'on a, plus tard, appelé le tout électromagnétique.

Einstein, donc, a montré en 1905 que certains aspects de l'interaction matière/rayonnement, en particulier ceux qui sont liés à la production et à l'absorption de lumière, manifestent, d'une façon qu'on ne peut ignorer, le caractère corpusculaire de la lumière. Il ajoute que la nature ondulatoire de la lumière n'est pas, et ne sera probablement jamais, remise en cause, mais qu'il faut désormais tenter de penser l'union des contraires puisque aussi bien la lumière manifeste des aspects totalement contradictoires. L'embaras joyeux (joyeux parce que fournissant un point de vue heuristique, et donc indice d'une piste à suivre) dans lequel se trouve Einstein à l'époque est à mettre en rapport avec les questions que Newton pose à la fin de son *Optique*. Qu'on ne s'y trompe pas : la forme interrogative négative dans laquelle Newton formule ses idées n'exprime pas un doute mais bien une solide conviction ; cette forme est une particularité nationale que le fameux « Nice weather to-day isn't it ? » a rendue célèbre ; or une telle phrase ne peut être prononcée que s'il fait incontestablement beau. En dépit de la force de ses convictions quant à la nature corpusculaire à la fois de la matière et de la lumière, Newton ne peut qu'être perplexe devant certaines manifestations de la lumière produisant des franges colorées qui ne se prêtent apparemment pas à une explication corpusculaire. Le simple fait que la lumière arrivant sur une surface plane (par exemple, la surface d'un lac) soit en partie réfléchi par la surface et en partie transmise à travers elle est un problème, qui sera par la suite résolu dans le cadre de ce que nous appelons maintenant la théorie ondulatoire de la lumière, que Newton tente d'élucider en supposant que les corpuscules de lumière sont doués d'« accès » de « facile transmission » et « de facile réflexion ». Hypothèse *ad hoc* que rien ne justifie sinon qu'elle permet d'expliquer ce qui sans elle resterait incompréhensible. Einstein et ses contemporains se sont trouvés confrontés après 1905 au même type de problèmes, particulièrement après que de Broglie eut montré que la matière devait, elle aussi, présenter une double nature, corpusculaire (comme on l'avait toujours pensé) et ondulatoire (ce qu'un raisonnement relativiste imparable obligeait à reconnaître).

À cette confusion des genres on a donné en France, à la suite de De Broglie, le nom de « dualité onde/corpuscule », formulation qui pendant longtemps a empêché que soit reconnue la véritable nature de la lumière et de la matière, à savoir des particules qui des caractéristiques des particules de la physique classique ne retiennent que celle d'être dénombrables. Mis à part le fait qu'on puisse les compter, ces particules se comportent d'une façon totalement absurde du point de vue classique. En particulier, elles ne sont pas localisées et occupent toute une région de l'espace. En sorte qu'un électron a un comportement totalement surréaliste : il passe par deux trous à la fois, à la manière d'une onde,

comme le constate P.M. Dirac dans son célèbre manuel. Symétriquement la lumière que l'on pensait être une onde est émise par les atomes comme si ceux-ci crachaient des corpuscules – conformément à l'assertion de la question 29 de Newton qui nous a servi de point de départ.

Le point important ici est que, comme l'avait pensé Newton, lumière et matière sont faites du même type d'objets, des objets dont le comportement a de quoi rendre fou un physicien classique (tel Einstein regardant par la fenêtre de son bureau à Prague les pensionnaires de l'hôpital psychiatrique voisin et se demandant si leurs pensées n'étaient pas moins confuses que les siennes). Obligés de penser l'union dans un même corps de caractéristiques contradictoires, les physiciens se sont trouvés placés dans une situation difficilement supportable. La résolution de la tension n'est venue que lorsqu'on réussit à admettre que la distinction corpuscule/onde (ou encore discontinu/continu) n'avait plus cours dans le domaine microscopique, baptisé quantique. Dans ce domaine n'existe qu'un seul type d'objets élémentaires, ni ondes ni corpuscules, d'une nature radicalement différente, mais unique : des quantons ou objets quantiques. « Les objets quantiques sont dingues, mais au moins le sont-ils tous de la même façon », écrit Feynman (*The Character of Physical Law*, Cambridge, MIT Press, 1965 ; trad. fr., *La nature de la physique*, Paris, Le Seuil, 1980).

La confusion mentale suscitée par la découverte du caractère ondulatoire de la matière et du caractère corpusculaire de la lumière disparaît dès lors qu'on admet cette idée ; on s'aperçoit alors que cette confusion n'est que l'effet d'une conviction antérieure (la division du monde en deux catégories d'objets de natures incompatibles), conviction que l'on avait adoptée sans la questionner parce qu'elle avait pris la forme d'une évidence qui, comme toutes les évidences de ce type, ne donnait pas lieu à une formulation explicite (sous forme de loi de la nature par exemple). Sans chercher à filer trop loin la métaphore psychiatrique, on peut dire que la résolution de la tension est venue, comme le souhaitait Bohr qui en avait fait une stratégie, d'un approfondissement des contradictions. Cela étant, il serait erroné de parler de retour à la conception newtonienne : les petits (ou gros) corps de Newton n'ont en commun avec les quantons que d'être dénombrables ; pour le reste ils en diffèrent profondément.

Qu'en est-il du mot « corpuscule » aujourd'hui ? Il a pratiquement disparu du langage des physiciens, qui lui ont substitué (Dieu sait pourquoi) celui de « particule », assorti de cette convention tacite qu'il ne s'agit pas d'un objet localisé mais d'une catégorie d'objets dénombrables dont le comportement est réglé par ce qu'on appelle (et ce n'est pas un hasard) une « fonction d'onde ». Le corpuscule est mort ; vive les particules.

► BOHR N., *Physique atomique et connaissance humaine*, trad. E. Bauer & R. Ornès, prés. et glossaire C. Chevalley,

Paris, Gallimard, 1991. – BROGLIE L. DE, « Le dualisme des ondes et des corpuscules dans l'œuvre d'Einstein », 1955 (lecture à l'Académie des Sciences de Paris), in LOCHAK G., *Louis de Broglie, un itinéraire scientifique*, Paris, La Découverte, 1987 ; *La physique nouvelle et les quanta*, Paris, Flammarion, 1986. – EINSTEIN A., *Œuvres Choisies en Français*, Paris, Le Seuil/CNRS, 1986-1993, t. 1, *Quanta*. – FEYNMAN R.P., *The Character of Physical Law*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1965 (trad. fr. F. Balibar, H. Isaac & J.-M. Lévy-Leblond, *La nature de la physique*, Paris, Le Seuil, 1980) ; *QED, The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton Univ. Press, 1985 (trad. fr. F. Balibar & A. Laverne, *Lumière et matière, une étrange histoire*, Paris, InterÉditions/Le Seuil, 1987). – LEVY-LEBLOND J.-M., *Aux contraires*, Paris, Gallimard, 1996. – LEVY-LEBLOND J.-M. & BALIBAR F., *Quantique*, InterÉditions/CNRS, 1984. – NEWTON I., *Opticks*, 1704, New York, Dover, 1952 (trad. fr. J.-P. Marat, *Optique*, 1787, Paris, C. Bourgeois, 1989). – WESTFALL R., *Never at Rest, A Biography of Isaac Newton*, Cambridge Univ. Press, 1980.

Françoise BALIBAR

→ Complémentarité ; Électron ; Lumière ; Matière [PHYSIQUE] ; Quantique.

CORRESPONDANCE (Principe de)

PHYSIQUE

Le principe de correspondance concerne les rapports entre théories quantique et classique. Dans les traités modernes de mécanique quantique, il a deux significations distinctes : 1) Les prédictions de la mécanique classique doivent pouvoir être obtenues dans une approximation de la mécanique quantique. 2) Il existe des règles formelles précises qui permettent de « quantifier » les théories classiques, c'est-à-dire de transformer les variables classiques en opérateurs.

Une troisième acception du principe de correspondance se trouve dans la théorie quantique qui précède la mécanique quantique. Les atomes étaient alors représentés par le mouvement d'électrons ponctuels autour d'un noyau central. Ils ne pouvaient exister que dans une série discrète d'états « stationnaires », et ne pouvaient interagir avec d'autres systèmes (rayonnement électromagnétique ou corpuscules) que par des transitions soudaines entre deux de ces états. Dans cette théorie et pour un seul degré de liberté, le principe de correspondance s'énonce ainsi : 3) À l'harmonique p du mouvement périodique du système dans l'état stationnaire n correspond la transition de l'état n à l'état $n - p$. Ce principe a joué un rôle extrêmement important dans la construction de la théorie quantique de Bohr et de ses disciples.

Pour les très grands nombres quantiques (pour lesquels les états stationnaires sont de plus en plus « serrés ») Bohr nota dès 1913 la correspondance entre harmoniques et sauts. Celle-ci résulte de la comparaison du spectre prédit par l'électrodynamique classique et de celui donné par la règle de fréquence de Bohr (la fréquence d'une raie spectrale s'obtient en divisant par la constante de Planck la différence entre

les énergies des états stationnaires initial et final). La correspondance jouait ici un rôle passif, elle n'intervenait guère dans la construction de la théorie.

Bohr ne savait alors déterminer les états stationnaires que pour des systèmes mécaniques strictement périodiques. En 1916 Arnold Sommerfeld parvint à quantifier une classe plus générale de systèmes (dits multipériodiques), comprenant par exemple les corrections relativistes à l'atome d'hydrogène de Bohr. Cependant, pour éviter une surabondance de raies spectrales, il dut soumettre les sauts quantiques à des règles *ad hoc* de « sélection ». Bohr fit alors une remarque essentielle : ces règles pouvaient être déduites d'une extension de la « correspondance » notée en 1913 à des nombres quantiques modérés ; un saut quantique n'était permis que si l'harmonique correspondante du mouvement orbital existait. Il admit aussi que la probabilité des sauts permis (donnant l'intensité de la raie correspondante) était approximativement proportionnelle à l'intensité de l'harmonique correspondante. Ainsi se trouvait transposée la relation classique entre spectre du rayonnement et spectre du mouvement. Dès 1918, cette analogie formelle donna à Bohr l'espoir de construire une théorie quantique qui serait « une généralisation rationnelle » de la théorie classique.

En somme, le principe de correspondance de Bohr ne concernait pas seulement l'accord asymptotique entre théories classique et quantique. Bien plutôt, il exprimait une relation formelle entre mouvement intratomique et spectre du rayonnement. Cette relation complétait en partie la théorie atomique, sans toucher au délicat problème du mécanisme d'interaction entre atomes et rayonnement. Bohr et son assistant Hendrik Kramers s'en servirent de deux manières différentes. Quand le mouvement atomique était *a priori* calculable, le principe permettait de déduire des propriétés du spectre ; quand au contraire les règles de quantification connues étaient impuissantes à déterminer le mouvement atomique, le principe permettait d'induire des caractéristiques de ce mouvement à partir du spectre expérimental. En combinant ces deux usages, en 1921, Bohr parvint à construire les atomes sur la base des nombres quantiques n et k (principal et azimutal) de leurs électrons constitutifs. Il prétendait même pouvoir déduire la longueur des périodes chimiques.

Cette classification des atomes ressemble beaucoup à celle que donne aujourd'hui la mécanique quantique. Cependant, Bohr ne put maintenir longtemps son explication de la clôture des périodes chimiques. En 1922, les calculs effectués à Göttingen par Born, Heisenberg et Pauli prouvèrent que la théorie de Bohr échouait à expliquer l'atome d'hélium et donc la première période chimique. Il fallait en conclure que la discontinuité quantique affectait non seulement l'interaction entre atome et rayonnement mais aussi celle entre les électrons d'un même atome.

Bohr et Kramers se tournèrent donc vers le problème du rayonnement. En 1924, sur une idée de John Slater, ils postulèrent que l'activité radiative des atomes avait lieu lors de leurs séjours dans les états stationnaires, et

non plus lors des sauts quantiques. Cette « théorie BKS » s'harmonisait bien avec le principe de correspondance, puisque celui-ci reliait les propriétés du rayonnement à celles du mouvement dans les états stationnaires. Elle rendait compte aussi bien des propriétés classiques de la lumière que de l'effet Compton. Néanmoins, Bohr dut abandonner cette voie au printemps de 1925, ne serait-ce que parce que les corrélations Compton observées par Bothe et Geiger la contredisaient. Il se rendit alors au jugement de Wolfgang Pauli, qui excluait toute représentation spatio-temporelle des processus atomiques.

Sans l'image orbitale des états stationnaires, on pourrait penser que le principe de correspondance devient caduc. Tel ne fut pas le cas. Un peu avant la théorie BKS, Kramers avait montré (sur l'exemple d'une théorie de la dispersion) comment transformer en relations quantiques des relations classiques entre intensités des harmoniques du mouvement. Il suffisait de substituer à ces intensités les probabilités de transition qui leur correspondaient suivant la relation (3). Les relations ainsi obtenues ne faisaient plus intervenir le concept d'orbite, elles s'exprimaient entièrement en termes des concepts mieux établis d'état stationnaire et de fréquence spectrale. Le procédé de Kramers de traduction symbolique survécut donc à l'échec de la théorie BKS. Au début de l'été 1925 Heisenberg eut l'idée de l'étendre aux équations de la mécanique. Celles-ci pouvaient en effet s'exprimer en fonction des composantes de Fourier du mouvement, auxquelles correspondaient des « amplitudes quantiques » par la relation (3). Il obtint ainsi un système complet et cohérent d'équations reliant les amplitudes quantiques et les fréquences de Bohr. De par sa construction, ce système devait redonner les relations classiques à la limite des grands nombres quantiques. De surcroît, Heisenberg démontra sur des exemples simples que le nouveau système reproduisait des résultats valides de l'ancienne théorie quantique. Il se convainquit ainsi d'avoir découvert une nouvelle mécanique quantique.

En bref, le principe de correspondance a joué un rôle central dans la construction de la théorie quantique. Il permit d'abord d'étendre l'exploitation de l'image orbitale de l'atome jusqu'à la crise de 1925. Puis il suggéra une traduction symbolique des équations du mouvement orbital et conduisit ainsi à la mécanique quantique. Ses avatars modernes (1) et (2) marquent la référence persistante aux théories classiques dans la formulation usuelle de la mécanique quantique.

► DARRIGOL O., *From c-numbers to q-numbers : The classical analogy in the history of quantum theory*, Berkeley, 1992. – JAMMER M., *The conceptual development of quantum mechanics*, New York, 1966. – STOLZENBURG K., « Introduction à Niels Bohr », *Collected works*, éd. L. Rosenfeld & E. Rüdinger, vol. 5, 1985, 1-96.

Olivier DARRIGOL

→ Controverse Bohr-Einstein ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Quantique.

CORROBORATION

Après avoir employé en 1934 le terme de « (degré de) confirmation » (*Bewährungsgrad*), Popper préféra par la suite utiliser le terme plus neutre de « corroboration ». La corroboration n'est pas autre chose que la non-infirmité, comme aurait dit Épicure. Elle n'est qu'une tentative de réfutation qui échoue. « Ne cherchez pas à confirmer vos théories, mais à les mettre à l'épreuve, quitte à tirer satisfaction de l'échec de vos tentatives les plus rigoureuses pour ce faire ! » De même que tester un instrument revient à le soumettre à des épreuves sévères avant de l'utiliser en confiance, il convient de maximiser notre examen des éventuels points faibles de la théorie avant que de la déclarer « corroborée », ce qui ne veut pas dire « vérifiée » : des théories bien corroborées dans le passé ont été réfutées dans leurs prétentions à l'universalité. Être corroborée, pour une théorie, c'est avoir résisté brillamment aux tentatives les plus astucieuses que l'on a pu imaginer pour la mettre en difficulté. La corroboration « mesure » la résistivité aux tests. C'est la raison pour laquelle une théorie non réfutable empiriquement ne peut pas prétendre avoir été réellement confirmée par l'expérience.

L'infirmité est le prix à payer de la confirmabilité. Plus une théorie est réfutable, et donc *a priori* improbable, plus elle est corroborable. Dans le débat entre poppériens et inductivistes, la question est de savoir si le degré de corroboration d'une hypothèse est mesurable par une probabilité, comme le pensent les seconds. La thèse centrale de Popper est que ce degré ne saurait être mesuré par une probabilité, par exemple la probabilité de l'hypothèse étant donné les résultats de l'expérience ($p(h/e)$). Avec David Miller, il a démontré que le contenu de l'hypothèse qui excède celui des données (égal à $(h \setminus v \text{ non-} e)$), formule qui concentre tout ce qui dans h n'est pas déductible de e) ne voit pas sa probabilité augmenter sous l'effet de la vérification des données e . Le seul effet probabiliste en jeu est dû à celui de la vérification des conséquences déductives de l'hypothèse sur celle-ci : rien de ce qui transcende les données ne voit sa probabilité augmenter du fait de l'acceptation de ces mêmes données (ce qui n'est selon Popper et Miller qu'une reformulation de la thèse de Hume : l'inconnu est indépendant du connu). Les bayésiens considèrent ce résultat comme un paradoxe (la probabilité du contenu transcendant se révèle baisser en présence des données !) provenant d'une mauvaise analyse de la notion de « contenu transcendant » (*excess content*). Selon eux, les données peuvent augmenter la probabilité d'une hypothèse en sus de la partie de cette hypothèse constituée de leurs propres conséquences déductives. Il leur faut convenir qu'il leur est impossible d'analyser ce « contenu transcendant » comme un véritable contenu, c'est-à-dire comme un ensemble de propositions clos par déduction.

Popper avait insisté sur le fait que ne corrobore que ce dont l'absence aurait pu infirmer l'hypothèse. Mais

il ajouta que la corroboration n'intervenait que si l'événement prédit était auparavant inconnu. Plus l'occurrence d'un événement est improbable selon l'état des connaissances avant la formulation de la théorie et plus elle est probable étant donné cet état modifié par l'adjonction de cette théorie, plus l'événement constitue une corroboration potentielle de la théorie. La tache de Poisson était très improbable avant la formulation de la théorie ondulatoire de Fresnel, et très probable étant donné cette théorie : son observation en constitua une forte corroboration, comme l'avait montré Duhem. D'où l'importance des prédictions nouvelles. Un test est d'autant plus « probant » qu'il est « sévère ». Élie Zahar a argué que cette condition était suffisante mais trop forte : un événement « connu » peut confirmer une théorie, s'il n'a pas été objectivement utilisé dans sa construction. Les physiciens considèrent la prédiction de la relativité générale concernant le périhélie de Mercure comme une corroboration de cette théorie. Le fait contingent que l'« anomalie » ait été connue au moment de la formulation de la théorie ne doit pas influencer notre jugement objectif sur sa corroboration. L'explication de l'événement corroborant doit être une conséquence non voulue de la théorie. Elle peut être mise à son actif, puisqu'elle n'a pas été construite de manière *ad hoc* pour en rendre compte. Quel statut accorder à la corroboration ?

Selon Popper, le degré de corroboration ne fait que résumer l'état de la discussion critique à un moment donné, sans avoir de valeur prédictive sur les succès ou échecs futurs de la théorie. À l'opposé d'un jugement concernant la vérité (absolue ou approchée) de la théorie, le degré de corroboration ne fait que refléter un jugement provisoire de préférence entre des théories concurrentes. Il semble donc que la corroboration n'ait pas l'importance qu'on est tenté de lui accorder, car elle ne permet pas de changer la valeur de vérité que nous attribuons à l'hypothèse soumise au test (elle était et demeure « possiblement vraie »), alors que la réfutation le permet (compte tenu du problème de Duhem). Cela dit, Popper a proposé lui-même l'idée selon laquelle nous pouvons attribuer un sens à l'intuition selon laquelle la corroboration « dramatique » d'une théorie nous donnait une bonne raison de conjecturer que cette théorie avait « quelque chose de vrai », ou que sa vérissimilitude (proximité à la vérité) était plus grande que celles de ses concurrentes moins chanceuses. Selon Lakatos, une telle méta-conjecture est de nature inductive, ce qui ruinerait le programme poppérien. Popper pensait plutôt que sa validité intuitive reposait sur un argument réaliste : il est très improbable que la corroboration d'une théorie audacieuse soit due non à la qualité intrinsèque de ses affirmations, mais au hasard. On ne considère plus la théorie ondulatoire classique comme parfaite, mais les théories contemporaines permettent de comprendre en quoi elle était partiellement dans le vrai (Principe de correspondance).

On ne peut selon Popper en déduire que la théorie est plus probablement vraie que ses concurrentes, mais

seulement qu'elle est probablement plus proche de la vérité que ces dernières. La difficulté de cette position provient du fait que le concept de probabilité demeure ici intuitif et que la théorie formelle de la vérissimilitude proposée par Popper en 1960 a été réfutée en 1974, en particulier par le poppérien David Miller, lequel préfère en conséquence affirmer la thèse audacieuse selon laquelle la corroboration n'a pas réellement d'importance méthodologique. On lui objecte (Lakatos, Zahar) qu'elle est historiquement importante, en ce qu'elle permet de juger que l'on avance « dans le bon sens », alors que la seule prise en compte des réfutations ne nous autorise qu'à affirmer que la théorie peut être encore soumise à des tests, ce qui ne peut suffire dans la pratique. Il n'en demeure pas moins que, du point de vue réaliste, le but de la science est de découvrir la vérité, d'expliquer le monde, non de produire des théories bien corroborées.

▷ LAKATOS I., *Histoire et méthodologie des sciences* (1978), Paris, PUF, 1994. — POPPER K., *Le Réalisme et la Science* (1983), Paris, Hermann, 1990. — WATKINS J., *Science and Scepticism*, Princeton, 1984. — ZAHAR É., *Essai d'épistémologie réaliste*, Paris, Vrin, 2000.

Alain BOYER

→ Dédution ; Induction ; Méthode ; Modèle ; Parcomonie ; Probabilité [LOGIQUE] ; Test ; Théorie ; Validation.

COULEUR

PHYSIQUE

Lorsqu'on fait référence aux couleurs, à la genèse des phénomènes de la couleur, immédiatement le nom d'Isaac Newton (1642-1727) vient à l'esprit et s'impose. Les secrets de la lumière et plus spécialement des phénomènes de la couleur apparaissent comme attachés à son nom et à ses expériences. Cependant, s'intéresser aux couleurs, c'est aussi faire référence à l'art pictural, à ses mélanges de pigments colorés et à ses compositions suscitant diverses impressions visuelles. Parle-t-on, dans les deux cas, des mêmes couleurs ? Qu'entendre précisément par les expressions « couleur », « nombre des couleurs », « mélanges de couleurs », « phénomènes colorés », « perception des couleurs » ? Dans un premier temps nous introduirons la théorie newtonienne des phénomènes de la couleur ; nous soulignerons ensuite cursivement, en nous appuyant sur les débats relatifs au nombre des couleurs primitives, primaires, etc., les difficultés théoriques qu'il y a eu à dégager clairement un usage cohérent du terme « couleur ».

Le prisme de Newton en 1672

C'est en 1672 que Newton, alors qu'il vient d'être nommé fellow de la Royal Society pour son télescope à réflexion, rédige sa célèbre lettre à Henry Oldenburg, alors secrétaire de la Royal Society. Cette lettre,

présentée aux membres de la Royal Society à la séance du 8 février 1672 puis publiée dans le numéro 80 du 19 février des *Philosophical Transactions*, constitue le véritable texte fondateur de la théorie newtonienne de la lumière et des couleurs. Il restera jusqu'en 1704, date de publication de l'*Opticks*, le seul exposé complet de sa pensée. Cette lettre se présente, du moins dans sa première partie, comme le récit d'une succession d'événements se déroulant de façon rapide et logique à l'intérieur d'un intervalle de temps très bref ménageant une tension croissante jusqu'au dénouement final dans un *experimentum crucis* permettant de choisir entre une conception hétérogène et une conception homogène de la lumière blanche.

Dès les premières lignes de sa lettre, Newton nous indique :

« Monsieur. Pour tenir la récente promesse que je vous fis, je vous apprendrai sans plus de cérémonie, qu'au début de l'année 1666 (époque où je m'employais à polir des verres optiques sous d'autres formes que sphériques), je me procurai un prisme de verre triangulaire pour faire l'épreuve avec ce dernier du célèbre phénomène des couleurs. Et dans ce but, ayant obscurci ma chambre et fait un petit trou dans mes volets pour laisser entrer une quantité suffisante de lumière solaire, je plaçai mon prisme à son entrée, de sorte qu'elle puisse être ainsi réfractée sur le mur opposé. Ce fut au début un très agréable divertissement de voir ces couleurs vives et intenses ; mais après un certain temps, m'efforçant de les considérer avec plus d'attention, je fus surpris de les voir sous une forme oblongue alors que, suivant les lois acceptées de la réfraction, je m'attendais à les trouver sous une forme circulaire.

Elles étaient limitées sur les côtés par deux lignes droites ; mais aux extrémités, l'affaiblissement de la lumière était si progressif qu'il était difficile de déterminer exactement quelle pouvait être leur forme quoiqu'elles parussent semi-circulaires.

Comparant la longueur de ce spectre coloré avec sa largeur, je trouvai la première cinq fois plus grande que la seconde ; une disproportion si excessive qu'elle suscita en moi, afin de discerner sa provenance, une plus grande curiosité qu'à l'ordinaire. »

Cela étant, Newton propose successivement pour expliquer ce phénomène diverses hypothèses qu'il élimine ensuite l'une après l'autre. Il se trouve ainsi amené à mettre en œuvre la procédure de la voie négative, de l'induction par élimination de Francis Bacon.

Newton suggère tout d'abord quelques hypothèses se rapportant soit au rôle de l'épaisseur du verre, soit à celui de l'ombre. Dans tous les cas, il diversifie profondément ses expériences :

« C'est à peine si je pouvais imaginer que les diverses épaisseurs du verre ou la limitation de l'ombre ou de l'obscurité pouvaient avoir quelque influence sur la lumière dans la production d'un tel effet. Cependant, je pensais qu'il n'était pas mal à propos d'examiner en premier lieu ces éléments et, de ce fait, j'expérimentais ce qui arriverait en faisant passer la lumière à travers desorceaux de verre de différentes épaisseurs, ou à travers des trous de diverses grosseurs percés dans la fenêtre, ou en plaçant le prisme à l'extérieur, de telle sorte que la lumière pût le traverser et fût réfractée avant d'être délimitée par le trou : mais je ne trouvais aucun

de ces paramètres essentiels. L'aspect des couleurs était le même dans tous les cas. »

Newton émet ensuite une nouvelle hypothèse liant l'apparition des couleurs à des « inégalités dans le verre ou à quelque autre irrégularité contingente ». À l'issue de cette première série d'hypothèses dont les tests expérimentaux sont à chaque fois négatifs, Newton se demande si la forme oblongue ne pourrait pas être expliquée par la différence dans l'incidence des rayons provenant des parties opposées du disque solaire. Le résultat est à nouveau négatif. Newton considère alors que les rayons lumineux pourraient être constitués comme chez Descartes par des boules contiguës. Celles-ci seraient alors susceptibles d'engendrer à la sortie du prisme, du fait de leur interaction avec le milieu ambiant, des rayons courbés. Mais en soumettant cette hypothèse à l'expérience, Newton « ne put observer un tel infléchissement dans les rayons ».

C'est à ce moment qu'intervient dans le texte de Newton l'élément décisif. Jusqu'à cet instant, Newton a suivi la voie négative, c'est-à-dire que nous avons appris avec lui ce que la cause de la forme du spectre et de l'apparition des couleurs n'est pas. C'est dans la voie affirmative, au sens baconien, que Newton va devoir maintenant s'engager. Cette nouvelle étape trouve son accomplissement avec l'*experimentum crucis* :

« Le rejet progressif de ces hypothèses me conduisit à la longue à l'*experimentum crucis* qui était le suivant : je pris deux planches et plaçai l'une d'entre elles juste derrière le prisme près de la fenêtre, de telle sorte que la lumière pût traverser un petit trou pratiqué à ce dessin, et ainsi que la lumière tombât sur l'autre planche que je plaçai à environ 12 pieds de distance, ayant préalablement pratiqué dans celle-ci également un petit trou afin qu'un peu de la lumière incidente la traversât. Ensuite, je disposai un autre prisme derrière cette seconde planche de telle sorte que la lumière qui traversait les deux planches pût également le traverser et fût à nouveau réfractée avant d'arriver sur le mur. Ceci fait, je pris le premier prisme dans la main et le tournai lentement d'un mouvement de va-et-vient autour de son axe, afin que toutes les diverses parties de l'image, envoyées sur la seconde planche, traversassent successivement son trou ; ainsi il me serait possible d'observer en quel lieu le second prisme réfracterait sur le mur les diverses parties. »

Dans cette expérience Newton utilise deux prismes et deux planches percées. Le premier prisme est placé, comme dans les expériences précédentes, à proximité du trou pratiqué dans le volet. Les rayons émergeant de ce prisme, produisant le spectre, passent par un petit trou réalisé dans l'une des deux planches, placée juste derrière le prisme. À douze pieds de cette dernière, Newton fixe la deuxième planche percée également d'un trou et derrière laquelle il installe le deuxième prisme. Ce dernier peut ainsi recevoir les rayons émergeant du premier prisme. Par la rotation de ce dernier autour de son axe, tout en maintenant fixes les deux planches et le deuxième prisme, les rayons de telle ou telle espèce émergeant du premier prisme sont amenés en face du premier trou. Cela étant, seul le faisceau

joignant les deux trous dans les deux planches et dont la direction, par conséquent, est constante tombe sur le deuxième prisme (chaque faisceau parvient ainsi sous la même incidence au deuxième prisme). De cette façon, Newton peut observer sur le mur les diverses taches colorées correspondant aux divers rayons réfractés par le deuxième prisme, et constate alors que les plus réfractés (ou les moins réfractés) par le premier prisme sont encore ceux qui le sont le plus (ou le moins) par le deuxième prisme :

« Et je vis, par les différentes positions de ces lieux, que la lumière tendant vers cette extrémité de l'image vers laquelle la réfraction du premier prisme avait lieu, subissait vraiment dans le second prisme une réfraction beaucoup plus importante que la lumière tendant vers l'autre extrémité. »

Là-dessus, Newton conclut que la lumière blanche est constituée de rayons différemment réfrangibles :

« Et ainsi nous décelâmes que la véritable cause de la longueur de cette image n'était pas autre chose que celle-ci, à savoir que la lumière se composait de rayons différemment réfrangibles qui, sans égard à la différence de leurs incidences, étaient suivant leur degré de réfrangibilité transmis vers diverses parties du mur. »

Dans la deuxième partie de sa lettre de 1672, Newton remarque que l'*experimentum crucis* montre que les rayons traversant le deuxième prisme conservent tout aussi bien leur couleur que leur degré de réfrangibilité. À chaque couleur correspond un certain degré de réfrangibilité, de telle sorte qu'entre la réfrangibilité et la couleur s'instaure une relation biunivoque. Par conséquent, corrélativement à leurs différences dans leurs degrés de réfrangibilité, les rayons diffèrent « dans leur disposition à présenter telle ou telle couleur particulière ». Ainsi Newton peut conclure que « les couleurs ne sont pas des qualifications de la lumière dérivées de réfractions ou de réflexions sur les corps naturels (comme on le croit en général), mais des propriétés originelles et innées différentes suivant les rayons » de la même façon que le sont leurs degrés de réfrangibilité. Puis Newton établit que la couleur ou le degré de réfrangibilité d'un rayon donné sont inaltérables, soit par réfraction, soit par réflexion, soit encore « d'aucune autre façon que j'ai pu jusqu'à présent étudier ». Il n'en reste pas moins que des « transmutations apparentes de couleurs peuvent se produire là où s'opère tout mélange de rayons de diverses natures ». En fait, il y a deux sortes de couleurs : « les couleurs simples et primitives d'une part, leurs mélanges d'autre part ». Les couleurs primitives ou primaires étant « le rouge, le jaune, le vert, le bleu, un violet pourpre, avec aussi l'orange, l'indigo et une variété indéfinie de nuances intermédiaires ». Parmi tous les mélanges, « la composition la plus surprenante et la plus extraordinaire est celle du blanc ». Cette couleur est, de toutes celles obtenues par mélanges, la plus complexe puisque son analyse par le prisme fournit toutes les couleurs du spectre. Afin d'illustrer ce résultat, Newton imagine une expérience permettant de recomposer la lumière blanche à partir de la lumière dispersée par un

prisme. Pour cela, il place une lentille convergente sur le trajet des rayons émergeant du prisme et observe que « la lumière ainsi reproduite était entièrement et parfaitement blanche, ne différant pas du tout de façon sensible de la lumière directe du soleil, sauf lorsque les verres que j'employais n'étaient pas suffisamment clairs, car dans ce cas, ils la modifieraient quelque peu vers leur couleur ». Newton conclut en affirmant que « de cela, par conséquent, il s'ensuit que le blanc est la couleur normale de la lumière ; car la lumière est un agrégat complexe de rayons dotés de toutes sortes de couleurs, qui sont dardés de façon désordonnée des différents points des corps lumineux ». Dans cette dernière proposition, la thèse de l'hétérogénéité prend sa forme définitive, et l'interprétation de l'*experimentum crucis* acquiert toute sa force. Puisque à chaque degré de réfrangibilité correspond une couleur déterminée, par conséquent, les rayons susceptibles d'engendrer telle ou telle sensation de couleur et préalablement mélangés dans la lumière blanche sans perdre leur spécificité sont, par le prisme, simplement « séparés et dispersés suivant leurs inégales réfractions sous une forme oblongue dans une succession ordonnée allant du rouge vif le moins réfracté au violet le plus réfracté ».

Dans ce texte de 1672, comme dans l'*Optique* de 1704, Newton introduit l'idée d'un nombre indéfini de lumières homogènes où prédominent sept tonalités principales. Chaque rayon se trouve caractérisé non pas par une impression subjective mais par un degré de réfrangibilité, de telle sorte qu'il est possible, sur la base de la mesure de ces degrés de réfrangibilité, de construire une échelle quantitative des rayons colorés, c'est-à-dire des rayons qui engendrent telle ou telle sensation de couleur, et, ainsi, de parvenir à la mathématisation des phénomènes de la couleur (arc-en-ciel, lames minces). Newton peut ainsi expliquer pour quelles raisons telle ou telle couleur apparaît en tel ou tel endroit dans le ciel, s'il s'agit par exemple d'un arc-en-ciel, en revanche il ne dit pas dans ce cadre théorique en quoi dans sa nature le rouge diffère du bleu, *à fortiori* comment s'effectue la perception des couleurs.

Dans les théories antérieures à celle de Newton, théories dont l'inspiration restait aristotélicienne, y compris dans les modèles mécanistes du XVII^e s. (René Descartes, Robert Hooke, Robert Boyle), c'est la différence et la spécificité des couleurs elles-mêmes qui sont expliquées : la lumière blanche est considérée comme pure et homogène et les couleurs, caractérisées subjectivement, par leur éclat ou leur force, naissent d'une modification (atténuation ou obscurcissement) de la lumière incidente. La succession des couleurs du rouge au bleu-violet est alors produite lorsque la lumière devient plus faible ou plus sombre. La genèse des couleurs, l'explication de leur spécificité, est donc associée à l'idée d'une incorporation plus ou moins grande d'obscurité provenant, par exemple, du milieu traversé par la lumière. L'expérience avec le prisme s'accorde parfaitement avec le cadre général de cette théorie traditionnelle d'inspiration aristotélicienne, en

ce sens que la couleur la plus vive, le rouge, apparaît après avoir traversé la moindre épaisseur de verre (vers le sommet du prisme) et le bleu là où l'épaisseur traversée est la plus grande (vers la base du prisme). Ainsi Marco-Antonio de Dominis (1566-1624) écrit dans son *De radiis visus et lucis in vitris perspectivis et iride tractatus* publié à Venise en 1611 :

« Nous pouvons dire qu'il y a trois couleurs intermédiaires. La première incorporation d'opacité qui assombrit d'une certaine quantité le blanc, engendre le rouge, et cette dernière est la plus lumineuse (*maxime lucidus*) des couleurs intermédiaires réparties entre les deux extrêmes, le blanc et le noir, comme cela apparaît de façon manifeste dans l'expérience du prisme (*in vitro oblongo triangulari*) : les rayons du soleil qui pénètrent dans la partie la plus proche du sommet, dans celle qui a la moindre épaisseur et par là même le moins d'opacité, émergent rouges ; ensuite, pour une épaisseur plus importante, apparaît le vert et enfin, le violet pour l'épaisseur maximale [...] et ainsi suivant l'épaisseur du verre, l'assombriement augmente ou diminue [...] si l'opacité augmente apparaît le violet ou le bleu qui est la couleur la plus obscure (*maxime obscurus*) des couleurs intermédiaires [...] les autres couleurs résultent du mélange des précédentes » (§ 6, p. 9-10).

Au XVII^e s., lorsque sont construits des modèles mécaniques, l'impression subjective, associée aux différentes couleurs, conditionne alors soit la tendance à la rotation des boules du deuxième élément cartésien : « [...] en sorte que celles [les boules] qui tendent à tourner beaucoup plus fort, causent la couleur rouge, et celles qui n'y tendent qu'un peu plus fort, causent la jaune [...] en sorte que le vert paraît où elles ne tournoient guère moins vite » (*Les météores*, Leyde, 1637, p. 259), soit la « force » de l'impulsion en orbite du mouvement lumineux introduit par Robert Hooke (*Micrographia*, Londres, 1665, p. 62-63).

C'est donc une profonde transformation que Newton a fait subir au problème des couleurs en introduisant, par l'intermédiaire du degré de réfrangibilité associé à son nouveau concept de lumière homogène engendrant une sensation de couleur déterminée, une caractérisation objective susceptible de mener à la mathématisation des phénomènes de la couleur.

Indépendamment des discussions épistémologiques qui peuvent être développées concernant le statut de l'expérience newtonienne du prisme — expérience construite et non simplement donnée —, tout semble maintenant parfaitement clair : il y a un nombre indéfini de lumières homogènes caractérisées chacune simultanément par leur degré de réfrangibilité et leur couleur. Cependant cette apparente clarté est toute illusoire. En effet, lorsque Newton mélange tous les divers rayons, en plaçant une lentille convergente après le prisme, il obtient la blancheur ; alors que les coloristes ou les peintres savent parfaitement qu'en mélangeant de nombreux pigments colorés on perçoit bien plutôt un assombriement si ce n'est un gris très sombre, voire un noir. En outre ces mêmes coloristes n'utilisent que trois pigments colorés, le bleu, le jaune et le rouge, pour engendrer toutes les autres teintes ; pour quoi donc, comme Newton, considérer qu'il y a sept

nuances principales ? Ainsi pour ne prendre qu'un exemple, le Père Castel écrit dans son *Vrai système de physique générale de M. Isaac Newton, exposé et analysé en parallèle avec celui de Descartes* (Paris, 1743) :

« Mais il est au moins désormais bien démontré, qu'il n'y a tout au plus que trois couleurs primitives, le Bleu, le Jaune, le Rouge. »

« Cette démonstration consiste en deux points également certains, 1° Que toutes les autres couleurs dérivent de ces 3 là, par simple voye de mélange, 2° Que ces 3 ne dérivent d'aucune autre par cette voye, ni même par aucune voye » (p. 453-454).

Il apparaît donc que les textes newtoniens, mal compris, mais aussi parfois peu précis, suscitent des difficultés et des débats au sujet des notions de « couleurs » et de « mélange des couleurs ». Ceux-ci ne trouveront finalement des réponses qu'au cours de la deuxième moitié du XIX^e s.

Il ne peut être question dans le cadre de cet article de suivre dans leur diversité et leur multiplicité toutes les problématiques relevant à la fois des champs de la physique et de la vision des couleurs dans ses dimensions physiologiques et mentales. La question du nombre des couleurs, primaires, primitives ou fondamentales offre cependant un intéressant fil conducteur.

Le nombre des couleurs

Les débats sur le nombre des couleurs qui suivent, en se prolongeant jusqu'au milieu du XIX^e s., la publication de l'*Optique* de Newton apparaissent, en effet, comme le symptôme le plus caractéristique et explicite de la confusion propre aux connaissances relatives aux phénomènes de la couleur.

Il y a les lumières homogènes ou monochromatiques newtoniennes en nombre indéfini où prédominent les sept tonalités principales suggérées à Newton par une analogie musicale. Cette comparaison entre les notes de la gamme et les couleurs du spectre constitue une donnée permanente de la pensée newtonienne. Dans le texte de 1672, l'expression newtonienne « [...] mais aussi (*together with*) l'orangé et l'indigo [...] » semble bien indiquer que ces deux couleurs ont un statut légèrement différent de celui des cinq autres (les caractères typographiques ne sont pas non plus les mêmes pour ces deux couleurs et pour les cinq autres dans le numéro 80 des *Philosophical Transactions* du mois de février 1672). En outre, dans ses *Lectiones opticae* de Cambridge en 1669, Newton, en dehors des cinq couleurs ou nuances principales, introduit, juste avant l'étude de la répartition musicale, l'orangé et l'indigo pour des raisons d'harmonie et d'élégance.

À cette indéfinité newtonienne répartie pour des raisons musicales en sept nuances principales, Christian Huygens (1629-1695) propose de substituer deux couleurs et les coloristes ou les peintres, trois. Combien y a-t-il donc de couleurs, ou plus exactement de quoi parlent nos différents interlocuteurs ?

L'approche newtonienne ne mérite pas que nous nous y attardions davantage. Elle est, en dehors des analogies musicales, du côté de la physique de la lumière et des couleurs, de la mathématisation et de l'infinité des degrés de réfrangibilités caractérisant chacun des rayons homogènes ou monochromatiques.

Obtenir la blancheur avec deux lumières colorées. – Huygens prend rapidement connaissance des travaux de Newton. Il est surpris et s'empresse d'écrire, en date du 14 janvier 1673, à Henry Oldenburg pour Newton. Dans sa lettre il propose une intéressante approche de l'explication de la genèse des différentes couleurs et de la synthèse de la lumière blanche :

« J'ai vu, comme Monsieur Newton prend peine à soutenir sa nouvelle Opinion touchant les couleurs. Il me semble, que la plus importante objection, qu'on lui fait en forme de *Quere*, est celle. S'il y a plus de deux sortes de couleurs ? Car pour moi je crois qu'une Hypothèse qui expliquerait mécaniquement et par la nature du mouvement la couleur *jaune* et la *bleue* suffirait pour toutes les autres, par ce que celles-ci, étant seulement plus chargées (comme il paraît par les prismes de M. Hook) produisent le rouge et le bleu obscur, et que de ces quatre tout le reste des couleurs se peut composer. Je ne vois pas aussi, pourquoi Monsieur Newton ne se contente pas des deux couleurs, jaune et bleu. Car il sera bien plus aisé de trouver une hypothèse par le mouvement, qui expliquât ces deux différences, que non pas pour tant de diversité qu'il y a d'autres couleurs. Et jusqu'à ce qu'il ait trouvé cette hypothèse, il ne nous aura pas appris en quoi consiste la nature et différence des couleurs, mais seulement cet accident (qui assurément est fort considérable) de leur différente réfrangibilité.

Pour ce qui est de l'autre, à savoir la composition du blanc de toutes les couleurs ensemble, il se pourrait faire que le jaune et le bleu seraient encore suffisants pour cela : ce qui vaut la peine d'être essayé, et il se peut par l'expérience que Monsieur Newton propose, de recevoir contre la muraille d'une chambre obscure les couleurs du prisme, et d'éclairer par leur lumière réfléchie un papier blanc. Il faudrait empêcher les couleurs des extrémités, savoir le rouge et le pourpre, de donner contre la muraille, et laisser seulement les couleurs d'entredeux, le jaune, vert et bleu, pour voir si la lumière de celles-ci seules ne ferait pas paraître blanc le papier, aussi bien que quand elles éclairent toutes. Je doute même si l'endroit le plus clair du jaune ne ferait pas tout seul cet effet ; et je l'essaierai à la première commodité. Vous voyez bien cependant que si ces expériences se succèdent l'on ne pourra plus dire que toutes les couleurs sont nécessaires pour composer le blanc et qu'il sera très vraisemblable que toutes les autres ne sont que des degrés du jaune et bleu, plus ou moins enfoncés. » (*The Correspondence of Isaac Newton*, I, p. 255-256.)

Dès les premières lignes, Huygens avance donc une hypothèse concernant la genèse des couleurs. Celle-ci s'appuie sur une argumentation à la fois expérimentale, en faisant appel aux travaux de Robert Hooke, et méthodologique, en faisant jouer un critère de simplicité et de commodité reposant sur le style d'intelligibilité mécanique souhaité par Huygens.

Le problème de la genèse des couleurs étant, sur ces bases, susceptible d'être compris, il reste celui de la

genèse de la blancheur. Huygens propose alors de projeter sur un mur blanc divers faisceaux colorés. L'argument de Huygens est très fort sur le plan expérimental et gêne Newton. Cependant nous savons maintenant qu'il ne faut pas confondre l'infinité physique des lumières monochromatiques et les processus mis en jeu au cours de la vision. Huygens tente de réaliser ici une synthèse additive de couleurs complémentaires.

Quand les peintres mélangent trois pigments colorés. – Au cours du XVII^e s. la théorie trichromique d'inspiration aristotélicienne a trouvé, en accord avec la pratique picturale, sa forme la plus élaborée. Dans cette théorie, entre les deux extrêmes, le blanc et le noir, se placent le jaune, le rouge et le bleu. Le mélange de ces trois couleurs permet alors d'obtenir toutes les autres nuances. Ce type de mélange de substances colorées ou de pigments, à la différence de celui de Huygens, est dit aujourd'hui soustractif. Les éléments de cette théorie du mélange de pigments sont exposés avec beaucoup de soin, entre autres, par François d'Aguilon (1556-1617) dans son *Opticorum libri sex* (Anvers, 1613). Ils sont repris par Athanase Kircher (1601-1680) dans son *Ars magna lucis et umbræ* (Rome, 1646).

Sans entrer ici dans plus de détail on perçoit en quel sens la théorie trichromique, comprise sur le mode moderne de l'engendrement des couleurs par synthèse soustractive, appartient au monde de la représentation picturale et peut se heurter, jusqu'à la deuxième moitié du XIX^e s., à l'approche physico-mathématique newtonienne. Cette dernière apparaît alors, par la mise en œuvre d'une infinité de lumières monochromatiques réparties en sept nuances principales, inutilement compliquée, voire fautive aux coloristes ou à ceux qui, autour de Goethe, prônent un retour aux phénomènes colorés, à la couleur elle-même.

En fait, toutes ces difficultés, incohérences et polémiques ne trouveront des réponses, comme nous l'avons déjà suggéré, qu'au cours de la deuxième moitié du XIX^e s. après les travaux de Thomas Young (1773-1829), David Brewster (1781-1868), Hermann von Helmholtz (1821-1894) et James Clerk Maxwell (1831-1879). Il aura, en effet, été nécessaire d'effectuer un important travail théorique marqué, entre autres, par la compréhension de la distinction entre synthèse additive et synthèse soustractive, c'est-à-dire entre mélange de lumière et mélange de pigments, ainsi que par l'élaboration corrélatrice de la théorie trichromique de la vision, centrée sur la sensibilité particulière des récepteurs de l'œil aux trois rayonnements, bleu-violet, vert et rouge. Il faut en outre bien distinguer, d'un point de vue conceptuel, ces trois couleurs de celles pouvant être engagées dans les processus additifs et soustractifs. Le terme « couleur », en appartenant au physicien, au physiologiste, au peintre ou au coloriste, impose de toujours être manié avec soin et précaution ; il importe donc toujours de spécifier le champ épistémologique à l'intérieur duquel le discours l'impliquant se déploie.

- ▼ ARNHEIM R., *Art Visual Perception. A psychology of the Creative eye*, Univ. of California Press, 1954 (rééd., 1974).
 – BLAY M., *La conceptualisation newtonienne des phénomènes de la couleur*, Paris, Vrin, 1983. – BRUSANTIN M., *Histoire des couleurs*, Paris, Flammarion, 1986. – COULOUBARISIS L. & WUNENBURGER J.-J. éd., *La couleur*, Bruxelles, Ousia, 1993.
 – ÉLIE M., *Lumière, couleur et Nature*, Paris, Vrin, 1993.
 – GAGE J., *Colour and Culture. Practice and Meaning from Antiquity to Abstraction*, Londres, Thames & Hudson, 1993.
 – HALBERTSMA K.J.A., *A History of the Theory of Colour*, Amsterdam, 1949. – KEMP M., *The Science of Art. Optical Themes in Western Art from Brunelleschi to Seurat*, Yale Univ. Press, 1990. – OVIO G., *La vision des couleurs*, Paris, Alcan, 1932.
 – SHERMAN P.D., *Colour Vision in the nineteenth Century. The young-Helmholtz-Maxwell Theory*, Bristol, Adam Hilger Ltd, 1981. – THOMPSON E., *Colour Vision. A Study in Cognitive Science and the philosophy of Perception*, Londres, Routledge, 1995.

Michel BLAY

→ Goethe ; Image ; Lumière ; Newton ; Vision.

COURANT DE CONVECTION

On attribue aujourd'hui une importance considérable aux courants de convection dans le fonctionnement de la Terre ; on suppose en effet qu'ils affectent l'ensemble du manteau et sont à l'origine du mouvement des plaques en surface. L'existence de ces mouvements internes et leur lien avec les mouvements superficiels ne se sont cependant imposés que très tardivement, dans la deuxième partie du XX^e s., et c'est le cheminement progressif vers cette compréhension que nous allons décrire.

La convection, comme mode de transport de la chaleur

Lorsque la température d'un milieu n'est pas homogène, la chaleur peut être transportée par différents processus.

Le premier processus est la conduction thermique. Il s'agit de la diffusion de la chaleur à travers un milieu statique par la propagation des vibrations du réseau atomique. Le deuxième processus, toujours dans un milieu statique, correspond à la propagation des vibrations thermiques sous la forme de rayonnement électromagnétique. Du fait de la faible conductivité thermique des roches et de leur forte opacité, ces deux premiers modes de transport sont assez inefficaces pour la Terre. Le troisième et dernier processus est la convection. Il s'agit d'un transport de chaleur par la matière elle-même en mouvement. La découverte de la convection comme processus de transfert de la chaleur est due à Rumford en 1797, mais les véritables investigations expérimentales et théoriques ne datent que du tout début du XX^e s. Les expériences déterminantes sont réalisées en 1900 par Bénard, qui étudie l'organisation de la convection dans des couches de fluides visqueux chauffés par la base (la viscosité d'un fluide traduit sa résistance à l'écoulement – le miel est par exemple plus visqueux que l'eau). Bénard montre que lorsque le

chauffage dépasse une certaine valeur critique la conduction n'est plus assez efficace pour évacuer toute la chaleur et la convection prend le relais : la matière du fond, plus chaude, s'élève, se refroidit en surface, devient plus dense et retombe. Le transfert de la chaleur se fait par une circulation organisée de la matière avec des courants montants chauds et des courants descendants froids.

À la suite de ces expériences décisives, Boussinesq ébauche en 1901 une première théorie de la convection, complétée par Lord Rayleigh en 1916. Ce dernier montre que les forces motrices des mouvements convectifs sont les forces d'Archimède : un petit volume de fluide plus chaud que le milieu environnant subit une dilatation thermique, sa densité est donc plus faible et il tend à monter. Pour que la convection puisse s'établir, il faut cependant que les forces motrices soient supérieures aux forces visqueuses de frottement. Lord Rayleigh montre que cette condition est remplie si le rapport des forces motrices sur les forces visqueuses, rapport qui est appelé nombre de Rayleigh, dépasse une certaine valeur, nommée le Rayleigh critique.

Premières applications de la convection à la Terre

Le premier scientifique à parler de la convection pour la Terre est Hopkins en 1839. Il pense cependant que la convection ne peut survenir que dans des milieux fluides en sorte qu'elle n'a pu être effective qu'au début de l'histoire de la Terre, alors en état de fusion. En 1881, Fisher affirme que la Terre est toujours à l'état fluide et qu'elle continue d'être affectée par des courants de convection. Il émet une hypothèse importante, qui se retrouvera abondamment par la suite, selon laquelle la friction exercée par la convection à la base de la croûte induirait la formation de montagnes.

Au début du xx^e s., les connaissances sur l'état physique de l'intérieur du globe évoluent considérablement. L'analyse des déformations élastiques de la Terre et surtout le développement de la sismologie montrent sans aucun doute possible que le manteau terrestre est entièrement solide. Comment un milieu solide pourrait-il convecter ? Le problème est complexe et sa solution réside dans la possibilité d'un comportement multiple pour les solides en fonction de la durée d'application des forces qui agissent sur eux. Ceci est parfaitement mis en évidence par l'exemple des glaciers. Bien qu'ils nous apparaissent rigides, leur observation au fil des jours montre qu'ils peuvent pourtant s'écouler le long des pentes des montagnes. De la même manière, la Terre (et ceci est vrai pour tous les solides) réagit comme un corps élastique lorsqu'elle est soumise à des sollicitations brèves (propagation des ondes sismiques) : elle se déforme instantanément, d'une valeur finie, et retrouve sa forme initiale lorsque la sollicitation est supprimée. Au contraire, lorsque les sollicitations sont prolongées, elle acquiert une déformation, dite plastique ou visqueuse, qui est irréversible

et qui croît avec le temps. Elle « s'écoule » comme un fluide visqueux : on dit qu'elle flue. Ce comportement « fluide » du globe est mis en évidence par les mouvements d'ajustement isostatique qui correspondent à l'enfoncement progressif des régions surchargées par le poids des sédiments comme les deltas ou à l'élevation régulière des régions allégées par l'érosion ou par la fonte d'une calotte glaciaire (le bouclier scandinave). Ces déplacements verticaux de la croûte nécessitent un flux sub-crustal de matière et ont amené Barrell à introduire en 1915 la distinction essentielle entre la lithosphère, couche externe rigide, et l'asthénosphère, couche sous-jacente ductile, capable de se déformer visqueusement et de permettre des courants de matière.

Le point controversé consiste à savoir si l'asthénosphère peut se déformer visqueusement dès que des forces, même faibles mais maintenues pendant un temps suffisamment long, sont appliquées, ou si la déformation visqueuse ne débute que lorsque les forces appliquées dépassent une certaine valeur définissant le seuil de plasticité ou la « force » du matériau. Pour certains, qui constituent une large majorité et dont le chef de file est Jeffreys, l'asthénosphère possède un seuil de plasticité qui empêche d'une manière catégorique l'établissement des courants de convection. D'autres supposent cependant que le seuil de plasticité est nul, ou éludent le problème, ce qui leur permet de développer des hypothèses sur la convection.

Les premières hypothèses sont dues à Ampferer (1906), à Schwinner (1919) et à Bull (1921, 1927). Elles sont motivées par la découverte de la radioactivité, qui change radicalement les conceptions sur l'état thermique du globe. Sous l'influence de Lord Rayleigh, de Holmes et de Joly, la théorie du refroidissement et de la contraction thermique de la Terre qui prédominait au xix^e s. a été progressivement remise en cause et un mécanisme permettant l'évacuation de la chaleur s'avérait nécessaire. De plus, la distribution des éléments radioactifs n'est pas homogène. Principalement concentrés dans les couches supérieures du globe, ils sont plus abondants dans la croûte continentale que dans la croûte océanique. Cette inégale distribution produit un chauffage différentiel supposé à l'origine des courants de convection.

Une particularité de ces premières suppositions sur la convection est qu'elles ne sont pas reliées à l'hypothèse de Wegener sur la dérive des continents mais qu'elles sont seulement évoquées pour expliquer l'orogénèse. Ce n'est que Holmes, en 1928, qui envisage que les courants de convection sont le moteur si énigmatique de la dérive. Il affirme, en s'appuyant sur le calcul du nombre de Rayleigh, que ces courants sont indispensables pour évacuer la chaleur interne. La géométrie de la convection qu'il imagine résulte d'une analogie avec la circulation de l'atmosphère. À une circulation planétaire, il superpose des systèmes secondaires dus au chauffage différentiel entre les continents et les océans. Les courants montants localisés sous les continents mettent ceux-ci en tension, les fracturent et

les entraînent, créant un nouvel océan entre les blocs disjoints. Malgré le soutien du géologue du Toit et une étude quantitative de la convection de Pekeris en 1933, les thèses remarquables et prophétiques de Holmes restent isolées. D'une part, la majorité des chercheurs demeure attachée à l'opinion de Jeffreys sur la double impossibilité de la convection dans la Terre solide et des translations continentales. Et d'autre part, ceux qui reconnaissent la possibilité de courants de matière à l'intérieur du globe, soit en considérant les facteurs d'échelle (Dive, 1933), soit en s'appuyant sur les phénomènes isostatiques (Gutenberg, 1941), continuent d'ignorer la convection en tant que force responsable de la dérive !

Entre 1935 et 1962, les études sur la convection sont peu nombreuses. En 1939, Griggs propose une théorie de l'orogénèse par la friction de la convection sous la croûte en s'appuyant sur une série d'expériences réalisées au moyen de modèles réduits. Les travaux les plus complets sont dus à Vening Meinesz, qui comme Holmes considère que les courants de convection sont un mécanisme plausible pour expliquer la dérive. Mais malgré ces nouvelles études, l'hypothèse de la convection ne s'impose pas encore et une nouvelle objection est même soulevée par Birch en 1952. Il met en évidence un changement de composition ou de phase dans le manteau vers 900 km de profondeur (replacé par la suite vers 670 km) qui selon lui doit réduire, voire interdire, le développement des courants de convection.

La convection et la tectonique des plaques

La situation change au début des années 1960 lorsque Hess découvre l'expansion des fonds océaniques et suppose que les fonds marins sont créés au niveau des dorsales médio-océaniques et qu'ils sont engloutis au niveau des fosses océaniques. Il attribue cette mobilité des fonds marins à des mouvements de convection affectant le manteau et considère que les dorsales sont la manifestation en surface des branches ascendantes des cellules de convection et que les fosses sont les témoins des branches descendantes. Les continents seraient entraînés passivement à la surface de ces cellules de convection. L'hypothèse de Hess de l'expansion des fonds océaniques est rapidement confirmée par Vine et Matthews (1963) et aboutit à la formulation de la théorie de la tectonique des plaques en 1967-1968. Pendant cette période, les études sur la convection se sont rapidement développées (Runcorn, 1962, 1965, 1967 ; Knopoff, 1964 ; Turcotte & Schubert, 1967). Cet enchaînement des faits montre que ce n'est qu'à partir de la découverte de l'expansion océanique que la convection a pu recevoir un large écho dans la communauté scientifique. La mobilité des fonds océaniques puis le mouvement des plaques mettent en effet pleinement en évidence la nécessité des mouvements internes.

À partir du milieu des années 1960, l'existence des mouvements de convection à l'intérieur du manteau

commence à être acceptée par une majorité de chercheurs, mais c'est l'organisation précise de cette convection qui reste très controversée. Deux problèmes, que nous n'abordons que très succinctement, vont se poser. Les plaques sont-elles entraînées passivement à la surface des cellules de convection comme Holmes et Hess le suggèrent, ou constituent-elles des agents actifs de la convection ? Et plus fondamentalement le manteau est-il affecté par un mouvement d'ensemble, ou la convection s'organise-t-elle en plusieurs couches indépendantes ? Les thèses de Holmes et de Hess supposent une organisation des cellules de convection analogue à celle que Bénard pouvait observer dans son laboratoire. Ces conceptions soulèvent cependant de nombreuses difficultés lorsqu'elles sont étudiées dans le détail (Cox & Hart, 1989). Pour y remédier, de nombreux chercheurs (voir Loper, 1985) ont proposé dès les années 1970 une autre forme de convection thermique où les plaques prennent une part active. Le point essentiel est que la lithosphère océanique, au fur et à mesure qu'elle se refroidit en s'éloignant des dorsales, devient plus dense que l'asthénosphère sous-jacente. Au niveau des subductions, elle s'enfoncerait spontanément dans le manteau, et c'est cette descente des plaques subductées qui mettrait les plaques de la surface en mouvement et organiserait la convection mantellique, au moins dans le manteau supérieur. Les dorsales ne seraient plus alors liées à des courants chauds montant du manteau profond mais correspondraient uniquement à des épanchements passifs de matière dans un espace laissé libre entre deux plaques divergentes. Cette conception reste néanmoins encore controversée aujourd'hui.

L'autre difficulté consiste à savoir si le manteau supérieur et le manteau inférieur, dont l'interface est la discontinuité minéralogique de 670 km de profondeur, convectent ensemble ou séparément (voir également Loper, 1985). Les études géochimiques favorisent une convection à deux couches car elles semblent distinguer deux réservoirs distincts, l'un de la taille du manteau supérieur et l'autre du manteau inférieur. De plus, les tremblements de terre qui affectent les plaques en subduction ne s'observent pas sous 670 km de profondeur, d'où l'idée que les plaques subductées ne pénètrent pas dans le manteau inférieur. Ces arguments ne sont cependant pas déterminants. Les études géochimiques demandent des interprétations plus complexes, et les sismologues déclinent aujourd'hui le prolongement des plaques plongeantes sous 670 km. En outre, la faiblesse du saut de viscosité entre le manteau supérieur et le manteau inférieur, connue depuis les années 1970, conforte l'idée d'une convection globale. Aucun consensus ne s'est encore établi et les deux hypothèses continuent de s'affronter. La solution est probablement intermédiaire, certaines plaques subductées s'arrêtant à 670 km alors que d'autres continuent leur descente dans le manteau inférieur.

À cette convection organisée, ou du moins fortement contrôlée, par les plaques et qui correspond à des courants descendants sous forme de nappes (les plaques

subductées) et à des remontées diffuses partout ailleurs, s'ajoute une convection secondaire qui interfère peu avec la première. Elle consiste en la montée de panaches étroites, originaires de la frontière noyau-manteau ou/et de la frontière manteau supérieur-manteau inférieur. Ces panaches chauds forment, lorsqu'ils arrivent en surface et qu'ils percent les plaques, le volcanisme intra-plaque dit de point chaud. Cette géométrie de la convection avec des panaches montants et des nappes descendantes est corroborée par les résultats des modèles numériques qui reposent sur la résolution des équations de la convection (Tackley, 1993).

▶ ALLEGRE C., *L'écume de la Terre*, Paris, Fayard, 1983. — COX A. & HART R.B., *Plate tectonic, how it works*, Oxford, Blackwell Scientific, 1986. — DÉPARIS V., *Études sur le mouvement des plaques lithosphériques et recherches sur quelques aspects historiques de la dynamique terrestre*, Strasbourg, 1997 (thèse). — DIVE P., *La dérive des continents et les mouvements intratelluriques* (1933), rééd., Paris, Dunod, 1950. — FISHER O., *The physics of the earth's crust*, Londres, 1881. — HESS H.H., *History of ocean basins*, in ENGEL A.E.J. et al. éd., *Petrologic studies : a volume in honor of A.F. Buddington*, Boulder, Geological Society of America, 1962, p. 599-620. — HOLMES A., *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, 18, 1931, p. 559-606. — HOPKINS W., *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 129, 1839, p. 381-423. — LOPER D.E., *Jour. Geophys. Res.*, 90, 1985, p. 1809-1836. — PEKERIS C.L., *Monthly Notices Roy. Astron. Soc. Geophys. Suppl.*, 3, 1933, p. 343-367. — POIRIER J.-P., *Les profondeurs de la Terre*, Paris, Masson, 1991. — TACKLEY P.J. et al., *Nature*, 361, 1993, p. 699-704.

Vincent DÉPARIS

→ Dérive des continents ; Orogenèse ; Tectonique des plaques ; Terre.

COURNOT Antoine-Augustin, 1801-1877

Il se rêva philosophe, on le crut grand mathématicien, il a creusé son sillon le plus profond en économie. Né à Gray en 1801, élève dans une École normale supérieure agitée par les thèses libérales, auteur d'une thèse de physique remarquée, Cournot s'intéresse de près à la théorie naissante des probabilités, suscitant chez Poisson, qui le fait nommer professeur à Lyon, l'espoir d'un disciple. Le hasard d'une traduction le fait réfléchir au « travail des machines » et, par analogie, à la productivité du travail humain, ce qui le rapproche de beaucoup de ses condisciples, qui se projettent volontiers en ingénieurs du social.

Ses *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses* (1837) s'ouvrent d'ailleurs sur une référence explicite à cette vision réformatrice. Inaugurant l'utilisation rigoureuse des mathématiques en économie, l'ouvrage révolutionnera cette discipline. Cournot y développe une théorie des prix en fonction des structures de marché, dont il établit la classification. Les résultats obtenus continuent d'être enseignés en microéconomie. Ses fameuses « courbes de réaction », décrivant les comportements de deux

concurrents, joueront un rôle décisif en théorie des jeux... un siècle plus tard.

Découragé par le peu d'écho de son livre, Cournot revient aux probabilités, et rédige une *Exposition de la théorie des chances et des probabilités* (1843) qui fera référence pendant un siècle. Mais, tenté par d'autres voies, il entreprend une carrière d'inspecteur académique, tout en se livrant à sa passion profonde, la philosophie. Son *Essai sur les fondements de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique* (1851) propose une conception originale des processus cognitifs, entremêlant considérations sur le caractère cumulatif du savoir et analyses de la dynamique interne des sciences. Son goût de la fresque historique s'épanouit dans ses *Considérations sur la marche des idées et des événements dans les temps modernes* (1872), qui contient de beaux morceaux, souvent teintés de pessimisme, sur la succession des civilisations.

Presque aveugle, il n'en continue pas moins de suivre l'actualité scientifique, avec l'assistance d'un lecteur. *Matérialisme, vitalisme, rationalisme* (1875) propose une réflexion profonde sur les démarches respectives des sciences biologiques et physiques. Ces œuvres n'auront guère d'écho du vivant de Cournot. Son influence est posthume, et, aujourd'hui encore, on n'en a probablement pas pris l'exacte mesure.

● *Œuvres complètes*, Ribouet A. dir., Paris, Vrin, 1973-1978.

▶ CALLOT E., *La philosophie biologique de Cournot*, Paris, Rivière, 1960. — MÉNARD C., *La formation d'une rationalité économique : A.-A. Cournot*, Paris, Flammarion, 1978. — ROBINET A. & BRUN J. dir., *Études pour le Centenaire de la mort de Cournot*, Paris, Vrin, 1978. — VATIN F., *Économie politique et économie naturelle chez A.-A. Cournot*, Paris, PUF « Pratiques théoriques », 1998. — SAINT-SERNIN B., *Cournot, le réalisme*, Paris, Vrin, 1998.

Claude MÉNARD

→ Hasard ; Travail.

COUTURAT Louis, 1868-1914

Philosophe et logicien français, ancien élève de l'École normale supérieure (promotion 1887), reçu premier à l'agrégation de philosophie (1890), il entreprend ensuite des études mathématiques. Il soutient sa thèse consacrée à l'infini mathématique en 1896 devant un jury où siégeaient Émile Boutroux et Paul Tannery. De l'inspiration résolument kantienne de cette thèse, il se détacha en 1901 dans son célèbre ouvrage consacré à *La logique de Leibniz d'après des documents inédits*. Il développera sa critique de la philosophie kantienne dans un ouvrage publié en 1905, *Les principes mathématiques, avec un Appendice sur la philosophie des mathématiques de Kant*. Il consacra l'essentiel de son activité à la promotion de l'espéranto comme langue internationale. Il publie notamment en 1902 *Pour la langue internationale*. Militant pour un idéal pacifiste

de compréhension rationnelle entre les hommes, il meurt en 1914 dans un accident de la route entre Melun et Ris-Orangis le jour même de la déclaration de guerre.

Ami de Bertrand Russell, après avoir été l'élève de Lachelier et de Poincaré, Couturat, bien qu'il n'ait pas fait de carrière universitaire, a eu une influence notable sur nombre de philosophes et de mathématiciens. Il est aujourd'hui essentiellement connu comme éditeur et interprète de Leibniz, mais son manuel de 1905, *L'algèbre de la logique*, fut l'une des références explicite de Tarski, dans sa thèse de 1923, et d'autres logiciens polonais.

● *Correspondance sur la philosophie, la logique et la politique : Bertrand Russell/Louis Couturat, 1897-1913*, 2 vol., A. F. Schmid (dir.), Paris, Kimé, 2001. — *De l'infini mathématique*, Paris, Alcan, 1896. — *La logique de Leibniz*, Paris, Alcan, 1903. — *Les principes des mathématiques*, Paris, Alcan, 1905. — COUTURAT L. & LÉAU L., *Histoire de la langue universelle*, Paris, Hachette, 1903.

▶ *L'œuvre de Louis Couturat (1868-1914)... de Leibniz à Russell*, Paris, Presses de l'École normale supérieure, 1983 (coll.).

Dominique LECOURT

→ Infini ; Kant ; Leibniz ; Tarski.

CRÉATIONNISME

Pour des centaines de millions de croyants, en particulier juifs, chrétiens ou musulmans, le concept de création désigne l'acte par lequel Dieu produit l'univers et toutes les formes de vie qu'il contient, à partir de rien ; selon un sens dérivé, la même expression sert à nommer la réalité elle-même, l'ensemble des choses et des êtres créés (ou créatures). Toutefois, on réserve désormais le terme de créationnisme aux mouvements antiévolutionnistes, nés dans les milieux presbytériens et évangélistes nord-américains, au cours de la deuxième moitié du XIX^e s. Ces groupes refusent la vision évolutionniste du monde, élaborée en particulier par Charles Darwin et ses successeurs, selon laquelle les espèces vivantes et, plus largement, l'ensemble de la réalité seraient le résultat du lent travail de forces naturelles. Pour les créationnistes, au contraire, Dieu en est le seul auteur, d'une manière directe et indépendante des lois de la nature, comme les premiers chapitres du livre de la Genèse, écrits par Moïse sous l'inspiration directe de Dieu, le rapportent.

Contrairement aux revendications actuelles des créationnistes qui défendent le caractère avant tout scientifique de leurs idées, cet article voit dans la controverse entre créationnisme et évolutionnisme l'un des derniers avatars des rapports entre « Science et Foi » (selon l'expression consacrée). À côté d'une indispensable présentation historique, il se propose d'analyser les crises dont cette controverse serait un symptôme, crises à l'intérieur des Églises, entre les discours scientifiques

et les propos religieux, enfin dans la quête actuelle des origines du monde et de l'humanité. Auparavant, il a paru bon de présenter brièvement ce qu'entend par création la tradition chrétienne (au sein de laquelle sont nés les mouvements créationnistes dont il est essentiellement question ici).

Le dogme chrétien de la création

Le dogme de la création est la réponse faite par le christianisme à la question de l'origine des choses. Si créer c'est amener à l'être et à partir du néant une réalité nouvelle, confesser que Dieu est le « Créateur du ciel et de la terre », c'est confesser que « la création, dans la créature, n'est qu'une certaine relation avec le Créateur » (Thomas d'Aquin). Cette relation confère à toute chose son origine, au sens d'être originaire de comme à celui d'être originale ; il s'ensuit que c'est à tout moment et pas seulement lors de son commencement que l'univers reçoit de Dieu ce qui fait la réalité de sa création, à savoir son être. À la question de l'origine des choses, la tradition biblique puis chrétienne (c'est-à-dire « tout ce qui contribue à conduire saintement la vie du peuple de Dieu et à augmenter la foi ») et pas uniquement les Écritures, cf. concile Vatican II) ne répond donc pas en proposant des lois d'explication du monde, mais en introduisant un sens que par elle-même et en vertu de ses propres lois la nature ne saurait appréhender.

La Bible offre plusieurs passages essentiels à la compréhension théologique de cette relation de dépendance entre le Créateur et ses créatures. À côté des onze premiers chapitres du livre de la Genèse (de l'œuvre des six jours, ou *hexaméron*, à l'épisode du Déluge), qui cherchent en particulier à se différencier de l'héritage des cosmogonies du Moyen-Orient, doivent être mentionnés les nombreux textes prophétiques qui évoquent la création comme la garantie de la toute-puissance et de la fidélité de Dieu (Amos, Jérémie, Isaïe). Si, dans les Psaumes, la création donne l'occasion de louer la grandeur et la bonté de son auteur, les écrits de sagesse (Job, Ecclésiaste, etc.) s'intéressent plutôt au jeu des causes et des lois du monde, ainsi qu'au plan de Dieu qui demeure en partie caché à l'esprit humain. Le Nouveau Testament reprend l'idée d'une continuation de l'histoire de la création dans celle du peuple hébreux, puis de l'Église chrétienne. Même s'ils n'échappent pas à l'ambiguïté du créé (marqué par la déchéance et la mort en même temps que présenté comme moyen de s'élever à Dieu), les textes néotestamentaires inscrivent la création au cœur de la profession de foi en Jésus-Christ, Verbe de Dieu par qui et pour qui tout est créé ; enfin, l'espérance eschatologique s'articule directement à la confession du Christ Pantocrator, Christ cosmique qui récapitule en lui l'histoire de tout le créé.

Jusqu'à la fin du XVIII^e s., la science occidentale a travaillé avec une conception fixiste des espèces vivantes, idée qui s'accordait sans difficulté avec la confession chrétienne d'un Créateur : « Toutes les espèces tiennent

leur origine de leur souche, en première instance, de la main même du Créateur Tout-Puissant, car l'Auteur de la Nature, en créant les espèces, imposa à ses créatures une loi éternelle de reproduction et de multiplication dans les limites de leur propre type » (Linné, 1737). Les travaux de Charles Bonnet, Pierre de Maupertuis, Jean-Baptiste Lamarck mettent en question l'idée de fixité des espèces ; ceux de Charles Darwin marquent en plus la fin de cet accord entre l'histoire naturelle et la tradition chrétienne, et la naissance de courants antiévolutionnistes.

Historique.

Les mouvements créationnistes ne sont nés aux États-Unis ni par hasard ni à partir de rien ; ils constituent de fait un élément de la révolution scientifique et académique qui a touché les États-Unis au cours de la seconde moitié du XIX^e s. Jusqu'en 1850 règne une espèce d'harmonie intellectuelle entre religion, philosophie et science, grâce en particulier à l'influence d'un courant philosophique réaliste, hérité de l'Écossais Thomas Reid (*Scottish Common Sense Realism*). Trois sources de la connaissance sont admises : la raison qui établit les liaisons entre les idées, la nature qui les lui fournit, la Révélation des Écritures qui offre un savoir incontestable articulé à un positivisme théologique. La période qui suit la guerre de Sécession (1861-1865) est caractérisée par une forte professionnalisation des universitaires et des scientifiques ; c'est l'époque où la licence et le doctorat (Ph. D.) sont mis en place. Ainsi s'opère une véritable sécularisation de la science, les chercheurs et les enseignants revendiquant une liberté de jugement et d'appréciation, surtout à l'égard des croyances religieuses. Dans le même temps, la Bible est devenue l'objet d'études critiques, directement inspirées des méthodes appliquées pour l'étude des textes profanes. Julius Wellhausen propose sa division du Pentateuque selon quatre sources différentes (yahviste, élohiste, deutéronomiste et sacerdotale) ; des récits semblables à celui du livre de la Genèse sont retrouvés dans d'autres civilisations du Moyen-Orient ancien (*Enuma Elish, Gilgamesh*). Dans ce contexte, la publication par Charles Darwin de son ouvrage *De l'Origine des espèces*, en 1859, et les débats qu'il suscite en Angleterre puis en Europe trouvent rapidement un écho sur le sol nord-américain.

Darwin y possède d'ardents défenseurs, comme Asa Gray. Ce biologiste chrétien associe sans difficulté les forces propres au vivant à celles d'origine divine : là où ses collègues ne voient que du hasard, il discerne le dessein de Dieu. Mais les opposants ne manquent évidemment pas non plus : Louis Agassiz, un disciple de Georges Cuvier qui défend l'existence de créations spéciales et de glaciations successives, accuse Darwin d'abandonner l'idée que les espèces sont de véritables « pensées de Dieu ». Bien plus, n'est-ce pas la véracité de la Bible elle-même qui est mise en question par le savant anglais et ses partisans, et avec elle les valeurs

morales les plus fondamentales ? C'est du moins ce qu'affirment les courants fondamentalistes.

Apparue en 1920, l'expression de « fondamentalisme » désigne un courant théologique dont l'origine remonte à 1876, l'année où un groupe de pasteurs lança les Prophecy Conferences. Le fondamentalisme ne prône pas seulement l'inspiration littérale et même verbale de la Bible ; il défend également, comme son nom l'indique, les fondements doctrinaux confessionnels que sont : les miracles réalisés par le Christ, sa naissance virginale et sa divinité, sa résurrection et son retour, la valeur rédemptrice de son sacrifice sur la Croix, l'éternité des peines de l'enfer, le règne de mille ans. Cette dernière affirmation est défendue par la World Christian Fundamental Association, une organisation fondamentaliste millénariste créée en 1919. C'est la même année que William J. Bryan lance un mouvement de résistance non seulement à l'évolutionnisme, mais également aux courants modernistes en général. Politiquement progressiste, ce triple candidat à l'élection présidentielle défend un idéal démocratique : si le pouvoir législatif a pour charge d'éviter les comportements néfastes et les abus sociaux, le pouvoir de décider ce qui doit être enseigné dans les écoles, entre l'évolution et la création, revient au peuple. « Celui qui conçoit la thèse évolutionniste, écrit-il en 1922, donne à l'étudiant une famille vieille de trois millions d'années – et le laisse ensuite aller à la dérive, avec une capacité infinie à faire le bien et le mal, sans aucune lumière pour le guider, sans compas pour lui indiquer la route, sans carte sur l'océan de la vie. » Sous l'influence de Bryan, trente-sept projets de loi visant à interdire l'enseignement de l'évolution dans les collèges et les établissements du secondaire sont déposés entre 1921 et 1937. Les États du Tennessee (1925), du Mississippi (1926), de l'Arkansas (1928) et du Texas (1929) mettent effectivement ces lois en vigueur, et c'est dans le premier d'entre eux que se déroule en 1925 ce que l'on a désormais coutume d'appeler le « Procès du singe ». L'ACLU (American Civil Liberties Union), la plus puissante organisation américaine de défense des droits civiques, cherche à cette époque à mettre à l'épreuve l'efficacité des lois antiévolutionnistes en provoquant un procès exemplaire. Un jeune enseignant de Dayton (Tennessee), John T. Scopes, accepte de servir de cobaye, autrement dit de se faire inculper pour avoir enseigné le darwinisme ; l'ACLU s'est engagée à fournir les secours d'un avocat ainsi qu'un soutien financier. Le procès a lieu du 10 au 21 juillet 1925 et, grâce à l'ACLU et à la presse, il est largement connu du public. Clarence Darrow, un avocat libéral et agnostique, se présente comme le défenseur de la liberté de penser et d'enseigner, tandis que Bryan soutient le droit du peuple aux valeurs traditionnelles. Scopes est finalement condamné à une amende de cent dollars ; mais surtout, on l'enjoint à conformer son enseignement au désir populaire exprimé par la loi fédérale et à ne plus y introduire les idées évolutionnistes.

Le succès des antiévolutionnistes est toutefois de

courte durée : d'une part, le mouvement créationniste est apparu sous un jour peu reluisant, celui de l'obscurantisme, bigot et raciste, partisan de la résistance au progrès de la science et de la civilisation ; d'autre part, Bryan meurt quelques jours après l'issue du procès de Dayton et, sans son charisme, le mouvement perd une grande part de son élan. L'action de Bryan se révèle pourtant efficace dans le temps : sous l'effet de pressions incessantes venues des milieux créationnistes, les maisons d'édition, au cours des années 1930 puis 1940, évitent les références évolutionnistes dans les manuels de biologie. Il n'est pas rare, à cette époque, d'y trouver des mentions selon lesquelles « aujourd'hui la théorie de Darwin, comme celle de Lamarck, n'est plus généralement admise » (1933). La prudence économique des éditeurs (surtout en période de crise) et la faible compétence des rédacteurs de manuels (le plus souvent des professeurs de collège et non des universitaires) sont les principales causes de la trêve qui marque l'histoire du conflit entre créationnisme et évolutionnisme, de la fin des années 1920 à la fin des années 1950, plutôt en faveur du premier.

Aussi étrange que cela puisse paraître (mais tous les historiens le confirment), c'est le lancement du premier Spoutnik soviétique, le 4 octobre 1957, qui rompt cette trêve et suscite un renouveau de l'enseignement évolutionniste. Contraints de reconnaître leur retard technologique et scientifique, les États-Unis décident de lancer de vastes programmes de recherche et d'enseignement. Deux d'entre eux, dans le domaine de la biologie, concernent plus directement les questions évolutionnistes : *BSCS (Biological Sciences Curriculum Study)*, qui offre aux étudiants les bases de la biologie moderne, et *MACOS (Man, a Cause Of Study)*, qui relie la biologie et les sciences sociales. Faisant fi des lois antiévolutionnistes des années 1920, les manuels édités dans le cadre de ces programmes et destinés aux *high schools* sont clairement évolutionnistes. Ils n'en reçoivent pas moins l'imprimatur fédérale : l'évolutionnisme est désormais accepté par la société nord-américaine, qui n'y voit plus de danger pour la religion et la morale. D'ailleurs, en 1968, la loi antiévolutionniste de l'Arkansas est déclarée anticonstitutionnelle ; d'autres États suivent cet exemple après 1970.

L'heure est-elle sinon à la défaite des créationnistes, du moins aux concessions ? La création, en 1941, d'un groupe de chrétiens évangélistes, tous diplômés en science, qui désirent répondre en tant que croyants aux défis lancés par le développement des sciences et des techniques, aurait pu en constituer un signe avant-coureur : au sein de l'American Scientific Affiliation (ASA), on accepte volontiers l'idée d'une évolution compatible avec la foi en la création (*theistic evolutionism*). Mais un tel compromis est inacceptable pour des hommes comme Henry M. Morris. Aux yeux de ce dernier, si le créationnisme ne peut plus être défendu, devant la justice, avec les mêmes arguments que du temps du Procès du singe, et si l'enjeu du conflit repose désormais sur la question de l'autonomie de la science, alors il convient de proposer un autre discours

scientifique qui soit, quant à lui, en harmonie avec les propos créationnistes et refuse toute concession aux idées évolutionnistes. En 1963, avec Walter E. Lamertts, William J. Tinkle, Duane T. Gish et six autres créationnistes, Morris fonde la Creation Research Society (CRS), dont le but est de montrer comment les récits de la Genèse non seulement sont compatibles avec la science mais le sont même davantage que la biologie et la cosmologie évolutionnistes contemporaines. Dix ans plus tard, la société compte 450 membres et plus de 1 600 sympathisants. Elle publie, depuis 1964, la revue *Creation Research Society Quarterly* et possède, depuis 1974, sa propre maison d'édition : Creation-Life Publishers. En 1972, la fondation de l'Institute for Creation Research (ICR), à San Diego, offre au mouvement créationniste une structure permanente de recherche et publication. L'ICR diffuse un programme radiodiffusé hebdomadaire, « Science, Écriture et Salut », par l'intermédiaire de 90 stations dans 35 États ; la lettre mensuelle *Acts and Facts* est tirée à 75 000 exemplaires. Sans oublier la fondation d'un musée de la Création et de l'Histoire de la terre.

Depuis la disparition des lois antiévolutionnistes, toute tentative d'accuser l'enseignement du néodarwinisme pour son caractère anticonstitutionnel et socialement dangereux est vouée à l'échec. Les créationnistes adoptent donc une stratégie moins revendicative et réclament avant tout une égalité de traitement des théories créationniste et évolutionniste (*balanced treatment*). Les propos de Ronald Reagan, au cours de sa seconde campagne présidentielle, résument cette revendication : « La communauté scientifique ne croit plus désormais [à la théorie de l'évolution] comme elle y croyait auparavant. Mais elle continue à être enseignée dans les écoles ; alors je crois que la théorie de la Bible sur la création, qui n'est pas une théorie mais l'histoire biblique de la création, devrait être aussi enseignée. » La tactique adoptée par les créationnistes se révèle efficace : en 1981, les États de Louisiane et d'Arkansas adoptent une loi en faveur du traitement équivalent de la « science évolutionniste » et de la « science créationniste » dans l'enseignement public. Ces mesures sont à l'origine d'un nouveau Procès du singe.

Si les protagonistes de cette nouvelle affaire, encore appelée McLean versus Arkansas Board of Education, sont sensiblement les mêmes (l'ACLU se porte une fois encore partie civile), l'issue en est différente. Le 5 janvier 1982, le juge William R. Overton déclare anticonstitutionnelle l'Act 590 qui demandait l'application pour l'Arkansas de la loi « pour un enseignement équivalent du créationnisme et de l'évolutionnisme » (*Balanced Treatment for Creation-Science and Evolution-Science Act*), une décision qui avait été pourtant approuvée par les instances législatives (Sénat et Chambre des représentants) de cet État et signée par le gouverneur. Les propos créationnistes, déclare le juge, ne constituent en fait qu'une doctrine religieuse et l'Act 590 une tentative visant à introduire un propos

religieux au sein de l'enseignement public. Cet *Act* doit donc être abrogé, pour contenu anticonstitutionnel, au nom de la liberté religieuse. Il faut néanmoins noter que la loi équivalente, promulguée par la Louisiane, n'y est abrogée que le 19 juin 1987.

Si les créationnistes ont perdu une bataille, ils ne s'avouent pas pour autant vaincus. Profitant du vide juridique, ils continuent à faire pression auprès des administrations scolaires et des organisations de parents d'élèves, non sans succès, puisque l'on estime que les groupes fondamentalistes chrétiens contrôlent aujourd'hui les conseils d'administration de plus de 2 000 écoles américaines. Le monde politique constitue toujours un lieu d'affrontement, grâce aux soins de la Christian Coalition, une partie de la droite chrétienne ; en 1996, le républicain Pat Buchanan lance à son auditoire : « Vous pensez sans doute descendre du singe. Moi, je pense que vous êtes une créature de Dieu. » Dans le même temps, le combat s'est porté dans d'autres pays.

C'est le cas de l'Australie, une ancienne colonie britannique où la religion peut être enseignée dans les écoles : la Creation Science Foundation, créée en 1980 par le Dr Wieland, y poursuit une politique efficace de publication (*Creation ex nihilo*, *Creation Science Prayers News*, etc.). À tel point qu'au printemps 1997, Ian Pilmer, un professeur de géologie de Melbourne, intente un procès devant le Tribunal fédéral d'Australie à Allen Roberts, fondateur de la société Ark Search Inc. Ce dernier affirme en effet avoir retrouvé les restes de l'arche de Noé, preuve de la véracité du récit biblique ; et c'est au nom de la « protection du consommateur » que Pilmer entend faire condamner Roberts et ses « aéneries ».

Ailleurs, en particulier en Europe, les mouvements créationnistes chrétiens paraissent plus limités. Les débats n'en existent pas moins pour définir le statut qu'il convient de donner à l'idée de création ; les Pays-Bas se sont clairement prononcés en faveur d'un cloisonnement strict entre le domaine scientifique (l'évolution y est enseignée comme le paradigme central de la biologie contemporaine) et le domaine religieux, seul susceptible d'accueillir l'enseignement de la création. L'Angleterre connaît elle aussi ce genre de débat. Par ailleurs, c'est en Suisse que se trouve le Centre biblique européen, qui assure la traduction en français et la publication des principaux ouvrages d'obédience créationniste.

Patrie de Lamarck et profondément marquée par une séparation entre l'Église et l'État, la France échappe aux débats publics entre évolutionnistes et créationnistes. Ces derniers ne sont toutefois pas totalement absents. Ainsi, le Cercle d'étude historique et scientifique (CESHE), fondé en 1971 et annonçant 600 membres, s'inspire de la pensée de Fernand Crombette pour rejeter « toutes les thèses actuelles ou à venir explicitement hostiles à la Bible, comme l'évolutionnisme, les chronologies longues dans l'histoire des hommes et dans celle de la terre, le freudisme » ; « la séparation de la science et de la foi, aujourd'hui à son

terme, a entraîné l'athéisme moderne et cette laïcisation progressive des sociétés, dont les terribles conséquences morales sont visibles par tous ». L'usage que font les membres de ce Cercle des textes de l'Église laisse songeur quant à leur compréhension du sens théologique de la création.

Addendum : Le judaïsme et l'islam n'échappent pas au débat entre créationnisme et évolutionnisme. Dans les milieux orthodoxes juifs, certains rabbins n'hésitent pas à rejeter une science qui met en doute une création de l'univers et de l'être humain directement à l'âge adulte. En 1988, l'Association des scientifiques juifs orthodoxes a publié un recueil d'articles intitulé : *Challenge. Torah Views on Science and its Problems* ; on peut y lire l'affirmation selon laquelle l'univers est vieux de 5 735 années, auxquelles s'ajoutent les six jours de la création. Dans le même temps, le Congrès juif américain, l'Union des congrégations juives américaines et le Comité juif américain se sont joints au groupe des mouvements religieux qui a soutenu l'ACLU dans le procès de 1982.

Le monde arabe présente la particularité suivante : le darwinisme y a constitué, depuis le début du XX^e s., un élément important des luttes engagées pour moderniser la pensée et la société, en particulier dans les écrits de Sibli Sumayyil et de Salama Moussa. Aujourd'hui encore, si plusieurs universitaires de l'université d'Al-Azhar, au Caire, prônent pragmatisme, prudence et ouverture à l'égard des idées évolutionnistes (n'est-ce pas Allah qui a créé le processus de l'évolution ?), ces positions sont condamnées par les autorités religieuses et valent à leurs auteurs d'être accusés d'anarchie.

La controverse créationniste, au cœur des relations entre Science et Foi

Comme ses racines et son développement historique le suggèrent, la controverse entre créationnistes et évolutionnistes est la manifestation ou le symptôme de plusieurs types et lieux de tension, voire de crise, au sein des sociétés occidentales contemporaines.

Le premier de ces lieux est le christianisme lui-même, dans la diversité de ses communautés confessionnelles : Églises officielles (Église épiscopale, Église presbytérienne, Église catholique romaine, etc.), ou Églises dites libres et individuelles qui caractérisent en particulier la culture nord-américaine. Tandis qu'en Europe la vie ecclésiale se trouve sous l'autorité d'une hiérarchie donnée, catholique ou protestante (ces hiérarchies étant souvent régies par l'élite culturelle, voire économique et politique), dans les pays d'Amérique du Nord, les responsables des principales Églises, qu'ils soient ecclésiastiques ou théologiens, n'ont qu'une autorité extrêmement réduite sur ce que l'on pourrait appeler la religion populaire.

C'est probablement là une des sources des mouvements fondamentalistes dont le propos n'est pas tant de s'inscrire dans une tradition pluri-séculaire, pour participer à son élaboration et à sa transmission, que de

définir les fondements les plus stricts de la croyance et de les conserver obstinément. La place centrale conférée à l'inhérence comme à l'inspiration littéraire, voire verbale, des Écritures conduit les fondamentalistes à adopter une attitude concordiste à l'égard du texte sacré. Le concordisme, plus ancien que le fondamentalisme, atteste du besoin d'unité propre à l'esprit humain : les données de la Bible ne sauraient être contredites par les acquisitions de la science ; celles-ci doivent donc s'y plier ou au moins s'y accorder (ainsi des ères géologiques que l'on dit correspondre aux jours de la création selon la Genèse, ou des théories catastrophistes qui s'inspirent du récit du Déluge).

Les attitudes des Églises catholique et protestantes à l'égard des Écritures, dans leur rapport avec la tradition, sont certes variées. Elles s'accordent toutefois pour faire place à l'interprétation et à l'exégèse des textes sacrés, tout en leur conférant une autorité essentielle comme Parole de Dieu. Pour l'Église catholique, en particulier, « la sainte Tradition, la sainte Écriture et le magistère de l'Église, par une très sage disposition de Dieu, sont tellement reliés et solidaires entre eux qu'aucune de ces réalités ne subsiste sans les autres » (concile Vatican II). La controverse créationniste souligne ainsi combien restent d'actualité les questions de rapport d'autorité entre la Bible, la tradition et les instances ecclésiastiques.

Le deuxième lieu de tension se situe dans la relation entre les discours scientifiques et les propos religieux, autrement dit entre « Science et Foi ». Cette tension a une longue histoire, en particulier en Occident chrétien. Après avoir suscité la méfiance des Pères de l'Église, la science, à partir d'Augustin d'Hippone, est adoptée comme un auxiliaire de la théologie ; ce qui signifie qu'elle doit s'inscrire au sein d'une conception du monde imposée par les théologiens. La science moderne, avec la figure mythique de Galilée (condamné en 1633), revendique au contraire une pleine autonomie, revendication à laquelle les Églises ont souvent répondu par l'immobilisme et le rejet. Comment expliquer qu'une telle tension existe encore à la fin du XX^e s. ? Faut-il en faire porter la responsabilité aux courants fondamentalistes ou traditionalistes, dont les créationnistes ne sont pas les seuls représentants ?

Il convient de rappeler ici deux distinctions parallèles et essentielles : d'une part entre le dogme de la création (cf. *supra*) et les revendications des créationnistes, d'autre part entre la recherche scientifique et les affirmations, voire les idéologies, qui s'en inspirent. Passer outre ces distinctions, c'est non seulement faire preuve d'un manque d'esprit critique, autrement dit de dogmatisme, mais également verser dans l'une de ces attitudes que l'on qualifie, selon les cas, d'intégrisme, de sectarisme ou de réductionnisme. Nul besoin d'illustrer davantage le caractère dogmatique et intégriste du créationnisme : il refuse tout autant une critique littéraire de la Bible qu'une critique scientifique des données géologiques ou paléontologiques et cherche à instaurer une vision de la personne et de la société humaine bien spécifique. Quant au domaine

scientifique, sans même évoquer les idéologies et les politiques qui, dans le passé, se sont réclamées de l'évolutionnisme, et quelle que soit la prudence de Darwin à l'égard des fondements religieux de la société, il n'est pas non plus exempt du genre d'attitude évoqué ci-dessus. Est-il possible de dire autre chose d'un propos comme celui du sociobiologiste Edward O. Wilson, lorsqu'il affirme : « Le comportement humain – comme les capacités les plus profondes dans l'ordre des réponses émotionnelles qui le dirige – correspond à la technique détournée par laquelle le matériel génétique humain est (et sera) gardé intact. Aucune autre fonction ultime de la morale ne peut être envisagée » (*On Human Nature*) ? Plus généralement, on pourra penser à ce que l'on nomme communément le scientisme.

Évaluer ou hiérarchiser ces deux types d'attitude reste difficile. Certes, le dogmatisme religieux est plus ancien que celui issu de la science ; mais l'on sait qu'aujourd'hui c'est au savant et non plus au prêtre que la plupart des gens demandent des explications capables de répondre à leur angoisse existentielle ou à leur quête des origines. Dès lors, religieux fanatiques et savants tentés par le scientisme se retrouvent dos à dos, d'une part dans une probable méconnaissance des modes de pensée et d'interprétation de leurs adversaires, d'autre part dans une prétention illusoire à détenir la vérité quant à l'origine de l'humanité.

Car cette question est bien le troisième lieu de crise dont la controverse entre créationnisme et évolutionnisme constitue un symptôme. Dans de nombreux discours religieux et scientifiques apparaît la prétention à posséder la réponse unique et définitive à l'antique interrogation de l'esprit humain, celle de son origine. Alors que le développement des sciences et des techniques paraît plus que jamais amener l'homme à reconnaître « qu'il est seul dans l'immensité indifférente de l'Univers d'où il a émergé par hasard. Non plus que son destin, son devoir n'est écrit nulle part. À lui de choisir entre le Royaume et les ténèbres » (Jacques Monod), les sociétés occidentales ne se contentent plus de la séparation, héritée de l'époque moderne, entre le « pourquoi ? », réservé à la religion, et le « comment ? », réservé à la science. Pas plus d'ailleurs que de décisions de justice qui entérinent une telle séparation. Au-delà des dérives dogmatiques, intégristes ou réductionnistes, les enjeux auxquels science et religion ne peuvent échapper et qui transparaissent dans les controverses entre créationnisme et évolutionnisme relèvent en fin de compte des deux registres suivants : 1) celui de l'épistémologie et de la philosophie : quelle place est accordée aux questions du temps et de l'histoire, du sens et de la contingence ? 2) celui de l'éthique et du politique : ni la religion ni la science ne peuvent se prétendre neutres dans les affaires humaines. Comment les sociétés humaines articulent-elles ces deux champs à ceux de la philosophie ou de l'art, pour se construire et répondre, certes partiellement mais du moins honnêtement, à leur quête de l'identité de l'homme et de son origine ?

► ARNOULD J., *Les Créationnistes*, Paris, Le Cerf/Fides « Bref », 1996. — ECKER R.L., *Dictionary of Science and Creationism*, Buffalo (NY), Prometheus Books, 1990. — GILKEY L., « La Question créationniste. Point de vue théologique », *Concilium*, 1983, n° 186, p. 97-120. — GISH D.T., *Evolution. The Fossils Say No!*, San Diego, Creation-Life Publ., 1973. — GOLDING G., *Le Procès du singe. La Bible contre Darwin*, Bruxelles, Complexe, 1982. — LECOURT D., *L'Amérique entre la Bible et Darwin*, Paris, PUF « Science, histoire et société », 1992. — NUMBERS R.L., *The Creationists*, New York, A.A. Knopf, 1992. — WHITCOMB J.C., *Origines. Introduction au créationnisme biblique*, Lugny, Comprendre Les Écritures, 1989 ; *Le Monde qui a péri. Une introduction au catastrophisme biblique*, Lausanne, Centre Biblique Européen, 1992. — WHITCOMB J.C. & MORRIS H.M., *The Genesis Flood. The biblical records and its scientific implications*, Grand Rapids (MI), Baker Book House, 1976. — WHITE A.J.M., *Évolution. Un mythe croulant. Arguments scientifiques en faveur de la Création*, Lausanne, Centre Biblique Européen, 1983.

Jacques ARNOULD

→ Darwinisme ; Espèce ; Évolutionnisme ; Génération spontanée ; Vivant (Théorie du).

CRICK Francis, né en 1916

Biologiste anglais, lauréat avec James D. Watson et Maurice Wilkins du prix Nobel de physiologie et de médecine en 1962 pour l'élucidation de la structure de la molécule d'acide désoxyribonucléique (ADN). La structure proposée pour l'ADN, une double hélice constituée de deux brins complémentaires, suggère aussitôt un mécanisme pour le rôle que cette molécule était connue pour jouer comme support de l'hérédité : les deux brins de la molécule, en se dissociant, peuvent reconstituer chacun une double hélice par formation d'une structure qui leur est complémentaire. La possibilité d'un dédoublement simple du support étant précisément le phénomène attendu pour la base matérielle de l'hérédité, cette élucidation constitue l'un des cas les plus nets dans lesquels une structure permet de rendre compte d'une fonction biologique. Par la suite, Francis Crick s'est intéressé à la dynamique des génomes et plus tardivement à la neurobiologie en proposant ou en reprenant à chaque fois des hypothèses hardies, au moins sur le plan sémantique : ADN égoïste, tests génétiques chez les nouveau-nés.

● *Une vie à découvrir : de la double hélice à la mémoire*, trad. fr. A. Gerschenfeld, Paris, O. Jacob, 1989. — *La vie vient de l'espace*, trad. fr. R. Bernex, Paris, Hachette, 1982. — *L'hypothèse stupéfiante : à la recherche de l'âme*, Paris, Plon, 1994.

Pascal NOUVEL

→ ADN ; Biotechnologies ; Génétique ; Information ; Watson.

CRISE DE LA PHYSIQUE MODERNE

Le recueil publié en 1905 par Henri Poincaré (1854-1912) sous le titre de *La valeur de la science* présente dans sa deuxième partie une brève histoire de

la physique moderne. La catégorie épistémologique majeure de cette histoire se trouve être celle de « crise ». La physique dite des forces centrales, explique Poincaré, fut la fille, au XVIII^e s., de la mécanique céleste. Elle concevait l'univers astronomique comme formé de masses séparées par des distances immenses. Ces masses, qui pouvaient ainsi être considérées comme des points matériels, étaient dites s'attirer en raison inverse du carré des distances. Et si nos sens étaient assez subtils, le spectacle qui s'offrirait sur Terre au physicien serait à peine différent, pensait Poincaré. Les atomes tiendraient lieu d'étoiles dans l'infiniment petit. On les verrait, comme ces derniers, s'attirer et se repousser selon la droite qui les joint. On découvrirait que cette attraction ou répulsion dépend exclusivement de la distance. Sans doute la loi qui la régit n'est-elle pas la loi de Newton, mais on doit la supposer de la même forme. Pourtant, une « crise », ajoute Poincaré, s'est ouverte du jour où cette physique des forces centrales « n'a plus paru suffisante ». Ce jugement en forme de constat porte l'écho d'un demi-siècle de débats qui ont donné consistance à ce que leurs protagonistes ont précisément appelé eux-mêmes la « crise de la physique moderne », épisode trop oublié de l'histoire des sciences contemporaines.

La déclaration de crise, c'est d'abord de la part de tous les physiciens la proclamation que l'unité de la physique s'est perdue. Une unité évoquée avec nostalgie par tous ceux, savants et philosophes, qui ont vécu et réfléchi les événements de l'époque : il leur semble, à tous, que jusqu'au temps où s'est ouverte ladite crise, la physique vivait des jours paisibles parce que, sûre de ses principes, elle se contentait de développer sur leur base un édifice harmonieux, sans faille ni lézarde.

Cette unité, dans leur esprit, obéissait à un principe fondamental : la physique tout entière était pensée comme un prolongement de la mécanique. Au point qu'Abel Rey a pu écrire : « La physique classique jusqu'à la période contemporaine tendait à être une promotion de la mécanique analytique de Lagrange. La physique était traditionnellement exposée à partir de cette mécanique, et en supposant d'abord les abstractions que comporte cette mécanique. Il s'agissait essentiellement de présenter une théorie des phénomènes naturels, en évitant d'introduire autant que possible des éléments nouveaux à côté de ces éléments considérés comme les éléments les plus simples, les plus clairs auxquels nous fasse remonter la considération de la nature matérielle. La mécanique rationnelle établissait donc les conditions nécessaires et suffisantes de l'explication physique » (*Théorie de la physique*, p. 28-29).

On trouverait des textes concordants dans *La mécanique* d'Ernst Mach (1838-1916), comme dans *La science et l'hypothèse* de Poincaré. Abel Rey désigne les deux points qui lui semblent, d'après ses lectures scientifiques, caractéristiques de cette mécanique : a. Elle a pour objets « les lois qui régissent les changements locaux, les variations de position dans l'espace,

et seulement ces variations ; le mouvement, au sens courant du mot ». Il cite alors Auguste Comte (1798-1857), qui écrivait : « Elle se borne à envisager le mouvement en lui-même, sans s'enquérir de quelle manière il a été déterminé. Ainsi les forces ne sont autre chose, en mécanique, que les mouvements produits ou tendant à se produire » ; b. Ceci posé, trois principes établissent les relations les plus générales que l'on puisse envisager entre les corps ainsi considérés et les forces qui agissent sur eux, c'est-à-dire les mouvements qu'ils sont susceptibles de prendre : 1) la loi d'inertie qui veut que tout corps soumis à l'action d'une force unique, qui agit sur lui instantanément, se meut constamment en ligne droite et avec une vitesse uniforme ; 2) la loi de l'égalité constante et nécessaire entre l'action et la réaction qui veut que toutes les fois qu'un corps est mû par un autre d'une manière quelconque, il exerce sur lui, en sens inverse, une réaction telle que le second perd, en raison des masses, une quantité de mouvement exactement égale à celle que le premier a reçue ; 3) la loi d'indépendance des mouvements coexistants, qui veut que le mouvement général d'un système n'altère point les mouvements relatifs de ses parties.

De là la formulation comtienne du problème général de la mécanique comme suit : « Déterminer l'effet que produiront sur un corps donné différentes forces quelconques agissant simultanément, lorsqu'on connaît le mouvement simple qui résulterait de l'action isolée de chacune d'elles ; ou, en prenant la question en sens inverse, déterminer les mouvements simples dont la combinaison donnerait lieu à un mouvement supposé connu » (*Cours de philosophie positive*, éd. Schleicher, t. I, p. 451).

La première formule est celle de la statique, la seconde celle de la dynamique. Or, sur la base du principe de d'Alembert, qui établissait que toute recherche relative au mouvement d'un corps ou d'un système de corps pouvait être convertie immédiatement en un problème d'équilibre, Louis de Lagrange (1736-1818) avait réussi, dans son célèbre *Traité de mécanique analytique* (1788) à ramener la dynamique à la statique. Mach dans *La mécanique* (p. 436) célèbre ce succès : « C'est enfin Lagrange qui a porté la mécanique analytique à son plus haut degré de développement. Dans *La mécanique analytique*, il s'appliqua à faire, une fois pour toutes, toutes les démonstrations nécessaires et à condenser le plus possible de choses dans une seule formule. » Auguste Comte avait trouvé des termes aussi enthousiastes qu'imprudents pour tirer les leçons de l'événement : « La dynamique rappelée à la statique, l'ensemble de la science put acquiescer un caractère d'unité désormais irrévocable. [...] Telle est la révolution éminemment philosophique exécutée par Lagrange, dont la conception fondamentale servira toujours de base à tous les travaux ultérieurs des géomètres sur les lois de l'équilibre et du mouvement » (CPP, t. I, p. 556).

De là une théorie apparemment complète et cohérente de l'univers matériel, consistant dans l'appli-

cation de ces principes aux trois états de la matière — solide, liquide et gazeux.

Pour l'état gazeux, en particulier, la théorie qui se « déduit » de la mécanique rationnelle c'est la théorie cinétique des gaz telle qu'elle avait été fondée par Daniel Bernoulli (1700-1782). Il suppose que les gaz sont constitués de sphères de très petit diamètre par rapport à la distance séparant deux sphères voisines. Chaque sphère est censée se mouvoir en ligne droite d'un mouvement uniforme jusqu'à la rencontre d'un obstacle extérieur (paroi ou autre sphère). Au point de cette rencontre, la sphère rebondissait en obéissant, selon lui, aux lois du choc des corps élastiques ; ces lois, entraînant des variations de vitesse, expliquaient l'instabilité de l'équilibre des gaz. De là aussi une théorie de la chaleur identifiée à la force vive résultant des mouvements insensibles des molécules d'un corps ; elle serait, selon Hermann von Helmholtz (1821-1894), la somme des produits de la masse de chaque molécule par le carré de sa vitesse. De même les phénomènes électriques semblaient pouvoir s'expliquer par des principes de mécanique. Restait, pour épuiser le champ des sciences physico-chimiques, à donner une interprétation mécaniste des modifications chimiques. C'est ce que commençait clairement à réaliser la théorie des poids atomiques, les différences qualitatives des corps composés pouvant être réduites à des différences de constructions moléculaires.

Telle apparaît donc, brièvement présentée, aux yeux des physiciens, la physionomie des sciences physiques vers le milieu du XIX^e s., leurs résultats les plus assurés comme leurs problèmes les plus urgents. « Une mécanique définitive, la mécanique analytique de Lagrange, une physique entièrement construite sur cette mécanique. Le tout se reliant, par le biais de la cinétique, à la belle ordonnance de la géométrie euclidienne » (A. Rey).

Cette représentation va être ébranlée, puis mise en ruine par un certain nombre de découvertes importantes faites à partir des années 1850. C'est cet ébranlement puis cet écroulement qui vont constituer les éléments de ce que les savants de la fin du siècle appelleront presque unanimement la « crise » de la physique, voire de « la science ».

La première de ces découvertes, qui est aussi la plus importante et marque ce qu'on pourrait appeler proprement l'ouverture de la crise, réside dans la destruction brutale et inattendue de la vieille théorie du calorique — fluide substantiel auquel on assimilait la chaleur — et la fondation d'une discipline nouvelle, la thermodynamique. Cette science doit le jour à un mémoire de Sadi Carnot (1796-1832), dont l'importance a été découverte avec plus de vingt ans de retard par le physicien anglais William Thomson (1824-1907). Ce mémoire (1824) s'intitule *Sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* et contient la formulation de ce qu'on a appelé par la suite le second principe de la thermodynamique.

Selon Abel Rey, on distinguait à l'époque dans la formulation de ce principe trois points essentiels : « a.

On ne peut faire passer la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud sans fournir un travail extérieur (pas plus qu'on ne peut faire remonter de l'eau à un niveau supérieur sans un travail extérieur, par exemple de pompage); *b.* Tout système fini s'achemine vers un état d'équilibre thermique où il ne pourra plus se transformer (0 absolu); *c.* La valeur de transformation d'une modification est égale à la diminution que subit par cette modification une certaine grandeur liée à toutes les propriétés qui fixent l'état du système, mais indépendante de son mouvement, cette grandeur étant l'entropie du système et tendant à croître dans un système clos, isolé, pour toutes les transformations qu'il subit. » Le terme d'« entropie » n'a pas été inventé par Carnot mais par Rudolf Clausius (1822-1888), qui, avec Thomson, contribua à faire connaître, puis à rectifier le travail du physicien français.

Ce principe ainsi énoncé, avant que Boltzmann lui donne la forme statistique que nous lui connaissons, apparut tout de suite comme une exception aux lois de la mécanique classique. « Si tout est réductible aux principes de la mécanique classique, écrit Abel Rey dans *La théorie de la physique* (p. 40-41), il semble bien qu'on ne puisse rendre compte de cette inutilisation grandissante de la force, de cette diminution de l'énergie utilisable, de cet équilibre se réalisant constamment sans espoir de retour. » Comment expliquer l'irréversibilité des phénomènes de transformation de la chaleur en travail, postulée par le principe de Carnot-Clausius sous le nom d'« entropie » ? Question reprise par Pierre Duhem (1861-1916) dans la série d'articles qu'il consacre à l'« Evolution de la mécanique » dans la *Revue générale des sciences* (1903) : « La thermodynamique, écrit-il, impose à tous les phénomènes du monde matériel une tendance dans un même sens. Mais l'hypothèse que tous les effets de la matière sont d'essence mécanique ne rend aucun compte de la commune tendance qui sollicite tous ces effets. »

Ainsi commence au cours des années 1850, pour les physiciens, le temps des incertitudes, des incohérences et des querelles, après plus d'un siècle de ce qu'ils vont appeler, convertissant leur nostalgie en dérision, leur « dogmatisme tranquille ». Une « crise » qui va se développer dans la confusion pendant plus d'un demi-siècle.

Mais d'autres découvertes viennent s'ajouter à la thermodynamique pour décomposer le visage traditionnel de la physique. C'est notamment le tour nouveau que prend soudain la théorie cinétique des gaz, jusque-là bien arrimée à la mécanique. Clausius, détruisant en 1857 l'édifice proposé par Bernoulli, découvre en effet l'existence entre deux molécules gazeuses d'une action réciproque : attractive lorsque la distance des molécules n'est pas du même ordre que leurs propres dimensions, elle devient répulsive dans le cas contraire. C'en était fait de l'interprétation par les lois du choc des corps élastiques.

À nouveau se trouvait ébranlée la base mécanique de la physique. Duhem commente : « Il semble bien que

les partisans de l'hypothèse cinétique, et, en particulier, l'illustre physicien autrichien Ludwig Boltzmann (1844-1906), aient renoncé à ramener ce chaos à l'ordre et à l'unité, à tirer de cette hypothèse, aidée de suppositions secondaires, une doctrine cohérente, conforme à tous les faits. Ils paraissent se résigner à ne voir dans les diverses formes de la théorie cinétique que des exemples mécaniques qui imitent certaines propriétés des gaz, qui peuvent, par voie d'analogie, donner aux expérimentateurs d'utiles indications mais qui n'expliquent point la constitution réelle des gaz, qui ne prouvent point que la matière soit réellement formée comme le veulent les atomistes. » De fait, Boltzmann écrit, dans ses *Leçons sur la théorie des gaz* (1902) : « En présentant la théorie des gaz comme un ensemble d'analogies mécaniques, nous indiquons déjà, par le choix de cette expression, combien nous sommes éloignés d'admettre, d'une façon ferme et comme une réalité, que les corps sont, en toutes leurs parties, composés de très petites particules. »

Et la théorie électro-magnétique posait, à son tour, des questions embarrassantes dont la solution semblait requérir qu'on abandonnât le principe d'une explication par la mécanique classique. « La notion de conservation de la masse (ou de la quantité de matière), écrit Rey, avec l'inertie, était à la base de la mécanique électro-magnétique. [...] Mais la masse pondérable ne serait constante qu'à des vitesses moyennes, inférieures à 1/10 de la vitesse de la lumière; fonction de la vitesse, elle augmenterait avec celle-ci d'autant plus rapidement que nous approcherions de la vitesse de la lumière. »

Tels sont les embarras qui furent à l'origine de la déclaration de crise. Ces embarras touchent tous la représentation que l'on se faisait de la physique jusqu'alors. La « crise » n'est pas un « accès » ponctuel, localisé qui aurait eu la soudaineté et la brièveté d'un accident de parcours. Il s'agit bien plutôt d'un « état », c'est-à-dire une situation fortement structurée ayant sa nécessité propre et interne.

On peut dire que les effets des découvertes nouvelles sur la représentation de la physique se nouent autour d'une proposition centrale qu'on peut énoncer sous la forme suivante : « La matière disparaît. » Cette proposition concentre en effet en elle-même tous les motifs d'incertitude et de discorde des physiciens contemporains. Elle hante les textes de Mach, comme ceux de Poincaré. L'argumentation des physiciens en crise est invariablement la suivante : la physique était, jusqu'à nos jours, fondée sur la mécanique; or, la mécanique suppose deux concepts fondamentaux : ceux de matière et de mouvement. Mais l'irréversibilité des phénomènes de la nature prouvée par la thermodynamique ruine la mécanique; donc le concept de matière doit être abandonné et celui du mouvement remanié. C'est ainsi que Stallo, faisant écho à Mach, peut écrire dans un livre intitulé *La matière et la physique moderne* que l'affirmation qu'il existe une matière des phénomènes constitue « un reste de réalisme médiéval ». Et le chimiste allemand Wilhelm Ostwald (1853-1932) dans un

article qui fit grand bruit et qui était traduit sous le titre de « La déroute de l'atomisme » : « Partout on répète, comme un axiome, que seule la mécanique des atomes peut donner la clé du monde physique. Matière et mouvement, tels sont les deux concepts auxquels on ramène en dernière analyse les phénomènes naturels les plus complexes. À cette théorie, on peut donner le nom de matérialisme physique. Je veux exprimer ici ma conviction que cette manière de voir, malgré tout son crédit, est insoutenable; que cette théorie mécanique n'a pas atteint son but, car elle se trouve en contradiction avec des vérités tout à fait hors de doute et universellement admises. » Ces vérités sont celles de la thermodynamique.

De la proposition précédente s'en déduit une autre : « La réalité de la science est symbolique. » C'est l'Anglais Karl Pearson qui l'a formulée en ces propres termes dans son livre *La grammaire de la science* (1892) mais on trouve dans l'œuvre de Mach des développements analogues. Dans la préface à la deuxième édition de son ouvrage, il explique que « la science est une sténographie conceptuelle » à l'aide de laquelle « on peut décrire brièvement et résumer les phénomènes ». Un peu plus loin, il reprend la distinction, devenue un véritable lieu commun épistémologique, entre « explication » et « description » : plus personne ne pense, selon lui, que la science « explique » quoi que ce soit, chacun sait qu'elle se contente de « décrire ». Ostwald écrit dans une « Lettre sur l'énergétique » : « L'énergétique, elle aussi, imagine des symboles mais seulement, à la différence de la science antérieure, elle apporte un soin scrupuleux à ce que ses symboles ne contiennent rien de plus, rien de moins que les faits à représenter. » Et Mach dans *La connaissance et l'erreur* adresse cette thèse à un certain évolutionnisme : « Le singe jette à l'occasion quelque chose à son ennemi et peut même abattre des fruits avec une pierre. Mais l'homme fixe tous les procédés avantageux; pas sa nature, il est plus économe et, en dirigeant son attention sur les moyens intermédiaires, il invente des armes et des outils » (p. 89-90). Par adaptation progressive, l'homme parvient au concept, comme « formation psychique originale ». La thèse de « l'économie de pensée » appelée à un grand écho est ainsi construite sur la base d'une conception évolutionniste — qui se veut darwinienne — de la « nature humaine ». Mach emprunte en réalité ses notions d'adaptation, de fixation et, finalement, d'économie à Spencer, c'est-à-dire à une doctrine dont la pierre angulaire et constituée par l'extension-généralisation du concept d'adaptation.

Le lien de cette nouvelle thèse avec la précédente est évident : c'est parce que la « matière a disparu » que la science ne peut plus prétendre atteindre la réalité et que son contenu doit être dit tout à la fois « descriptif » et « symbolique ». De là une conception du concept scientifique où se retrouvent tous les attributs du symbole : présentation conventionnelle et analogique d'une réalité qu'il indique sans pouvoir se l'approprier.

► BOLTZMANN L., *Leçons sur la théorie des gaz*, trad. fr., Paris, 1902-1905. — CARNOT S., *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824), Paris, Librairie scientifique et technique A. Blanchard, 1953. — COMTE A., *Œuvres*, Paris, Anthropos, 12 vol., 1968. — DUHEM P., *L'évolution de la mécanique* (1903), rééd., Paris, Vrin, 1992. — LECOURT D., *Une crise et son enjeu*, Paris, Maspero, 1973; *La philosophie des sciences*, 2001, 3^e rééd., Paris, PUF/Que sais-je?, 2005. — MACH E., *La mécanique* (1883), Paris, Hermann, 1904; *La connaissance et l'erreur* (1905), Paris, Flammarion, 1908. — OSTWALD W., « La déroute de l'atomisme », *Revue générale des sciences*, 1895. — POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902; *La valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905. — REY A., *La théorie de la physique chez les physiciens contemporains*, Paris, Alcan, 1907.

Dominique LECOURT

→ Chaleur; Entropie; Gaz (Théorie des); Matière [PHYSIQUE].

CRISTAL

PHYSIQUE / CHIMIE / GÉOMÉTRIE

Le cristal brille de tout son éclat à la croisée d'au moins trois sciences. « Les formes cristallines méritent de fixer l'attention non seulement du minéralogiste et du chimiste, parce qu'elles servent à caractériser les substances auxquelles elles appartiennent, mais encore du physicien, auquel elles fournissent de nombreux moyens d'étudier le son, l'électricité et la lumière. Envisagées sous un autre point de vue, elles sont dignes des médiations de tout homme qui désire être initié dans les secrets de la nature. Quoi de plus curieux, en effet, que de voir les corps bruts prendre des figures régulières, offrir des facettes planes aussi brillantes que si on les eût fait travailler par un lapidaire, disposées, non pas au hasard, mais symétriquement, et présentant des inclinaisons mutuelles qui suivent des lois simples et invariables ? » (*Encyclopédie nouvelle*, 1836).

À propos du cristal, la minéralogie et la géométrie, la chimie et la physique ont donc chacune quelque chose à raconter. Des histoires dont les incipit se ressemblent, qui s'entrelacent, se compliquent, changent de lieux et de héros. Le plus commode est sans doute, pour essayer de résumer l'histoire de la cristallographie, la science du cristal, de conserver celui-ci au centre des diverses curiosités dont il a été, dont il reste l'objet.

Le cristal entre la minéralogie et la géométrie descriptive

Depuis toujours les hommes et les femmes ont été justement fascinés par certains minéraux — les pierres précieuses — du diamant au cristal de roche. Mais ces cristaux et ces pierres, objets d'admiration, de parure et de commerce, n'ont attiré une attention qui mérite vraiment le nom de scientifique qu'à partir du xviii^e siècle. Les mots « minéralogiste », « minéralogie » ont d'abord eu un sens pour les pharmaciens, et c'est Romé de l'Isle, en 1772, qui créera celui de « cristallographie ».

Préoccupé, comme on le sait, de la classification des

divers règnes de la nature, le naturaliste suédois Carl von Linné (1707-1778) professait que les formes cristallines pouvaient servir de guide pour mettre de l'ordre dans l'inventaire des substances minérales. Il pensait déjà que des formes identiques (d'une identité encore mal définie) devaient refléter des analogies de composition chimique. Ces idées, nous le verrons, seront reprises sous une forme plus précise et plus féconde au siècle suivant. *L'essai de cristallographie ou Description des figures géométriques propres à différencier les corps du règne minéral connus vulgairement sous le nom de cristaux*, que Jean-Baptiste-Louis Romé de l'Isle (1736-1790) fait paraître en 1772, marque une date capitale dans l'histoire qui nous intéresse. Ce naturaliste inspira mesure aussi exactement que possible les angles dièdres de nombreux cristaux et formule la première loi de la cristallographie, la loi de constance des angles qui affirme que les angles ont toujours une valeur constante dans une même espèce minéralogique. À vrai dire cette loi avait déjà été entrevue avant lui. Le Danois Niels Steensen, sous le nom de Nicolaus Stenon (1638-1686), avait publié en latin, en 1669, un ouvrage où il en décrivait l'application particulière dans le cas du quartz. Domenico Guglielmini (1655-1710) dans les années 1688-1705 avait étendu et généralisé ces premières observations. Mais Romé va plus loin et découvre que tous les cristaux se distribuent en sept formes primitives, sept polyèdres définis par leur nombre de faces (de 4 à 24). Il précise que ce nombre de faces peut être augmenté par les tronçatures, résultats d'un « rabotage » symétriquement effectué sur certains sommets ou certaines arêtes du polyèdre primitif. Cette altération correspond à ce qu'on appelle hémiedrie.

En 1780 Romé de l'Isle entreprend de publier une seconde édition de son essai de cristallographie : il projette de décrire 746 cristaux, illustrations à l'appui. Ce projet eut indirectement une conséquence heureuse et imprévue. Pour dessiner avec exactitude les angles dièdres des cristaux, il fallait savoir les mesurer commodément, ce qu'on ne savait faire jusqu'alors en découpant des cartes à jouer. C'est à cette occasion que Armand Carangeot (1742-1806) inventa, en 1782, son goniomètre, un simple rapporteur muni d'un compas, qui sera largement utilisé avant d'être remplacé en 1809 par l'appareil perfectionné de William Hyde Wollaston (1766-1828), fondé sur la réflexion de la lumière sur les faces du cristal.

Cuvier accorde à l'abbé René-Just Haüy (1743-1822) le titre de « législateur de la minéralogie » : il aurait mieux valu dire « de la cristallographie ». La loi de Romé sur la constance des angles n'était qu'un premier pas. Haüy avait observé (par hasard) que lorsqu'un minéral donné se casse il le fait en engendrant des polyèdres qui, à la dimension près, sont semblables. Il imagine qu'à la limite de la fragmentation possible on pourrait observer les « molécules intégres » dont l'arrangement régulier permet de retrouver la forme du cristal. Par ailleurs Haüy compléta la loi de Romé par deux autres : la loi de

symétrie et la loi de dérivation. La première stipule que tous les éléments semblables d'un cristal sont toujours semblablement et simultanément modifiés. La seconde est moins intuitivement évidente : toute facette modifiante intercepte sur les arêtes de la figure primitive des longueurs proportionnelles à des multiples simples de la longueur de ces arêtes. À propos de l'hémiedrie il faut citer ici une observation de Haüy qui, sur le plan de la chimie, devait avoir, comme nous le verrons, des conséquences lointaines mais décisives. Le quartz peut se présenter sous deux formes hémiedres non superposables, c'est-à-dire images l'une de l'autre dans un miroir.

Les progrès de l'analyse géométrique des formes et de la structure cristalline sont marqués, entre autres, par les contributions de Gabriel Delafosse (1796-1878), un élève de Haüy dont il développe les idées. Il introduit en particulier les concepts de réseau et de maille cristalline qui permettent de définir l'édifice cristallin. Ces idées seront précisées par Auguste Bravais (1811-1863), qui s'attache à définir le cristal par ses éléments de symétrie. De ce point de vue, les sept systèmes cristallins reconnus par Romé se répartissent dans 32 classes de polyèdres. Plus tard Arthur Moritz Schönflies (1853-1928) complètera et compliquera encore la description géométrique rigoureuse des diverses structures cristallines en tenant compte de nouveaux éléments de symétrie. Cette démarche aboutit, en 1891, à une classification des cristaux qui suppose l'existence de 230 groupes de symétrie.

Tandis que s'accumulaient ces résultats, d'autres chimistes cristallographes s'occupaient de trouver, par pure déduction, les relations qui existent entre la forme visible du cristal et ses molécules constituantes. C'était évidemment, vers 1850, une tentative prématurée, quand on sait qu'aujourd'hui, armés de nos ordinateurs, nous ne savons pas encore généralement prévoir comment des objets moléculaires ou ioniques relativement simples choisiront l'arrangement cristallin qui leur est le plus confortable, parmi les 230 « groupes d'espaces » possibles.

À ces tentatives, qui ne sont cependant pas, par certains points, sans préfigurer certains aspects modernes de l'analyse structurale des cristaux ioniques, on doit associer les noms de Delafosse et de Baudrimont. Mais c'est sûrement Marc Antoine Gaudin (lui qui le premier, et avec beaucoup de perspicacité, distingua atome et molécule) qui a été le plus loin dans cette direction. Son livre *L'Architecture du Monde des Atomes*, paru en 1873, reprend, en les développant, des idées qu'il avait déjà esquissées à partir de 1830 : belle illustration qu'en matière scientifique il faut parfois faire preuve d'autant d'imagination et de persévérance pour inventer le faux que pour découvrir le vrai (parfois d'ailleurs inextricablement mêlés).

Il serait d'un intérêt limité de détailler des théories dont on ne peut retenir que peu de choses, sinon que les travaux de Barlow, de Pope ou, plus récemment, de Kitaigorodskii ou de Kihara ont une préhistoire. Le premier cité, dès 1883, envisageait un cristal comme

une entité géométrique formée par l'accumulation d'atomes sphériques déterminée par l'équilibre de forces qui s'exerçaient entre eux. De telles spéculations dont certaines sont étonnamment prémonitoires devaient attendre la découverte de la radiocristallographie pour trouver leur confirmation expérimentale.

Le cristal et la physique

Les phénomènes physiques, lumineux ou électriques, associés à l'existence d'une structure cristalline sont nombreux et d'une grande diversité : double réfraction, activité optique, pyroélectricité, piézoélectricité, triboluminescence, diffraction des rayons X, ferroélectricité, génération de seconde harmonique, effets photoélectrique, semi-conducteurs, etc. Certains sont connus depuis plusieurs siècles, d'autres de découverte récente.

C'est ainsi que Francis Bacon mentionne dans son *On the Advancement of the Learning* (1605) que lorsqu'on casse un morceau de sucre, on peut observer une faible lueur. Ce phénomène, depuis Wiederman (1895), est connu sous le nom de triboluminescence (du grec *tribein*, frotter). Le géomètre et médecin danois Érasme Bartholin (1625-1698) avait fait, en 1669, une autre observation capitale qui concerne une autre propriété optique de certains cristaux. Lorsqu'un rayon lumineux traverse un cristal convenablement orienté de spath d'Islande (une forme du carbonate de calcium), il se dédouble en deux rayons d'égale intensité. Par la suite les physiiciens avaient observé que lorsqu'un rayon lumineux traverse successivement deux cristaux de spath et que l'on fait tourner l'un des deux autour de son axe, pour certaines de leurs positions relatives on observe une extinction du faisceau émergent. Bien plus tard, en 1808, un jeune officier français féru d'optique, Étienne Louis Malus (1775-1812), visait, de sa fenêtre, un rayon de soleil reflété sur une vitre du Palais du Luxembourg, à travers un de ces cristaux doués de la double réfraction. Suivant l'orientation de son cristal, au lieu des deux images auxquelles il s'attendait, il n'en vit, à sa surprise, qu'une seule des deux. Il venait de découvrir la polarisation rectiligne de la lumière : alors que la lumière « normale » vibre tous azimuts autour de son axe de direction, elle ne le fait plus que dans un seul plan après avoir été réfléchi. Trois ans plus tard François Arago (1786-1853) constatait à son tour qu'un faisceau de lumière polarisée, en traversant une lame de cristal de roche convenablement taillée, subissait une modification importante : le plan de polarisation de la lumière émergente de cristaux de quartz différents est dévié soit à droite soit à gauche. On dit que ceux-ci possèdent un pouvoir rotatoire. Le célèbre astronome anglais Sir William Herschel (1738-1822) devait établir ultérieurement une relation entre le sens de cette déviation et l'hémiedrie non superposable que peuvent présenter deux cristaux différents : une observation qui, comme nous le verrons, préfigure les découvertes de Pasteur.

Parmi les autres phénomènes relevant de la physique

du cristal, il convient de mentionner également la pyroélectricité et la piézoélectricité. La pyroélectricité qui conduit à l'apparition de charges électriques quand on chauffe certains cristaux comme la tourmaline a été connue en Inde et à Ceylan depuis des temps immémoriaux. On avait observé que ce minéral, jeté dans le feu, avait la propriété d'attirer les cendres. Des Hollandais firent connaître cette expérience en Europe et Lémery la présenta à l'Académie des sciences en 1717. Plus tard Haüy découvrit un fait important : ce sont « les cristaux qui dérogent à la symétrie dans la configuration des sommets », qui sont « électriques par la chaleur ». En fait le phénomène est bien associé à la dissymétrie des cristaux qui présentent cette propriété. Les premières études rigoureuses sur ce sujet datent de Antoine Becquerel (1788-1878), qui, en 1827, publia ses observations « sur les propriétés électriques de la tourmaline ».

Charles Coulomb (1836-1800), dans ses recherches sur le développement de l'électricité par friction, admettait que « la dilatation et la compression éprouvées par les particules des surfaces des corps pouvaient avoir une influence déterminante sur la nature de l'électricité développée sur chacune d'elles ». Haüy, de son côté, avait observé « les propriétés électriques que la simple pression des doigts imprime au spath d'Islande et à quelques autres substances minérales ». Antoine Becquerel s'intéressa également, au cours des années 1820, aux phénomènes électriques produits par le clivage et la pression des cristaux. Mais en fait les phénomènes qui relèvent réellement de ce qu'on appelle la piézoélectricité ne furent bien étudiés et compris qu'à partir de 1880 par les frères Curie, Jacques (1855-1941) et Pierre (1859-1906), qui montrèrent que l'hémiedrie était une condition de l'apparition de l'électricité polaire chez les cristaux qui se contractent ou se dilatent.

La découverte de la diffraction des rayons X par les cristaux a joué un rôle capital dans la connaissance de la structure de la matière, aussi bien dans le domaine de la physique que dans celui de la chimie. C'est Max von Laue (1879-1960) qui, en 1912, imagina qu'un cristal traversé par des rayons X pouvait jouer le même rôle qu'un réseau de traits éclairé par un rayon de lumière visible. Sur sa suggestion, Friedrich et Knipping dirigèrent un mince faisceau de rayons X au travers un cristal de sulfate de cuivre. Une plaque photographique placée derrière le cristal leur fournit le premier diagramme de diffraction des rayons X. C'était la preuve qu'un cristal se comportait comme un arrangement répétitif d'unités dont les dimensions étaient du même ordre de grandeur que la longueur d'onde des rayons X. Les spéculations de Haüy étaient d'une certaine façon confirmées. Von Laue, qui essayait d'expliquer ces observations dans le cadre d'une extension des théories classiques de la diffraction, ne pouvait aller très loin. À la fin de la même année 1912, William Lawrence Bragg avança une autre solution au difficile problème posé. À l'intérieur du cristal les atomes sont disposés en plans parallèles séparés par

une certaine distance, et dans ces plans les atomes sont aussi à des distances régulières. Les spots observés sur les photographies de von Laue résultaient d'une réflexion « coopérative » du rayonnement X sur les divers plans rencontrés. L'année suivante, avec son père, William H. Bragg élucidait l'arrangement des atomes de zinc et de soufre à l'intérieur du cristal de sulfure de zinc. À la veille de la Première Guerre mondiale, qui interrompit ces travaux, la physique était déjà capable de déterminer la structure cristalline de plusieurs substances chimiques simples. On était encore loin des performances de la radiocristallographie que nous connaissons aujourd'hui.

À partir des années 1950 celle-ci a connu des perfectionnements considérables qui ont permis de décrire dans un minimum de temps l'arrangement des dizaines, voire des centaines d'atomes dans les molécules qui constituent le cristal lui-même. La découverte de nouvelles méthodes de calcul et de traitement des données expérimentales (méthodes dites directes) par H.A. Hauptmann et par Jerome Karle (prix Nobel de chimie 1985) d'une part, le perfectionnement des appareils de mesure d'autre part, en particulier l'invention de diffractomètres automatiques commerciaux (~ 1970) remplaçant les chambres de Weissenberg d'un maniement fastidieux, ont permis d'opérer sur des cristaux de plus en plus petits et sur des molécules où la présence jusqu'alors indispensable d'atomes lourds (comme le brome) n'est plus nécessaire.

Autre progrès important dans le domaine de la physique du cristal et de ses applications à la chimie : la découverte de la diffraction « anormale » des rayons X qui a permis à Bijvoet et à ses collaborateurs d'accéder à la configuration absolue des molécules organiques dissymétriques. Il faut entendre par là que lorsqu'une molécule peut exister, comme nos deux mains, sous une forme droite ou sous une forme gauche, il est possible de choisir entre les deux possibilités.

Doit-on enfin parler dans ce chapitre de deux avatars récents des « cristaux » qui ne relèvent que d'assez loin, il est vrai, de la cristallographie classique ?

C'est en 1888 que F. Reinitzer et en 1889 O. Lehmann découvrent les premiers cristaux liquides. Ils observent que les cristaux de certaines substances organiques (des dérivés du cholestérol par exemple) ne fondent pas « normalement », c'est-à-dire en passant brusquement, à une température donnée, de l'état solide à l'état liquide. Ce changement de phase, comme on dit, s'opère en deux étapes ; dans un premier temps le cristal se transforme en un état fluide intermédiaire qui présente encore certaines propriétés optiques d'un milieu géométriquement organisé. À plus haute température cet état particulier fait place au liquide normal isotrope. Le mot « mésomorphe » (du grec *méso*, qui est au milieu) a été introduit en 1922 par G. Friedel pour désigner ce nouvel état de la matière. Depuis 1968 ces cristaux liquides ont acquis une certaine importance dans notre vie quotidienne puisque c'est sur eux que reposent en particulier de nombreux dispositifs

d'affichage électronique (montres, appareils de mesure variés).

Les quasi-cristaux eux non plus ne sont pas, comme leur nom l'indique, des cristaux ordinaires. Leur découverte est due, en 1984, à une équipe internationale qui constata avec surprise que la cristallisation de certains alliages métalliques n'obéit pas aux règles habituelles. Ces quasi-cristaux présentent des arrangements géométriques que l'on croyait jusqu'ici interdits, faisant intervenir en particulier des symétries de type « pentagonal ».

Le cristal et la chimie

L'idée qu'il doit y avoir une relation entre la forme des constituants invisibles de la matière solide et celle sous laquelle elle s'offre à nos yeux dans les cristaux est une évidence intuitive qui ne date pas d'hier. Pour l'abbé René-Just Haüy, vers 1800, dans la cristallisation, les « molécules intégrantes », selon son expression, se forment d'abord suivant les règles de la chimie puis se réunissent selon celles de la cristallographie. Haüy parle en cristallographe qui, comme ses prédécesseurs, veut mettre de l'ordre dans le classement des espèces minéralogiques. Les problèmes du chimiste sont de nature différente. Existe-t-il, se demande Eilhard Mitscherlich dans les années 1820, des relations entre la structure moléculaire et la structure cristalline ? Ce à quoi il répond : oui, deux substances de formules voisines et constituées d'éléments voisins (comme le phosphore et l'arsenic) cristallisent sous des formes analogues. Elles sont isomorphes.

Cette notion d'isomorphisme allait à l'encontre des idées d'Haüy pour qui chaque corps chimique possède sa « forme » cristalline propre et il ne l'accepta jamais ; elle n'en a pas moins joué un rôle capital dans l'histoire de la chimie du XIX^e s. Elle a, en particulier, largement aidé à déterminer les poids atomiques qui sont les nôtres, et non pas leurs doubles ou leurs moitiés. Et ce concept d'isomorphisme, en établissant une relation directe entre la molécule et le cristal, a aussi, d'une certaine façon, au cours des années 1860, contribué à la laborieuse naissance de la notion de structure chimique.

Auguste Laurent, vers 1835, avec Jean-Baptiste Dumas, avait découvert les phénomènes de substitution. Il affirmait, expériences à l'appui, que dans une molécule organique un chlore peut remplacer un hydrogène. Cette substitution peut se faire sans modifier l'essentiel de l'architecture de la molécule qui en a été le siège. À preuve, les cristaux d'un certain nombre de dérivés où Laurent a remplacé un hydrogène par un chlore fournissent des cristaux qui sont isomorphes. Cette intuition hardie demande évidemment qu'on ne soit pas trop exigeant sur les conditions de l'isomorphisme. Le chlore et l'hydrogène n'ont pas la même masse et ne peuvent donc pas occuper rigoureusement le même volume. Leur substitution peut donc provoquer certains petits changements dans les systèmes cristallins. Pour Laurent deux cristaux de

systèmes cristallins différents restent isomorphes, à condition qu'ils appartiennent à ce que les cristallographes de ce temps-là appelaient des formes limites. Quand vous redressez un prisme oblique, à la limite, c'est presque un prisme droit.

En dehors de la quasi-identité des formes cristallines, que le goniomètre peut permettre de vérifier, l'isomorphisme se traduit par la syncristallisation. Deux corps isomorphes, mélangés en proportions variables et d'une manière continue, peuvent participer à la construction d'un cristal d'apparence homogène. Ceci se traduit, pour les chimistes organiciens, par le comportement à la fusion des mélanges de deux corps dont les structures sont voisines.

Dans les années 1830, Laurent avait des idées qui n'étaient guère à la mode. À l'automne 1846 ce marginal peu fréquentable malgré son génie eut l'occasion de diriger les premiers travaux du jeune Pasteur. Ceux-ci portaient sur le polymorphisme – plus précisément sur le dimorphisme –, une autre découverte de Mitscherlich qui avait montré, en 1818, qu'une même substance chimique peut se présenter sous plusieurs formes cristallines différentes. En étudiant les sels de l'acide tartrique – un acide naturel sous-produit de la vinification – Pasteur avait reconnu que les tartrates de sodium, de potassium ou d'ammonium sont isomorphes et peuvent cristalliser ensemble en toutes proportions (on dit syncristalliser), même s'ils appartiennent à deux systèmes cristallins différents. C'est dire qu'au cours de son apprentissage Pasteur avait eu l'occasion de beaucoup regarder des cristaux de tartrates, de noter leurs similitudes et leurs différences.

La découverte fortuite par un fabricant alsacien, vers 1820, d'un nouvel acide isomère de l'acide tartrique qui reçut le nom d'acide racémique allait avoir des conséquences imprévisibles. Ce nouvel acide ressemblait comme un frère à l'acide tartrique qu'il souillait ; mais contrairement à son sosie chimique il cristallisait différemment et était inactif sur la lumière polarisée. En juillet 1842 Mitscherlich publia une observation surprenante. Il croyait avoir vu que le tartrate et le racémate double de sodium et d'ammonium avaient la même forme cristalline et la même densité. Pasteur eut la chance et le génie de s'apercevoir qu'il n'en était rien : ce racémate de sodium et d'ammonium est en réalité formé par deux espèces de cristaux hémihédres non superposables, images l'un de l'autre dans un miroir. En découvrant que les cristaux de l'acide tartrique et de ses sels peuvent exister sous une forme droite et sous une forme gauche, au confluent de la chimie et de la cristallographie, Pasteur venait d'inventer la stéréochimie.

La séparation spontanée de certaines molécules chimiques en deux espèces cristallines énantiomorphes, le dédoublement spontané d'un racémique comme on dit, est un phénomène rare : on sait aujourd'hui que dans un mélange cristallisé équimoléculaire d'énantiomères ceux-ci préfèrent, 9 fois sur 10, s'empiler sur leur image plutôt que sur leur semblable. Dans un magasin de chaussures, il est apparemment plus commode de les

ranger par paires dans une même boîte plutôt que de stocker les chaussures gauches d'un côté et les droites ailleurs. Pourquoi les mélanges d'énantiomères cristallisés choisissent-ils tantôt l'un tantôt l'autre de ces empilements possibles ? : c'est un des problèmes que Pasteur nous a légués. Il en a résolu d'autres.

Il nous avertit par exemple que ces cristaux actifs sur la lumière polarisée sont souvent hémihédres. Il ne nous dit pas toujours. En fait (je le cite) : « Cette particularité des formes des tartrates [n'est] pas très évidente. » C'est le moins qu'on puisse dire. Et entre 1848 et 1853 les difficultés inhérentes à l'observation de l'hémihédrie n'ont pas cessé de le préoccuper. On connaissait depuis longtemps les moyens empiriques de faire varier les formes secondaires d'un cristal. « On savait par exemple, que le sel marin cristallisé dans l'eau pure était cubique, et que celui qui se formait dans l'urine était en octaèdres réguliers. » Pasteur entreprend dès lors de faire cristalliser ensemble des corps actifs différents, dans l'espoir de « forcer » en quelque sorte l'hémihédrie là où elle n'apparaît pas spontanément.

Premier essai, première surprise. Au lieu de révéler une hémihédrie jusqu'ici cachée, la cristallisation d'un mélange de tartramide droit et de malamide optiquement actif lui fournit une nouvelle combinaison équimoléculaire de ses deux constituants. En revanche, en mélangeant le tartramide gauche cette fois avec ce même malamide, il ne cristallise rien de propre. Sans bien s'en rendre compte, Pasteur vient de découvrir le premier racémique actif ou quasi-racémique. Ces quasi-racémiques résultent de l'association de deux molécules « presque » images l'une de l'autre. Ces combinaisons cristallines d'un type très spécial ne seront retrouvées et étudiées que presque cent ans plus tard par Marcel Delépine et, en Belgique, par Jean Timmermans. Dans le domaine des complexes wernériens ou dans celui des hormones végétales artificielles ces quasi-racémiques ont permis à l'époque de résoudre des problèmes de corrélations de configuration jusqu'alors peu abordables. Comme dans le cas de la syncristallisation, les diagrammes de phase permettent de mettre en évidence ces composés d'addition particuliers. En faisant cristalliser les sels formés par la combinaison d'acides racémiques avec certains alcaloïdes (comme la quinine), Pasteur fut plus heureux : il découvrit une nouvelle méthode de séparation des énantiomères.

Nous avons vu plus haut comment, en 1912, la radiocristallographie était née entre les mains des physiciens. La première conséquence importante de leur découverte dans le domaine de la chimie organique date de 1932 et d'une observation inattendue du physicien anglais J.B. Bernal. Le diagramme de rayons X obtenu par irradiation de l'ergostérol, une vitamine appartenant à la famille des stéroïdes, lui révéla que la dimension de la molécule qu'il pouvait en déduire était incompatible avec la formule trop compacte qui avait été proposée en 1928 pour des composés apparentés. La révision de cette structure s'imposait ; il ne fallut que quelques mois pour en trouver une autre qui est

celle des stéroïdes que nous connaissons aujourd'hui. Mais les progrès de la radiocristallographie furent loin d'être foudroyants. Jusqu'à la fin des années 1950 en France, une détermination de structure par rayons X demandait souvent des mois, voire des années. Aujourd'hui la détermination de la structure d'une molécule organique inconnue, à condition évidemment d'avoir un « bon » cristal, peut n'être plus qu'une question de jours. Cette révolution récente est sans doute moins marquée par l'apparition de concepts fondamentalement nouveaux que par les progrès inouïs de l'instrumentation et des moyens de calcul. Dans les parties expérimentales des mémoires des chimistes contemporains la description des « laques incolores » obtenues se réduit de plus en plus à des « signaux » émis par une matière dont on exige de moins en moins de la voir cristallisée. Le chimiste « classique », qui se devait d'être aussi cristallographe, n'aurait pu voir qu'avec nostalgie les cristaux de Mitscherlich, de Laurent et de Pasteur fondre dans le creuset brûlant de l'histoire.

► BALIBAR F., *La science du cristal*, Paris, Hachette, 1991. — BARLOW W. & MIERS H.A., *The structure of crystals*, Glasgow, British Association for the Advancement of Science Reports, 1901, 1^{re} partie, p. 297-337. — BECQUEREL A., « De quelques phénomènes électriques produits par la pression et le clivage des cristaux », *Annales de Chim.*, 1827, XXXVI, p. 265. *Sur les propriétés électriques de la tourmaline*, *Annales de Chim.*, 1828, XXXVII, p. 6. — BRAGG W.L., *The Crystalline State*, vol. I, Londres, Bell, 1962. — CURIE J. & CURIE P., C.R. Acad. Sciences, 1880, 91, p. 294. — GAUDIN M.-A., *L'architecture du monde des atomes*, 1873. — HAÛY R.-J., *Essai d'une théorie sur la structure des cristaux*, 1784 ; *Traité de cristallographie*, 1822. — IHDE A.J., *The Development of the Modern Chemistry*, New York, Dover Publ., 1984. — JACQUES J., COLLET A. & WILEN S., *Racemates, Enantiomers, Resolutions*, Wiley, 1991. — LIPSCOMB W.N. & JACOBSON R.A., *X Ray Crystal Structure Analysis, in Physical Methods of Chemistry*, Wiley-Interscience, 1972. — PASTEUR L., *Œuvres complètes*, Paris, Masson, 7 vol., 1922-1939, t. I. — TATON R. dir., *La Science contemporaine* Paris, PUF, vol. II et III. — ZINK J.I., *Tribolescence, Accounts of Chemical Research*, vol. XI, *American Chemical Society*, Washington, 1978, p. 289. — Coll. : « Cristallographie », *Encyclopédie nouvelle*, 1836.

Jean JACQUES

→ Groupes et symétrie ; Lave ; Molécule ; Stéréochimie.

CRITICISME

L'essentiel du criticisme tient, en premier lieu, dans une référence à un auteur, le philosophe allemand de la période des Lumières (Aufklärung), E. Kant (1724-1804). Il contribue, en second lieu, à dessiner les linéaments d'un problème majeur, intimement lié aux philosophies qui se donnent pour tâche de dégager des structures de l'entendement : comment articuler une recherche portant sur les formes *a priori* de la connaissance à la reconnaissance d'une historicité dont on est bien obligé d'admettre qu'elle est inscrite dans le déploiement même des sciences ?

Il faut, cependant, se référer d'abord à la langue grecque pour comprendre comment s'établit l'usage du terme « critique », dont dérive le nom de ce courant, le « criticisme », par lequel on désigne à la fois la philosophie de Kant et l'ensemble des doctrines qui s'en réclament, et pour lesquelles la connaissance scientifique procède de la mise en acte, par le jugement, de formes originaires rapportables à l'expérience d'une matière sensible. « Critique », ce terme qui fonctionne comme substantif (la critique) et comme adjectif (une philosophie critique), est, en effet, construit à partir de *krinein*, examiner et séparer, distinguer et passer au crible, évaluer et décider. À côté de ses emplois littéraires et philologiques — extirpé, au XVIII^e s., d'un usage érudit répandu durant le Moyen Âge, le terme est aussitôt employé pour l'étude de l'authenticité des textes —, le siècle des Lumières l'investit d'un sens spécifique : témoigner du libre exercice de la raison par lequel celle-ci pratique l'examen de la valeur des discours qui lui sont présentés. On notera, au passage, que l'exercice « critique » ne vise surtout pas une disqualification de telle ou telle activité, ainsi que le suggère fréquemment une utilisation commune de ce terme. Au contraire, en se plaçant sur le terrain sûr de la critique, la philosophie, écrit Kant, donne corps à l'idée d'une science particulière susceptible de déterminer les conditions, c'est-à-dire de fixer les limites, dans lesquelles la connaissance universelle et nécessaire des phénomènes s'accomplit. Simultanément, elle dépar tage les adversaires des guerres intestines de la métaphysique. La critique prononce, en effet, le droit, à l'encontre du scepticisme (mettant en doute la capacité de l'esprit humain à parvenir à une quelconque vérité) et du dogmatisme (affichant des pensées produites sans garantie de l'expérience scientifique) qui font obstacle à la compréhension de la législation de la raison en matière de connaissance scientifique.

La détermination philosophique d'un tel vocable subit, passé les travaux de Kant, quelques variations dues essentiellement aux louables efforts accomplis par quelques-uns pour adapter le criticisme kantien au développement postérieur des sciences. Ainsi la carrière du criticisme se prolonge-t-elle dans les travaux de l'École de Marbourg (H. Cohen, P. Natorp, E. Cassirer), après qu'en 1862 E. Zeller eut prononcé sa leçon inaugurale à Heidelberg, « Sur la signification et la tâche de la théorie de la connaissance », en prônant le mot d'ordre du « retour à Kant » (« Zurück zu Kant ! ») à l'encontre des avantages pris alors par la philosophie hégélienne sur le terrain des conceptions de la science.

Problème et méthode de la critique

C'est de l'effort pour produire, à l'encontre de l'instance d'autorité « supérieure » que représenterait l'ancienne métaphysique dont on considèrerait encore à l'époque qu'elle pouvait proposer une connaissance définitive de l'Être (l'Absolu, Dieu, la Vérité, les choses en soi), la solution du problème de la connaissance

scientifique (« que puis-je réellement connaître ? ») que surgit, dans la *Critique de la Raison pure* (1781, Crp), grâce à Kant, un style inédit d'investigation philosophique : celle qu'on appelle précisément « critique », comprenons par là la connaissance par l'homme de la connaissance elle-même. Le bouleversement ainsi instauré, en contrepoint d'une longue tradition, réfute l'idéal d'une connaissance scientifique de Dieu (la théologie : du grec *theos* : dieu, et *logos* : science) et du tout (la cosmologie : du grec *cosmos* : bon ordre de l'univers, et *logos*), en émancipant, conjointement, la pensée de la référence à la formule de l'unité héritée du Moyen Âge. Alors qu'on prétendait auparavant produire la connaissance en partant des choses extérieures à nos représentations et de leur impact sur nos sens, cette révolution — dite copernicienne par analogie approximative avec le renversement résultant du géocentrisme — privilégie une analyse qui fait procéder la connaissance scientifique et l'unité du savoir d'un sujet actif, originaire et ouvert sur un monde de phénomènes. Ce sujet — forme de la conscience qui structure ce qui devient nos « représentations » — a pour fonction, désormais, l'acte d'unification formelle des procédures d'appréhension des phénomènes, exprimées dans les quatre groupes de catégories de l'entendement : quantité, qualité, relation et modalité. Kant choisit de donner à cette manière inédite d'interroger la connaissance scientifique — dont le modèle est d'ailleurs puisé dans les travaux expérimentaux de Newton (loi de la gravitation universelle) — le nom de philosophie transcendante : « J'appelle transcendante toute connaissance qui s'occupe moins des objets que de nos concepts *a priori* des objets » (Crp, p. 46). Celle-ci dresse le tribunal de la raison grâce auquel discriminer les conditions de possibilité (*a priori*) de l'expérience objective en tant qu'elle vaut pour tout « Je pense ». La connaissance objective est possible dans les limites d'une expérimentation au cours de laquelle le sujet d'une expérimentation, par le jugement, unifie par voie de catégories — le terme provient d'Aristote, mais désigne chez lui un mode d'appréhension de l'être, alors qu'il nomme ici des concepts de l'entendement universels et nécessaires — les sensations ordonnées selon les seules règles de l'espace et du temps. On voit que la solution transcendante du problème de la connaissance tente d'éviter le double écueil du réalisme (la chose extérieure produit en nous des représentations) et de l'idéalisme (la représentation crée le réel), mais aussi l'écueil d'un recours à une harmonie préétablie (Leibniz) destinée à conjuguer les concepts et l'intuition. Elle pose un entendement humain fini mais actif, qui doit par conséquent recevoir le contenu de sa connaissance, les phénomènes, en liant et synthétisant des représentations. Même si le but de cette opération critique dépasse largement la seule voie de la connaissance — « Il me fallait donc mettre de côté le savoir afin d'obtenir de la place pour la croyance » (Crp, p. 24) —, elle porte ses fruits dans ce domaine, puisqu'elle montre, en une sorte de contre-épreuve (*Dialectique transcendante*, Crp, p. 251), que l'on ne saurait extrapoler des concepts

scientifiques au-delà des limites de l'expérience, vers les choses en soi, sans tomber dans des extravagances. Il est clair, en tout cas, que le pouvoir de la raison, en matière de science, s'étend au monde des phénomènes et produit la législation de la nature de la même façon que le sujet est cause de la fin qu'il se donne à poursuivre, en morale.

L'héritage critique

On pouvait croire le système kantien achevé et tenter de le répéter indéfiniment. Mais, si le néokantisme accorde, dans ses propres synthèses, une place centrale à la philosophie kantienne de la connaissance et à la distinction entre l'inné (Descartes) et l'*a priori*, s'il se place dans la perspective de la révolution copernicienne dont il fait un commencement durable et fructueux selon le parti pris par le maître de l'École de Marbourg (à laquelle on doit la publication des œuvres complètes de Kant), H. Cohen (1842-1918), il cherche à la modifier par l'introduction d'une nouvelle détermination. Car, à la lumière des progrès récents des sciences (mathématiques, relativité, biologie, mais aussi les sciences sociales naissantes), il se voit obligé d'en remanier les catégories. En les reconsidérant, il tente même de lui ajouter de nouveaux résultats. Mais, dès lors, il est nécessaire d'affirmer que la raison a bien une histoire, malgré le refus, exprimé par Kant, de lui en accorder une (*Histoire de la raison pure*, Crp, p. 569). Et, il convient de résoudre ce dilemme : structure et/ou histoire. Le point central de l'argumentation tient au développement suivant : ce que Kant avait considéré comme achevé, la table des catégories essentiellement, ne saurait empêcher de constater que la connaissance scientifique se développe selon un procès historique au cours duquel la recherche a produit les différents appareils conceptuels qui lui ont permis de s'approprier des objets nombreux et divers. En somme, il existe des phases différentes du savoir dont on peut néanmoins dégager les articulations systématiques, puisque chacune d'elles est structurellement organisée. La saisie des fonctions logiques générales de la connaissance se déplace ainsi sans cesse entre la systématité et l'histoire du savoir. La solution la plus pertinente de ce problème est proposée par Cassirer (1874-1945), lequel transforme les catégories fixes de Kant en autant de « motifs vivants de la pensée ». Il reconnaît, en effet, que la pensée crée et formule sans cesse de nouvelles catégories, mais sans vouloir abandonner la perspective structurelle de la critique qu'il inspire. Aussi montre-t-il que la raison, dont le rôle demeure de mettre en forme les données de l'expérience, ne peut s'interdire de créer des systèmes nouveaux adaptés aux problèmes inédits que découvrent sans cesse les sciences. En ce sens, les catégories passent moins pour des fonctions définitives de l'esprit humain que pour des symboles représentant, à chaque époque, les arrangements et les liaisons fonctionnelles qui caractérisent le réel. Ainsi naît une philosophie du symbole (des structures formelles *a priori*) moins enracinée dans une philosophie du sujet que dans une théorie des articulations

historiques de la connaissance. La philosophie transcendantale est étendue et englobée dans une philosophie de la culture qui préserve évidemment la focalisation du criticisme sur le jugement : pour que l'expérience humaine ne soit pas chaotique, il convient que des formes significatives la structurent. Ce que Kant réservait à l'analyse de la science, Cassirer l'applique maintenant à toutes les activités du monde de la culture : les mythes, le langage, les langues, les systèmes de signification, les formes stylistiques, etc. Ce sont par conséquent les sciences de l'homme et de la signification qui entrent, par ce biais, dans le criticisme. La forme symbolique passe désormais pour un transcendantal culturel et historique. Un savoir prend en particulier un essor certain sous le coup de ces recherches : l'anthropologie. En lui appliquant la méthode critique, Cassirer tente de la transformer en une véritable science des formes de la culture.

Une critique critique

Par quelque biais que l'on aborde cette question du criticisme, on voit bien qu'elle renforce notre manière moderne de poser le problème de la connaissance. Le savoir ne peut pas être imposé par une autorité, la vérité n'est pas révélée. Le criticisme, sur ce plan, renouvelle et amplifie le geste cartésien. La question demeure de savoir, toutefois, ce qui peut survivre de l'espace ouvert par le criticisme kantien, après sa confrontation à l'histoire des sciences, et alors qu'il était conçu, au départ, comme mise à jour du statut définitif de la connaissance scientifique. En vérité, sous le coup des remaniements, la portée et la fonction de la critique en sont largement révisées. Elle ne peut plus se contenter d'exprimer le point de vue selon lequel la raison scientifique ne doit pas se risquer au-delà des limites de l'expérience si elle ne veut pas tomber dans des absurdités métaphysiques. Sa signification est progressivement étendue à l'exploration du fonctionnement du sujet épistémique, du sujet de la vérité lui-même. C'est d'ailleurs sur ce terrain que, de nos jours, une des versions récentes du criticisme vise à reprendre en mains la problématique de l'objectivité, mais cette fois à travers le prisme du « tournant linguistique » opéré au cours du XX^e s. (J. Habermas, né en 1929 ; K.O. Apel, né en 1922). Le réaménagement porte maintenant moins sur les catégories elles-mêmes (leur nombre, leurs opérations, leurs transformations) que sur une reconstruction de la philosophie transcendantale à partir d'une théorie de la communication, donnant de la démarche scientifique une autre figure. Le sujet de la vérité, y apprend-on, ne peut demeurer pris dans un solipsisme que refléterait sa définition comme « unité originellement synthétique de l'aperception » (Crp, p. 110). Car, dans ce cas, il faudrait envisager de maintenir l'éventualité d'une origine, seule à même de rendre compte des rapports complexes entre le singulier et l'universel. De même, on ne saurait laisser la vérité en dehors du champ de la discussion argumentée. Car, dans cette optique, la cité des savants n'aurait pas de fonction. Aussi le réa-

ménagement du criticisme passe-t-il par des redéfinitions décisives. La vérité scientifique ne saurait être le résultat d'un acte d'unité qui n'engloberait pas une relation argumentative, une série de discussions appuyées sur la nécessité de se rallier à l'argument le meilleur. Ce qui survit de la critique se résumerait-il alors à une philosophie des raisonnements ?

► BAYLE P., *Dictionnaire historique et critique* (1696), Amsterdam/Leyde, 1730. – CAPELLÈRES F., *Kant philosophe newtonien*, Paris, Cerf, 2004. – CASSIRER E., *Philosophie des formes symboliques* (1923), 3 vol., Paris, Minuit, 1991. – HABERMAS J., « Théories relatives à la vérité », *Logique des sciences sociales et autres essais*, trad. R. Rochlitz, Paris, PUF, 1987. – KANT E., *Critique de la raison pure* [Crp] (1781), trad. Tremesaygues & Pacaud, Paris, PUF, 1968. – PHILONENKO A., *L'École de Marbourg : Cohen, Natorp, Cassirer*, Paris, Vrin, 1989. – SERVOIS J., *Paul Natorp et la théorie platonicienne des idées*, Lille, Presses Universitaires du Spetentrion, opuscles philosophiques, 2004. – VUILLEMIN J., *L'héritage kantien et la révolution copernicienne*, Paris, PUF, 1954.

Christian RUBY

→ Analogie ; A priori ; Concept ; Donné ; Énergie ; Géométries ; Idéalisme ; Infini ; Kant ; Phénomène ; Rationalité ; Révolution scientifique ; Transcendantal ; Vérité.

CUVIER Georges, 1769-1832

La carrière exemplaire de Georges Cuvier, né à Montbéliard, mort à Paris, commence en 1795, lorsqu'il se rend à Paris à l'invitation de Geoffroy Saint-Hilaire. Dès 1796, le grand paléontologiste professe au Collège de France, et, en 1802, au Muséum. Les *Leçons d'Anatomie comparée* (1800-1805), les *Recherches sur les Ossements fossiles* (1812-1813), le *Règne animal distribué d'après les progrès de son organisation* (1816) et l'*Histoire naturelle des poissons* (1828) ont assis sa réputation de découvreur de faits, d'érudit au savoir encyclopédique, et la légende scolaire a voulu qu'on lui prêtât la capacité de reconstruire un animal avec un seul fragment. Par un paradoxe souvent relevé, ce fondateur de la science des fossiles, la paléontologie, où l'évolutionnisme allait trouver ses meilleurs appuis, est un défenseur du fixisme.

Les organes des animaux ne sont pas juxtaposés, ils agissent les uns sur les autres, de sorte que certains traits d'organisation s'appellent nécessairement, ou s'excluent. Cette loi des corrélations organiques trouve son application la plus originale dans la possibilité de reconstituer à partir d'un fragment d'os, par exemple la forme d'une dent, l'animal auquel il a appartenu. Les vestiges d'animaux, retrouvés dans les différentes couches du globe, permettent d'établir l'existence d'espèces maintenant éteintes. La question du rapport entre ces espèces et les espèces actuelles ne pouvait pas ne pas se poser. Par voie de transformations graduelles, celles-ci ne dérivent-elles pas de celles-là ? La réponse de Cuvier est négative. Les espèces sont immuables. Celles d'autrefois ont disparu, sans laisser de descendants, à la suite de cataclysmes. Plusieurs hypothèses ont été proposées pour rendre compte de ce fixisme

intransigeant. La plus plausible retient que Cuvier, esprit positif hostile aux spéculations, constatait la stabilité des espèces vivantes, et ne pouvait supposer une mutabilité insaisissable.

► JACOB F., *La logique du vivant. Une histoire de l'hérédité*, Paris, Gallimard, 1970. – MAYR E., *The growth of biological thought. Diversity, Evolution and Inheritance*, Harvard Univ. Press, 1982. – PIVETEAU J., *Le débat entre Cuvier et Geoffroy*

Saint-Hilaire sur l'unité de plan et de composition, Paris, 1950. – ROSTAND J., *Esquisse d'une histoire de la biologie*, Paris, Gallimard, 1945. – TORT P., « Cuvier », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996.

Jean Paul THOMAS

→ Actualisme ou uniformitarisme ; Anatomie comparée ; Catastrophisme ; Créationnisme ; Développement ; Espèce ; Fossile ; Muséum national d'histoire naturelle ; Stratigraphie ; Taxinomie ; Vivant (Théorie du).

D

DARWINISME

Produire une définition théorique du darwinisme place quiconque aujourd'hui s'y engage devant l'exigence d'une double analyse. Il lui faudra d'abord rendre compte d'un usage courant de la notion dans le vocabulaire intellectuel, ce qui le conduira à parcourir l'histoire de cet usage depuis l'émergence et les premiers échos publics de la théorie de Darwin sur un théâtre qui ne s'est jamais limité, on le sait, à la seule scène de l'histoire naturelle. Il lui faudra ensuite élaborer une définition instruite qui, fondée sur une connaissance approfondie de l'œuvre du naturaliste, de sa théorie, de ses stratégies argumentatives et de son appareil conceptuel, traduise l'identification rigoureuse d'une logique et d'une cohérence qui échappent nécessairement et, souvent, s'opposent à la représentation commune. Cette dernière, reflet de l'usage dominant, devra alors, malgré sa longue hégémonie historique, entrer en régression dès qu'apparaîtra son inadéquation radicale au sens révélé par l'examen méthodique des propositions de la théorie elle-même et de leurs implications légitimes. Le problème se trouve compliqué de surcroît par le fait que cette double nécessité, dictée par l'histoire et explicable par elle, ne recouvre pas la simple opposition d'un sens vulgaire et d'un sens scientifique — les biologistes eux-mêmes ayant toujours été, en tant qu'interprètes accrédités de la théorie, les vecteurs les plus constants de l'installation dans la conscience commune des représentations caractéristiques du sens « vulgaire ».

Une fois annoncée cette difficulté classique et susceptible, somme toute, d'être reconnue à des degrés divers au sein de chaque entreprise de clarification doctrinale, il demeure cependant nécessaire de singulariser sa portée par une déclaration liminaire qui en accentue, dans ce cas précis, l'importance : aucune théorie, dans l'histoire des sciences modernes, n'a donné lieu à plus de contresens globaux que la théorie darwinienne. Aujourd'hui encore, malgré l'importance des efforts déployés pour éclairer chacun de ses points, engager à la lecture des textes et fournir un accès encyclopédique et critique à l'ensemble différencié, historique et contemporain, des discours qui s'y intègrent ou s'y rattachent, les convictions et les préjugés dominants sur le « darwinisme » continuent à produire des commentaires qui manifestent à l'évidence, le plus

souvent, une cécité réelle par rapport au sens véritable du discours de Darwin (dont la structure logique d'ensemble est si rigoureuse, en dépit de ce que disent éprouver certains lecteurs « impressionnistes », qu'elle ne saurait apparaître autre qu'elle n'est), et, dans des circonstances plus circonscrites, une volonté de mésinterprétation qui donne la mesure des enjeux liés à son travestissement. Cela entraîne une seconde remarque, qui, elle aussi, prend valeur d'avertissement : jamais les erreurs liées à l'interprétation d'une théorie scientifique n'ont eu des conséquences externes aussi graves que celles qui ont été commises à l'occasion de l'interprétation du « darwinisme ».

Il est toujours utile, lorsqu'il s'agit de s'informer sur le noyau notionnel d'un terme théorique passé dans le vocabulaire intellectuel d'emploi courant, de se référer à un dictionnaire de langue. Un dictionnaire de langue a ceci d'intéressant qu'il n'est lié que par l'obligation de rendre compte d'un usage attesté de chaque terme, et qu'à ce titre il extrait assez correctement, sans égard particulier pour le spécialiste, la substance de ce qui, d'un concept, est retenu dans l'usage comme admissible par tous.

Le *Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française* édité par Paul Robert inscrit sous l'entrée « Darwinisme » la définition suivante : « Théorie exposée par Darwin (dans *De l'origine des espèces*, 1859) selon laquelle les espèces sont issues les unes des autres selon les lois de la sélection naturelle, effet de la lutte pour la vie (V. Évolutionnisme, transformisme). » Cette définition minimale répond aux lois du genre. Sa brièveté nécessaire la réduit à un affichage de trois notions sommairement articulées (descendance, sélection, lutte pour l'existence) auxquelles il est courant de rapporter l'essentiel de la théorie darwinienne. Si le premier renvoi conduit à une définition correcte de l'évolutionnisme comme « théorie philosophique », le second restaure à cet égard une sorte d'ambiguïté en débouchant sur une définition du transformisme comme « théorie de l'évolution », qui crédite implicitement ce dernier terme (hautement plurisémiotique et « vulgaire ») d'un ancrage scientifique pour le moins discutable. Mais l'observation majeure est ici que l'ensemble de la théorie darwinienne (du « darwinisme », donc, dans la définition proposée) y est désigné comme totalement exposé dans la première édition de *De l'origine des espèces*, et que ce faisant,

les rédacteurs du *Dictionnaire* reproduisent une réduction qui a été la règle proprement aveuglante qu'ont été conduits à suivre et à propager tous les commentateurs de Darwin jusqu'au début des années 1980.

Il demeure cependant que *L'Origine* étant le livre où s'expose publiquement pour la première fois la théorie de la descendance modifiée des espèces végétales et animales par le moyen de la sélection naturelle — le noyau naturaliste du darwinisme proprement dit —, l'analyse s'impose ici de la présentation qui y est faite de cet axe central de la pensée transformiste moderne. Nous ne nous attacherons pas ici à revenir sur l'histoire ou la préhistoire du transformisme, non plus que sur l'éternelle question des rapports entre « lamarckisme » et « darwinisme », qui offrira encore sans doute une multitude d'occasions aux commentaires les plus variés, faute d'une rigoureuse élaboration définitionnelle des concepts et d'une assez fine identification des théories à leur véritable squelette logique.

L'Origine des espèces et la théorie de la descendance modifiée par le moyen de la sélection naturelle

Le « noyau » de la théorie darwinienne, tel qu'il s'expose en 1859, puis, jusqu'en 1872, au fil des six éditions de *L'Origine des espèces*, a donné lieu à de multiples interprétations dont le souci était souvent de retrouver sous le texte les processus probables ou vraisemblables de sa genèse, et, ce faisant, de faire apparaître l'exposé darwinien, dans sa version didactique progressivement stabilisée, comme une dissimulation des problématiques sous-jacentes (et éventuellement persistantes) qui étaient à l'origine de l'interrogation et de l'hypothèse de Darwin sur les mécanismes opérateurs des transformations spécifiques. Sans être le moins du monde illégitime, ce soupçon épistémologique (que les naturalistes lecteurs de Darwin n'ont quant à eux jamais partagé), en regardant sous le texte, tendait à négliger singulièrement l'obligation toujours néanmoins fondamentale et première de regarder aussi dans le texte en lui accordant cette confiance liminaire de principe qui est la condition même de la déontologie intellectuelle et de l'objectivité méthodologique. Avant de mettre une logique en « crise » ou d'en suspecter l'exposé, il est hautement souhaitable d'avoir fait d'abord à son endroit l'hypothèse de la cohérence. Avant de décider que tel développement ou telle référence est inutile à la construction théorique de Darwin (et de décréter par exemple que ce dernier aurait pu se passer de la référence à Malthus ou à la pratique de la sélection artificielle), il eût été simplement juste de se demander pourquoi ils sont mobilisés par l'auteur lorsqu'il s'agit pour lui de raconter, dans la successivité contraignante d'un récit autobiographique par exemple, les étapes de sa genèse. Or cette démarche correctement conduite engage à reconnaître dans l'exposé darwinien de 1859 l'articulation complexe mais solide de plusieurs séquences d'actes logiques mettant en jeu, comme en toute recherche réelle, une constellation de faits d'observation, d'inductions, de

déductions, de problèmes et d'hypothèses qui mobilisent bien, et d'une façon tout autre que rhétorique, l'ensemble des références évoquées par l'auteur. Notre reconstitution de la genèse de l'hypothèse sélective, comme seule hypothèse possible au terme de ce parcours à accès multiples, est désormais connue (voir par exemple l'article « Sélection naturelle » du *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*). Nous en résumons ici les moments principaux :

1) Tous les organismes vivants présentent des variations individuelles, dont on peut observer que la domestication tend à accroître la fréquence et l'étendue.

2) Il existe donc une capacité naturelle indéfinie de variation des organismes, que l'on nommera simplement leur variabilité.

3) L'horticulture et l'élevage enseignent qu'une reproduction orientée par le tri de certains caractères variants profitables à l'Homme peut stabiliser héréditairement ces traits « avantageux » par accumulation de petites variations concourant à les accentuer. Avec ou sans projet raisonné ou méthodique, un éleveur peut ainsi, par sélection artificielle ou inconsciente de caractères surgis par hasard chez un animal domestique (Darwin précise que ce caractère apparemment fortuit de la variation renvoie à une inscience actuelle de son déterminisme), en généraliser la détention par croisement exclusif des individus porteurs de ce trait.

4) Du fait, avéré par la pratique, de la sélection artificielle (ou inconsciente), on tire l'hypothèse d'une aptitude des organismes à être sélectionnés d'une manière analogue au sein de la nature. La sélectionnabilité des organismes s'induit du fait de la sélection tout comme leur variabilité s'induit du fait de la variation. L'agent de la sélection, chez les plantes cultivées et les animaux d'élevage, est l'Homme jouant avec la sélectionnabilité des variations et poursuivant à travers cette opération un avantage qu'il y trouve pour lui-même. Certaines variations sont sélectionnées (point n° 3) parce qu'elles sont utiles à l'Homme. La question se pose alors de ce qui, dans la nature, où des variétés existent et se propagent, joue en l'absence de toute intervention humaine un rôle analogue à celui du sélectionneur. C'est-à-dire de ce qui peut orienter dans une voie déterminée la reproduction des organismes. Quel serait l'agent d'une sélection naturelle ? Quelle utilité y serait-elle à l'œuvre et pour qui ?

5) Cette nécessité analogue étant mise en place, Darwin, sans changer de thème, va changer d'angle d'approche pour construire la partie restante de sa problématique, en choisissant d'évaluer *in abstracto* le taux de reproduction des diverses espèces et leur capacité de peuplement d'un territoire dans la situation idéale où cette reproduction ne rencontrerait aucun obstacle.

6) Il s'en déduit immédiatement le principe d'une capacité naturelle d'occupation totale et rapide de n'importe quelle étendue physique par les représentants de chaque espèce, s'ils se reproduisent sans obstacle, et quelles que soient par ailleurs les différences

de rythme de reproduction des organismes au sein des espèces considérées.

7) Dans la réalité de la nature cependant, on constate, au lieu de cette expansion universelle d'une seule espèce saturant par sa présence tout l'espace habitable, l'existence d'un partage de cet espace entre les représentants d'un nombre incalculable d'espèces. L'existence, donc, d'équilibres pluralistes qui n'ont certes rien de fixe, mais qui paraissent en constant réajustement au sein de leur environnement.

8) La déduction alors s'impose (suscitée par l'opposition entre les points 6 et 7) de l'opération nécessaire d'un mécanisme régulateur agissant au sein des milieux naturels et réduisant l'expansion numérique (et donc territoriale) de chaque population. Une telle régulation est inévitablement éliminatoire, opposant une destruction à la tendance spontanée de chaque groupe d'organismes à une prolifération illimitée. L'existence nécessaire (et l'observation empirique) de destructions d'organismes à l'intérieur de chaque espèce impliquant en amont, simultanément, une concurrence vitale entre eux et leur affrontement avec les conditions environnantes — l'ensemble constituant la « lutte pour l'existence » (*Struggle for life*) que doit mener chaque organisme pour assurer sa survie —, il ressort de cette situation que les organismes qui sortiraient vainqueurs de cette lutte — ceux qui échapperont à l'élimination — seront ceux qui présenteront pour y faire face l'aptitude la meilleure à tirer parti des ressources du milieu et à surmonter ses périls. La question est alors : qu'est-ce qui détermine la meilleure adaptation ?

9) La lutte pour l'existence dans la nature n'est pas une simple déduction du constat de l'existence d'équilibres populationnels dans le partage plurispécifique de l'espace habitable. Elle est également un fait d'observation, une réalité naturelle qui peut conduire, dans certains contextes, à l'élimination pure et simple d'une espèce par une autre (chap. III).

10) Darwin va pouvoir à présent joindre les deux pans de sa problématique : à la question du point n° 4 (quel peut être l'agent de la sélection naturelle ?) et à la question du point n° 8 (qu'est-ce qui détermine la meilleure adaptation ?), il n'y a plus désormais qu'une seule réponse possible (et cette unicité valide en retour l'unité de construction de cette problématique à deux entrées) : sous la pression analogique du modèle de la sélection artificielle, Darwin forge l'hypothèse d'une sélection naturelle qui, à travers la lutte (interindividuelle, interspécifique et avec le milieu), effectuerait le tri des variations avantageuses pour les organismes eux-mêmes dans un contexte donné, assurant ainsi le triomphe vital, transmissible héréditairement dans des conditions stables de milieu, des individus qui en seraient porteurs. Lesquels seraient *ipso facto* sur la voie d'une amélioration constante de leur adaptation à leurs conditions de vie (sauf perturbation sensible de celles-ci), ainsi qu'à celles de la lutte. « C'est à cette conservation des variations favorables », écrit Darwin, « et à la destruction de celles qui sont nuisibles, que j'ai

appliqué le nom de "sélection naturelle" ou de "survance du plus apte" » (trad. Moulinié, chap. IV).

L'exposé par Darwin de la théorie sélective content bien, explicités, tous ces moments logiques que nous ordonnons ici en fonction de leur ordre d'entrée dans la problématique telle qu'elle se noue au sein de l'exposé didactique de *L'Origine*. Il faut par ailleurs se souvenir qu'au moment où Darwin rédige sa grande synthèse sur les espèces (ce travail s'étend de 1842 à 1859 si l'on s'en tient au projet d'un livre sur ce sujet, mais ses notes sur la transmutation remontent à 1837), son activité de naturaliste à bord du *Beagle* lui a enseigné la haute possibilité de la descendance avec modification : dès l'été 1832, ses observations des fossiles de mammifères du Quaternaire argentin lui avaient révélé la ressemblance morphologique frappante entre certains d'entre eux et les espèces contemporaines. Il avait eu l'occasion de réfléchir également sur la distribution géographique et les migrations des animaux, mettant en relation l'existence de barrières géographiques et la diversification des faunes, et il s'était penché sur la question importante des causes de l'extinction de certains groupes dans un contexte géologique calme, théâtre de changements lents et graduels, qui excluait toute destruction de type catastrophique. Il avait observé la variation des animaux sous l'action de la domestication et étudié l'acclimatation des végétaux cultivés. Il avait enregistré l'importance universelle des facteurs climatiques, et médité sur les multiples conséquences transformatrices de l'action humaine sur la nature et ses équilibres premiers. Il avait compris l'importance des interactions biotiques et des chaînes trophiques, ainsi que la multiplicité des modes de transport des individus ou des semences. Il avait évalué aux Galapagos la proximité morphologique des espèces insulaires et continentales, ouvrant sur l'hypothèse ultérieure des spéciations insulaires par sélection de variations adaptées aux conditions locales, et sur l'idée que « les variétés sont des espèces naissantes ». Il avait pressenti enfin les effets de la concurrence entre espèces proches vivant sur un même territoire. Tous ces éléments épars convergeaient, certes, vers une interprétation transformiste, mais la théorie n'était pas encore construite. Darwin évoque dans son *Autobiographie* (rédigée à l'usage de ses enfants en 1876) le moment où celle-ci, à la manière d'un précipité chimique, a brusquement pris forme et structure : c'est celui de la lecture de l'*Essai sur le principe de population* de Malthus à l'automne de l'année 1838. Il y découvre, appliquée à la population humaine, un modèle simple de distorsion entre deux types de croissance (croissance géométrique pour la population, croissance arithmétique pour les ressources) qui débouche sur l'idée de la concurrence interindividuelle et de ses conséquences éliminatoires. Ce modèle sera appliqué par Darwin aux organismes naturels (chap. III), mais il en rejettera ensuite (en 1871) l'application aux sociétés humaines civilisées (voir *in fine*).

On perçoit à présent ce qui fait l'originalité de la démarche de Darwin. À partir d'une base d'observation

et de réflexion naturalistes qui comprend l'acceptation de la géologie uniformitariste de Lyell, l'étude de la paléontologie et l'examen des organismes vivants suivant leur distribution géographique et leurs milieux, ainsi qu'une recherche systématique sur les productions domestiques qui se verra symptomatiquement accentuée dès son retour de voyage, il s'oriente vers l'interprétation théorique de groupes de faits biologiques dont il a perçu la liaison, et construit une démarche explicative qui se présente comme l'énoncé et le traitement méthodique d'un problème dont la solution sera la sélection naturelle des variations avantageuses. On notera ici l'importance de la thématique de l'utilité. Pour Darwin en effet, toute structure organique doit avoir, ou avoir eu, une utilité, garantie de sa non-élimination par la sélection naturelle. Si les organes rudimentaires, généralement régressés, sont inutiles dans le présent de l'évolution d'un organisme, ils portent en revanche témoignage d'une utilité passée, et des phases anciennes de l'évolution adaptative de l'organisme porteur. Dans la théologie naturelle que Darwin avait étudiée d'après William Paley à Cambridge, tout le naturel, et singulièrement le vivant, était saturé par l'utile. Dieu, qui ne fait rien en vain, était le maître et le juge universel de l'utilité. Dans l'univers de la domestication végétale et animale, le juge de l'utilité était l'horticulteur ou l'éleveur. Dans la nature soumise aux lois de variation, de sélection et de régulation démographique, l'utilité est celle que tirent les organismes eux-mêmes d'un trait variationnel qu'ils présentent ou non dans un milieu qui est ou non susceptible de l'accueillir comme favorisant leur survie et leur succès reproductif. Le juge de l'utilité est donc le milieu dans toute l'étendue de sa formidable complexité interactive (substrat physique, facteurs climatiques, ressources trophiques, compétition avec des espèces rivales, prédation, parasitisme, symbiose, associations biologiques, etc.). L'écologie naîtra de cette appréhension globale des relations multiples conditionnantes et conditionnées de l'organisme vivant et de l'ensemble des composantes de son milieu de vie.

Le darwinisme écartera ainsi de ses développements toute assertion sur l'origine première, sur les commencements absolus. Il se tiendra, quant à ses explications, et comme il se doit en science, dans l'élément d'une stricte immanence, se contentant de refuser, quant à la création de la Terre et des espèces vivantes, les dogmes fondateurs des grandes religions dans leur version littéraire. La dynamique de la transformation progressive des espèces vivantes au moyen de l'accumulation, dans un sens déterminé par le seul avantage adaptatif, de variations légères (gradualisme) s'enchaînant au cours de longues périodes conduit à récuser la représentation théologique de la création indépendante et simultanée d'espèces immuables par un Créateur personnel et omniscient dont la providence aurait fixé une fois pour toutes les équilibres du monde. Les espèces descendent les unes des autres suivant un processus continu de divergence, par le moyen de modifications survenant « au hasard » (un hasard qui apparaît tel à cause,

précise Darwin, de notre ignorance des mécanismes intimes de l'hérédité), et qui sont, si elles comportent pour l'organisme un avantage dans le lieu et le moment, sélectionnées et transmises. Un grand nombre d'espèces ancestrales se sont éteintes – certaines sans laisser de traces du fait de leur fragilité – au cours de l'immense durée des temps géologiques, ce qui explique l'absence fréquente de « formes intermédiaires » entre les espèces actuellement distinctes et connues, et entre ces dernières et les espèces fossiles attestées. Une erreur courante consiste à vouloir découvrir des formes directement intermédiaires entre les espèces connues, et la recherche doit porter sur les formes intermédiaires entre ces formes et un ancêtre commun et inconnu. L'archive paléontologique, bien que livrant des témoignages précieux à l'appui de la théorie généalogique, se révèle à cet égard insuffisante, du fait de son exploration limitée et de l'effacement physique de certaines catégories d'êtres. Mais l'étude de la distribution géographique des organismes, celle des organes rudimentaires, l'examen du développement embryogénique et l'analyse des dispositifs classificatoires eux-mêmes, ainsi que l'attention portée aux croisements et aux hybridations, permettent de reconstituer les stades probables de l'évolution des êtres vivants, accréditant l'idée que les variétés sont des espèces naissantes et que tous les êtres vivants peuvent avoir une origine commune. Ainsi s'explique, à partir des variations sélectionnées des organismes, mais aussi des instincts, la prédiction finale de Darwin : « Nos classifications, aussi loin qu'elles pourront remonter, en viendront à être des généalogies. [...] La psychologie sera établie sur une nouvelle base, celle de l'acquisition nécessaire et graduelle de chaque faculté mentale. La lumière sera faite sur l'origine de l'Homme et son histoire » (chap. XIV).

**La Descendance de l'Homme (1871)
ou la logique darwinienne en anthropologie**

On ne répétera jamais assez que dans *L'Origine des espèces*, hormis le passage qui vient d'être cité, Darwin n'évoque pas l'Homme et ne consacre aucun développement aux questions de sa phylogénie, de ses variétés ou de ses caractéristiques et aptitudes spécifiques. On a spéculé sans relâche sur les motifs de cette abstention (prudence tactique face au public et à l'institution scientifique anglaise, déférence envers les croyances établies, progressivité nécessaire dans la démarche d'imposition d'une théorie globale si visiblement hétérodoxe, pédagogie non agressive de la vérité, quête préalable d'approbations de la part du milieu naturaliste, etc.). Mais on a beaucoup moins réfléchi à la conséquence du fait. Si dans *L'Origine* Darwin effectivement ne parle pas de l'Homme, c'est donc ailleurs, là où au contraire il en parle, qu'il conviendra d'aller chercher le fondement théorique de son anthropologie. Il n'en dira guère plus en 1868 dans *De la variation des animaux et des plantes à l'état domestique*, ouvrage de consolidation et d'illustration naturalistes de la théorie

sélective, qui ne fait apparaître l'Homme que comme sélecteur de races domestiques ou objet de description par les voyageurs. Ce n'est qu'en 1871, dans *La Descendance de l'Homme*, qu'il abordera, sous l'angle de la théorie de la descendance modifiée par le moyen de la sélection naturelle, la grande et sensible question de « l'origine de l'Homme » et de « son histoire ».

On doit considérer les grands ouvrages de synthèse de Darwin – ils sont au nombre de quatre, en incluant *L'Expression des émotions* de 1872 –, c'est-à-dire les œuvres qui, par leur objet et leur projet directement lié à la théorie d'ensemble, dépassent le cadre des monographies géologiques, zoologiques et botaniques, comme issus de la fragmentation et du développement sectoriel d'un grand dessin initial antérieur à *L'Origine*. Cela ne signifie évidemment pas que les titres postérieurs à 1859 aient été mûris dans leur structure et dans leur détail, ni même dans l'infléchissement particulier de leur apport à la théorie générale, avant d'avoir été conçus et rédigés comme des ouvrages indépendants. Cela signifie seulement que leur rôle dans la construction et dans la consolidation de la théorie en question était globalement assigné. C'est ainsi que l'on peut considérer *ad libitum* l'ouvrage sur la variation comme une extension ou un complément de *L'Origine*, ou l'ouvrage sur l'expression des émotions comme une extension ou un complément de *La Descendance*. C'est également ainsi – et la chose sera de conséquence – que l'on peut (et que l'on a pu) considérer *La Descendance* elle-même comme une extension ou un complément de *L'Origine*. Dans un cas comme dans l'autre – extension ou complément –, *La Descendance* était ressentie comme appelée par *L'Origine*, et, par son moment et par son thème, comme sa suite nécessaire et prescrite. Le principe transformiste y trouvait le terme de son application. Étendre le propos transformiste à l'Homme, depuis ses traits animaux les plus primitifs jusqu'à ses caractères les plus évolués, paraissait, aux partisans de la théorie, être le dernier acte nécessaire au renversement de l'ultime barrière qui s'efforçait, suivant une stratégie de repli défensif de la théologie qui n'a jamais cessé d'être le recours du dogme menacé, de tenir l'humain à l'écart et au-dessus du grand continuisme nécessaire de la théorie de la descendance. Les facultés morales et la conscience constituaient le noyau de cette résistance dualiste au monisme envahissant des défenseurs de la théorie généalogique, et Darwin devait à sa logique et à ses partisans (qu'il serait bon, on le verra, de ne pas à confondre) de ne pas reculer devant ce geste requis à la fois par la plénitude de la construction transformiste et par l'attente bien compréhensible de ceux qui voyaient le symbole du renversement frontal de la dernière opposition conservatrice au monisme. Le climat de l'affrontement impliquait donc une radicalisation et une homogénéisation du propos doctrinal : pour les « darwiniens », il fallait que l'ouvrage de 1871 fût pleinement la suite homogène ou le complément attendu de *L'Origine*, et par conséquent que les lois qui avaient été décrites dans le premier ouvrage comme

présidant à l'évolution des espèces vivantes s'appliquassent également et identiquement à l'Homme, à ses variétés et à ses cultures. L'abolition du privilège humain quant à sa nature, revendication progressiste de la science devant les ultimes interdits théologiques, devait cependant se payer de graves erreurs d'interprétation et d'une incompréhension théorique universelle devant ce que construisait réellement le discours que Darwin avait destiné à caractériser en termes évolutifs le phénomène humain de la civilisation. Nous y reviendrons.

L'extension à l'Homme de la théorie de la descendance

Nous couperons court ici à tout développement sur la traduction convenable en français du terme de *descent* tel qu'il figure dans le titre de l'ouvrage de 1871, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex*, en renvoyant à l'analyse sémantique que nous en proposons dans l'article « Descendance » du *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, et en indiquant simplement que la seule traduction conceptuellement et linguistiquement satisfaisante de ce terme est celui de « filiation ». Le poids d'une longue habitude issue de sa traduction par « descendance » (Moulinié, 1872) fera cependant que nous en accepterons l'usage comme étant aujourd'hui suffisamment critiqué pour ne plus constituer un écran devant son véritable sens – tourné à l'évidence vers l'origine, la phylogénie, l'ancestralité, l'ascendance. « L'unique objet de cet ouvrage », écrit Darwin dans l'introduction de son traité, « est de considérer : premièrement, si l'homme, comme toute autre espèce, descend de quelque forme préexistante ; secondement, le mode de son développement ; et, troisième, la valeur des différences existant entre ce qu'on appelle les races humaines » (trad. Barbier, p. XXIV).

Quant à ce dernier point, Darwin précise immédiatement qu'il ne lui sera pas nécessaire de le développer en détail, du fait du grand nombre d'ouvrages de valeur qui lui ont déjà été consacrés. Il tient pour acquis le fait de la haute antiquité de l'Homme (renvoyant à Boucher de Perthes, Lyell et Lubbock), et pour démontré le rapport établi par Huxley entre l'Homme et les Singes supérieurs. Darwin annonce que l'ouvrage « ne renferme presque point de faits originaux sur l'Homme », mais des conclusions théoriques éventuellement intéressantes. Il signale en revanche l'importance de la seconde partie, consacrée à la sélection sexuelle.

Montrer que l'Homme descend d'une forme inférieure requiert d'exploiter d'une façon systématique le champ que l'anatomie et la physiologie comparées ouvrent à l'analyse des ressemblances. Il est donc naturel que le premier acte démonstratif de Darwin consiste à dresser une liste aussi convaincante que possible des caractères physiques évoquant une similitude et rendant évident le lien qu'il entend faire apparaître entre la constitution anatomo-physiologique de l'Homme et celle des autres membres du groupe des Vertébrés, à commencer bien sûr par ceux de la classe

des Mammifères. Ces points de ressemblance, Huxley les a déjà rendus classiques : identité de conformation générale du squelette, des muscles, des nerfs, des vaisseaux, des viscères et même de l'encéphale dans le cas des Singes supérieurs ; communicabilité réciproque de certaines maladies entre les animaux (en particulier les Singes) et l'Homme ; parenté entre les parasites qui infestent les uns et les autres ; analogie également, des uns aux autres, entre les processus liés aux phases de la Lune, entre les phénomènes cicatriciels, entre les comportements reproductifs, entre les différences qui distinguent les générations et les sexes, entre les stades et les mécanismes du développement embryonnaire – singulièrement, de nouveau, dans la comparaison avec les Singes ; communauté de la détention d'organes rudimentaires ; existence d'un revêtement laineux (*Lanugo*) chez le fœtus humain au sixième mois ; traces persistantes, chez l'Homme, à l'extrémité inférieure de l'humérus, du *foramen supra-condyloïde*, ouverture par laquelle passe, chez « quelques Quadrumanes, les Lémurides et surtout les Carnivores aussi bien que beaucoup de Marsupiaux », le « grand nerf de l'avant-bras et souvent son artère principale », etc.

Anatomie et physiologie comparées sont premières, mais non suffisantes lorsqu'il s'agit de mettre en lumière les affinités généalogiques de l'espèce humaine, qui ne saurait se définir exclusivement par des caractéristiques physiques, morphologiques ou fonctionnelles, même s'il va de soi par ailleurs, du point de vue naturaliste et transformiste, que l'étude physique de l'Homme ne doit pas être dissociée de celle de ses facultés mentales et morales. La jonction continuïste entre l'Homme physique et l'Homme psycho-moral sous la conduite hautement unitaire de la sélection naturelle s'effectue chez Darwin à travers des emprunts et des références qui se répartissent entre les champs de l'anthropologie physique, de l'anthropométrie, de l'éthologie et de l'ethnographie, où il puise les éléments qui lui permettent d'illustrer le fait que la variabilité, prouvée chez l'Homme sur le terrain de l'anatomie, s'étend probablement au domaine de ses réalisations culturelles et de ses performances psycho-éthico-sociales, et que, sous des modalités qui ont été trop souvent interprétées à contresens, la sélection se poursuit au sein de l'humanité.

La théorie darwinienne de la civilisation, le « darwinisme social » et l'éthique

On a rappelé que *La Descendance* poursuivait le projet – cohérent avec le caractère moniste du continuïste transformiste et avec l'unité nécessaire de la théorie – d'une unification de l'ensemble des phénomènes biologiques et « humains » sous l'opération d'un seul principe explicatif du devenir. Très brièvement résumé, cela revient à dire que ce qui vaut pour expliquer globalement l'ensemble de l'évolution du monde vivant vaut également pour expliquer (parce que s'y appliquant dans l'origine) le monde humain

rapporté à ses origines au sein des formes antérieures. Ce principe explicatif – celui de la dynamique variation-sélection –, dérivant donc très normalement des sciences naturelles qui viennent d'être énumérées, les sciences se rapportant à l'Homme vivant en société devront être d'abord envisagées comme des régions de l'histoire naturelle pour pouvoir ensuite, éventuellement, s'ouvrir à des modalités spéciales dictées par la spécificité de leur objet. Ce qu'il faut comprendre d'emblée, et qui a été à l'origine d'incompréhensions nombreuses, est ici que lorsque l'on étudie l'Homme social dans son milieu naturel (la société, la « culture »), on ne cesse pas d'étudier l'Homme comme nature. Dans les termes d'un matérialisme transformiste bien entendu, l'Homme accédant au gouvernement de la nature ne sort pas de la nature (il en naît, il demeure en elle et il en dépend), mais accomplit sa nature propre, qui le porte à se situer, pour reprendre des termes naguère employés par le regretté Jacques Barrau, à la fois en elle et face à elle. Mais cette aptitude, singulière quant au degré qui la caractérise, possède une histoire, qui est celle, conjointe, de l'évolution organique et de celle des instincts ou facultés. Pour Darwin, l'Homme n'est l'improvisateur d'aucune de ses facultés. Il parcourra ainsi sans la moindre faute de méthode l'ensemble des régions de la science naturelle de l'Homme pour aboutir sans heurt au domaine de ce que l'on désigne aujourd'hui par l'expression d'anthropologie sociale, ainsi qu'à des observations psychosociologiques et éthiques qui, pour être spécifiquement humaines, n'en sont pas moins évolutivement liées à des données et à des conduites dont l'analyse tend régulièrement à faire apparaître l'origine au sein des groupes animaux. Le continuïste darwinien, impliqué par le fait de la descendance, ne saurait s'accommoder d'un statut d'exception dont bénéficierait l'Homme, et qui le ferait échapper à la règle évolutive la plus générale, celle de la modification par la voie générationnelle. C'est cette conséquence négative (tirée déductivement de *L'Origine des espèces*) qui a oblitéré la lecture de *La Descendance* en paraissant garantir que celle-ci ne pourrait aboutir à une autre conclusion. Sortir du dualisme semblait ainsi, aux yeux des adversaires du darwinisme, devoir condamner l'aptitude de la théorie sélective à expliquer le spécifiquement humain, ou ce qui se représentait comme tel – la morale –, ou bien ouvrir sur un immoralisme, ou bien encore conduire à une « sécularisation de la morale » de type ultra-libéral et spencérien, naturalisant l'altruisme en y projetant le détour adaptatif emprunté par un égoïsme pensé comme originare et fondamental, seule base possible et seule règle « scientifique » pour concevoir l'ordre social dans sa profonde naturalité.

Or la logique développée par le grand livre de 1871 ne saurait se borner à l'exposé simplement illustratif des raisons naturalistes qu'il y a de défendre le continuïste de la théorie de la descendance. Contrairement aux interprétations qui ont dominé pendant plus d'un siècle la lecture (jamais véritablement effectuée) du

texte de *The Descent*, ce continuïste ne fonde en droit ni ce que l'on a abusivement nommé le « darwinisme social », présent au contraire chez des théoriciens comme Spencer et Haeckel, ni, sous le motif de la « poursuite de la sélection » au sein de l'évolution humaine, aucune forme ultérieure d'inégalité sociale ou raciale qui, au nom de la biologie ou de la « nature », en eût appelé à des recommandations à caractère politique. Il nous faut ici reprendre les termes d'une explication fondamentale dont le premier exposé publié remonte à 1983, et que la nécessité didactique a dû nous conduire à répéter souvent, parfois en affinant sa formulation pour y intégrer d'une manière chaque fois plus complète l'ensemble des données livrées par le texte darwinien et l'étude de ses interactions logiques nécessaires.

Dans quatre au moins de ses chapitres, *La Descendance* établit qu'un renversement s'est opéré chez l'Homme à mesure que s'avancit le processus civilisationnel. La marche conjointe du progrès (sélectionné) de la rationalité et du développement (également sélectionné) des instincts sociaux, l'accroissement corrélatif du sentiment de sympathie, l'essor des sentiments moraux en général et de l'ensemble des conduites et des institutions qui caractérisent la vie individuelle et l'organisation communautaire dans une nation civilisée permettent à Darwin de constater que la sélection naturelle n'est plus, à ce stade de l'évolution, la force principale qui gouverne le devenir des groupes humains, mais qu'elle a laissé place dans ce rôle à l'éducation. Or cette dernière dote les individus et la nation de principes et de comportements qui s'opposent, précisément, aux effets anciennement éliminatoires de la sélection naturelle, et qui orientent à l'inverse une partie de l'activité sociale vers la protection et la sauvegarde des faibles de corps et d'esprit, aussi bien que vers l'assistance aux déshérités. La sélection naturelle a ainsi sélectionné les instincts sociaux, qui à leur tour ont développé des comportements et favorisé des dispositions éthiques ainsi que, grâce au progrès intégré des facultés rationnelles, des dispositifs institutionnels et légaux anti-sélectifs et anti-éliminatoires. Ce faisant, la sélection naturelle a travaillé à son propre déclin (sous la forme éliminatoire qu'elle revêtait dans la sphère infra-civilisationnelle), en suivant le modèle même de l'évolution sélective – le dépérissement de l'ancienne forme et le développement substitué d'une forme nouvelle : en l'occurrence, une compétition dont les fins sont de plus en plus clairement la moralité, l'altruisme et les valeurs de l'intelligence et de l'éducation. Sans rupture, Darwin, à travers cette dialectique évolutive qui passe par un renversement progressif auquel nous avons donné le nom d'effet réversif de l'évolution, installe toutefois dans le devenir, entre biologie et civilisation, un effet de rupture qui interdit que l'on puisse à bon droit rendre son anthropologie responsable d'une quelconque dérive en direction des désastreuses « sociologies biologiques ». Il s'oppose ainsi expressément au « darwinisme social », au malthusianisme, à l'eugénisme et au racisme, contrairement à l'erreur courante

qui lui attribue sommairement la justification de ces différents dispositifs d'exclusion ou de prescriptions éliminatoires. Cette remarquable dialectique du biologique et du social, qui se construit pour l'essentiel entre les chapitres III, IV, V et XXI de *La Descendance* et qui, en plus de s'opposer à toutes les conduites oppressives, préserve l'indépendance des sciences sociales en même temps qu'elle autorise et même requiert le matérialisme éthique déductible d'une généalogie scientifique de la morale, n'a été reconnue dans toute sa force logique que tardivement (Tort, 1983). Le continuum biológico-social darwinien, dont une bonne métaphore didactique est l'image topologique de la torsion du ruban de Möbius (Tort, 1992), est un continuum réversif, impliquant donc un passage progressif au revers de la loi évolutive initiale – la sélection naturelle, en tant également que mécanisme en évolution, se soumettant elle-même, de ce fait, à sa propre loi. Il faudra sans doute revenir encore longtemps sur l'explication de ce concept qui rend caduque la prétention ordinaire de la plupart des philosophies à déclarer inconcevable la possibilité même d'un matérialisme intégral englobant l'éthique. La morale est ainsi de plein droit considérée, ainsi que le notait avec justesse Yvon Quiniou commentant (*in* Tort, 1992) l'opération de l'effet réversif, un fait d'évolution.

Sélection sexuelle et sélection naturelle

Particulièrement important lorsque l'on s'attache à l'étude de l'Homme d'un point de vue phylogénétique, le traitement de la sélection sexuelle constitue une préoccupation dominante, abondamment documentée sur le plan zoologique, de l'ouvrage de 1871, et implique l'examen systématique de la proportion numérique des sexes et des différences intersexuelles au sein des espèces animales. Nous reprendrons ici en partie l'exposition que nous avons faite de ce concept dans l'article qui lui est consacré par le *Dictionnaire du darwinisme*.

La sélection sexuelle dépend « de l'avantage que certains individus ont sur d'autres de même sexe et de même espèce, sous le rapport exclusif de la reproduction » (chap. VIII). En d'autres termes, la sélection sexuelle ne repose pas directement sur la lutte pour l'existence, mais essentiellement sur une rivalité des mâles dans la compétition pour la possession des femelles, compétition dont les effets, moins rigoureux en général que ceux de la sélection naturelle bien que parfois meurtriers pour certains individus, sont momentanément disqualifiants pour les vaincus ou les évincés, sans être en principe définitivement éliminatoires. La sélection sexuelle, qui sélectionne des caractères sexuels secondaires et repose en grande partie sur l'hérédité « liée à un seul sexe », assure généralement le triomphe des mâles les plus vigoureux et les plus combattifs, ou de ceux qui possèdent une particularité morphologique favorisant leur suprématie au sein de cette compétition (cornes et ergots plus développés respectivement chez le Cerf et le Coq, crinière plus épaisse chez le Lion, plumage plus éclatant et chant

plus mélodieux chez les Oiseaux). La préférence et le choix exercés par les femelles jouent dans ce processus un rôle déterminant. Darwin retrouve au sein de l'espèce humaine des traits de comportement qui manifestent la persistance d'une sélection sexuelle sous les critères (variables suivant les cultures) de la beauté masculine et féminine, et reconnaît le rôle qu'ils jouent dans les choix nuptiaux. La sélection sexuelle, complément de la sélection naturelle, peut cependant, contrairement à elle, produire des effets anti-adaptatifs : par exemple la lourde parure de noce de tel Oiseau pendant la période des parades nuptiales peut l'empêcher quasiment de voler et constituer ainsi, en l'exposant à de multiples occasions de capture, un obstacle à sa survie. Que la tension vers l'union sexuelle reproductive — qui possède à l'évidence un lien d'origine avec ce que l'on appelle l'amour — puisse comporter d'une manière intime et permanente un risque de mort est une observation darwinienne que le freudisme confirmera, et qui illustre d'une façon remarquablement littérale le sens de l'expression « exposer sa vie ».

La sélection sexuelle, on l'a dit, sélectionne des caractères sexuels secondaires, c'est-à-dire des organes ou des traits morpho-anatomiques appartenant en propre à un seul sexe (le sexe mâle en l'occurrence), lesquels, sans avoir un lien direct avec la génération, en favorisent cependant l'accomplissement : c'est le cas par exemple des organes de préhension développés chez les seuls mâles de nombreuses espèces (certains Crustacés notamment), et qui leur servent à saisir et à maintenir la femelle lors de l'accouplement.

L'hérédité liée à un seul sexe est donc nécessaire pour penser la transmission des caractères sexuels secondaires. Lorsque ces derniers sont l'occasion d'une supériorité dans la lutte, les individus qui en sont porteurs, et qui sont de ce fait capables d'engendrer un plus grand nombre de descendants et d'en assurer la protection, transmettent à ceux-ci cet avantage. Certes, la sélection naturelle suffit à expliquer chez le mâle l'existence d'organes tels que les organes des sens et de la locomotion, qui servent à trouver la femelle, en même temps qu'à de nombreux autres usages qui paraissent spécialement destinés au maintien de la femelle pendant l'accouplement. Cependant, la sélection sexuelle a dû jouer un rôle non négligeable dans la formation et le perfectionnement de ces organes, dans la mesure où c'est ce perfectionnement même qui assure à certains mâles leur domination sur d'autres mâles, et confère aux mieux armés la faculté de transmettre cet avantage à leurs descendants mâles. Il faut également noter que les mâles avantagés ayant la possibilité de conquérir les femelles les plus saines et les plus vigoureuses, qui sont également les plus précoces sous le rapport de la capacité d'engendrement, l'avantage se répartit entre les descendants des deux sexes sous la forme commune d'une santé et d'une vigueur physique augmentées.

« La sélection sexuelle », écrit Darwin, « a dû provoquer le développement de beaucoup d'autres conformations et de beaucoup d'autres instincts ; nous

pourrions citer, par exemple, les armes offensives et défensives que possèdent les mâles pour combattre et pour repousser leurs rivaux ; le courage et l'esprit belliqueux dont ils font preuve ; les ornements de tous genres qu'ils aiment à étaler ; les organes qui leur permettent de produire de la musique vocale ou instrumentale et les glandes qui répandent des odeurs plus ou moins suaves ; en effet, toutes ces conformations servent seulement, pour la plupart, à attirer ou à captiver la femelle. Il est bien évident qu'il faut attribuer ces caractères à la sélection sexuelle et non à la sélection ordinaire, car des mâles désarmés, sans ornements, dépourvus d'attraits, n'en réussiraient pas moins dans la lutte pour l'existence, et seraient aptes à engendrer une nombreuse postérité, s'ils ne se trouvaient en présence de mâles mieux doués. Le fait que les femelles, dépourvues de moyens de défense et d'ornements, n'en survivent pas moins et reproduisent l'espèce, nous autorise à conclure que cette assertion est fondée » (chap. VIII).

Ainsi, la sélection sexuelle se superpose à la sélection naturelle, travaillant elle aussi à une amélioration qui, pour être de l'ordre de l'aptitude reproductrice et de la transmission en ligne mâle de caractères sexuels secondaires avantageux, n'en atteint pas moins bénéfiquement l'ensemble de la conformation et de la santé foncière des individus des deux sexes, par le double mouvement qui pousse les mâles les mieux doués à s'emparer des femelles les plus saines et les plus tôt prêtes à la fécondation, et les femelles à préférer les mâles les plus attrayants, ce qui a pour conséquence un perfectionnement global du niveau physique et de la valeur adaptative de la descendance : il devient dès lors difficile de démêler ce qui est dû à la sélection sexuelle et ce qui est l'effet ordinaire de la sélection naturelle.

Il est intéressant de noter que le raisonnement qui chez Darwin sert à établir la naturalité de la sélection sexuelle est structurellement le même qui a servi à établir celle de la sélection naturelle : de même en effet que l'Homme pratique (vérité de fait) une sélection sexuelle artificielle sur ses animaux domestiques — améliorant dans le sens de ses goûts ou de ses besoins telle ou telle race de Coqs par exemple —, de même la nature (vérité induite) détient la capacité de sélectionner les caractères sexuels secondaires (dont la variabilité est nettement accusée), dans le sens d'un avantage reproductif, et d'améliorer ainsi l'aspect physique des mâles de telle ou telle espèce. La démarche explicative de Darwin à propos de la sélection sexuelle dans *La Descendance de l'Homme* est en effet exactement parallèle à celle qui a été mise en œuvre en 1859 dans *L'Origine des espèces* pour faire comprendre, à travers l'existence avérée de la sélection artificielle, l'existence probable d'une sélection opérant librement au sein de la nature et produisant des effets analogues : « De même que l'homme peut améliorer la race de ses coqs de combat par la sélection de ceux de ces oiseaux qui sont victorieux dans l'arène, de même les mâles les plus forts et les plus vigoureux, ou les mieux armés, ont prévalu à l'état de nature, ce qui a eu

pour résultat l'amélioration de la race naturelle ou de l'espèce. Un faible degré de variabilité, s'il en résulte un avantage, si léger qu'il soit, dans des combats meurtriers souvent répétés, suffit à l'œuvre de la sélection sexuelle ; or, il est certain que les caractères sexuels secondaires sont éminemment variables. De même que l'homme, en se plaçant au point de vue exclusif qu'il se fait de la beauté, parvient à embellir ses coqs de basse-cour, ou pour parler plus strictement, arrive à modifier la beauté acquise par l'espèce parente, parvient à donner au Bantam Sebright, par exemple, un plumage nouveau et élégant, un port relevé tout particulier, de même, il semble que, à l'état de nature, les oiseaux femelles, en choisissant toujours les mâles les plus attrayants, ont développé la beauté ou les autres qualités de ces derniers » (chap. VIII).

Il semble donc d'une manière générale que chez presque tous les animaux à sexes séparés, il doive y avoir une compétition « périodique et constante » entre les mâles pour la possession des femelles, compétition au sein de laquelle la force, les armes et la beauté physiques des mâles d'une part, le choix exercé par les femelles d'autre part, jouent un rôle déterminant.

Au terme d'un long recensement, Darwin aboutit à la conclusion suivant laquelle les caractères sexuels secondaires sont généralement plus accentués chez les mâles des espèces polygames. En voici la raison : on admet au départ qu'une prépondérance numérique des mâles sur les femelles constitue une condition favorable à la rivalité des mâles, donc au développement chez ces derniers de caractères sexuels secondaires plus ou moins marqués selon les individus, d'où il suit que les mieux armés l'emporteront dans la compétition reproductive. Or la polygamie, qui est la situation où un seul mâle, en raison de sa force, de sa combativité ou de sa séduction, gouverne un harem de femelles, produit les mêmes effets que l'inégalité numérique des sexes : de nombreux mâles — « et ce sont certainement », écrit Darwin, « les plus faibles et les moins attrayants » (chap. VIII) —, ne pourront pas s'accoupler. On peut penser également qu'étant donné cette situation, il faudra d'autant plus de qualités à un mâle non seulement pour conquérir, mais pour conserver ses femelles et protéger ses petits. Les mâles écartés de l'accouplement ne le sont toutefois pas généralement d'une manière définitive, mais ne peuvent la plupart du temps s'unir qu'à des femelles moins vives, ce qui rejaillit négativement sur la qualité de leur descendance des deux sexes.

Les modifications qui déterminent les différences intersexuelles de l'apparence extérieure chez de nombreuses espèces sont généralement plus accusées chez le mâle que chez la femelle. Le fait que les mâles soient plus ardents, plus combattifs, et qu'ils aient presque toujours l'initiative de la poursuite amoureuse, entraîne indirectement chez eux un développement plus fréquemment remarquable des caractères sexuels secondaires. Il faut cependant se souvenir de ce que l'apparente passivité des femelles n'exclut pas

cependant de leur part un certain choix dans l'acceptation du mâle.

Une dernière idée doit être ici évoquée, en réponse à une erreur courante qui a voulu faire de Darwin le théoricien de l'infériorité naturelle des femmes. Certes, Darwin analyse en termes évolutifs, puis historiques, les raisons de l'infériorité statutaire des femmes dans la société qui lui est contemporaine. Mais il voit dans l'éducation le ressort de leur égalité à venir, et la conviction qu'il défend d'une détection par les femmes de cette forme originaire et germinale de l'instinct social (base des sentiments moraux) qu'est l'instinct maternel inspirant la tendresse qu'elles ressentent pour leurs enfants le conduit en toute logique à placer en elles l'espoir de l'évolution affective et éthique future de l'humanité (voir l'article « Femmes » du *Dictionnaire du darwinisme*).

De Darwin au « darwinisme », ou le père abusé

Que l'on donne à une théorie le nom de son fondateur n'est jamais qu'un usage. Et un usage, pour un historien, s'étudie dans son origine et ses développements. Pour un épistémologue, il s'apprécie d'une façon différenciée suivant que son contexte est celui d'un effet de vulgarisation externe ou celui, légitime et plus resserré, de sa pertinence opératoire, c'est-à-dire le domaine de la science d'où il est issu, en tant que la théorie en question y voit sa consistance authentifiée par une production maintenue de positivités contrôlables (ce qui par ailleurs ne garantit nullement une fidélité doctrinale complète à la théorie d'origine, mais seulement une référence centrale à un axe formé par l'enchaînement de quelques concepts fondamentaux). Pour l'analyste des complexes de discours, qui part de l'acquis intégré de ces deux perspectives, un usage s'évalue en outre en fonction de ses enjeux.

On a voulu voir en Darwin, pendant plus d'un siècle, le père des théories inégalitaires modernes, le promoteur d'une éthique ultra-libérale de la compétition sociale et du rejet obligatoire des inaptes (et, à ce titre, le premier représentant du « darwinisme social » et le défenseur de l'égoïsme triomphaliste des possédants), le justificateur de l'impérialisme victorien, le fondateur de l'eugénisme négatif, et le théoricien du « racisme scientifique » élaborant le substrat d'idéologie parascientifique qui devait être celui de l'hygiène raciale allemande avant et pendant l'hégémonie politique du nazisme. On a vu en lui tout ensemble, et sans souci des contradictions, Spencer, Malthus, Cecil Rhodes, Galton et Gobineau. Des commentaires innombrables ont tour à tour exploité positivement ces caractéristiques attribuées contre toute vérité — ce fut le cas de la « nouvelle droite » française dans sa propagande populaire en faveur des thèses de la « sociobiologie » américaine, qui prétend toujours incarner le darwinisme —, ou critiqué violemment — ce que font encore très souvent certains représentants de ce qu'il conviendrait d'appeler l'idéologie progressiste dominante ou seulement du consensus éthique dominant — la

personne et la théorie qu'ils estimaient responsables des grandes inhumanités de l'époque moderne. La sensible multiplication des biographies de Darwin et l'édition en cours de sa *Correspondance* ont pourtant démontré à tous les spécialistes que Darwin était un homme profondément charitable, interventionniste sur le plan social, soucieux de voir se réduire les inégalités et de voir offrir des chances égales à tous, qu'il détestait avec violence les brutalités coloniales et le racisme, qu'il haïssait la domination, l'humiliation et l'esclavage, et qu'il était l'un des membres les plus influents d'une Société ethnologique londonienne qui combattait d'une façon résolue et permanente ces exactions et leurs prétendues justifications scientifiques. Ces faits sont, en tant que tels, irréfutables et potentiellement à la portée de n'importe quel lecteur. Ils ne sauraient donc être contestés que par des faussaires, lesquels d'ailleurs, aujourd'hui, préfèrent les passer sous silence, et, sans analyser les mécanismes recteurs du discours théorique de Darwin sur l'Homme saisi dans sa dimension évolutive, émailler leurs propos de citations fragmentées qu'ils proposent comme autant de démonstrations. Opération facile avec Darwin, dont chaque lecteur expérimenté sait que, dans le traitement d'un problème sensible relatif à l'interprétation d'un phénomène, il donne d'abord la parole à tous ses interlocuteurs ou adversaires avant de proposer sa propre solution. La seule citation qui relève alors d'une position assumée par Darwin est évidemment celle qui, dans un développement de type scientifique (car tous les écrits n'ont pas le même statut) ou dans un texte d'opinion, se trouve en position conclusive, désignée comme hypothèse ou position personnelle par des marqueurs non équivoques, et en accord avec les exigences globales de la théorie. Toutes les manipulations citationnelles du texte darwinien relèvent d'un manquement, souvent tactique, à cette triple exigence méthodologique. Il convient donc de substituer à cette fragmentation idéologique les énoncés dans lesquels Darwin exprime, au terme du cheminement complexe et contrasté qui passe par l'examen des multiples arguments en présence, sa conviction propre, assumée comme conclusion de la problématique, et en accord avec les rections logiques de la théorie dont il a entrepris la démonstration. Ainsi, par rapport à l'eugénisme, il s'opposera, au nom de ce qui constitue pour lui la civilisation, aux positions galtoniennes et à la dramatisation du risque de dégénérescence : « Notre instinct de sympathie nous pousse à secourir les malheureux ; la compassion est un de ces produits accidentels de cet instinct que nous avons acquis dans le principe, au même titre que les autres instincts sociables dont il fait partie. La sympathie, d'ailleurs, pour les causes que nous avons déjà indiquées, tend toujours à devenir plus large et plus universelle. Nous ne saurions restreindre notre sympathie, en admettant même que l'inflexible raison nous en fit une loi, sans porter atteinte à la plus noble partie de notre nature. Le chirurgien doit se rendre inaccessible à tout sentiment de pitié au moment où il pratique une opération, parce

qu'il agit pour le bien de son malade ; mais si, de propos délibéré, il négligeait les faibles et les infirmes, il ne pourrait avoir en vue qu'un avantage éventuel, au prix d'un mal présent considérable et certain. Nous devons donc subir, sans nous plaindre, les effets incontestablement mauvais qui résultent de la persistance et de la propagation des êtres débiles » (*La Descendance de l'Homme*, chap. V, trad. Barbier).

Il s'opposera de même au racisme : « À mesure que l'homme avance en civilisation et que les petites tribus se réunissent en communautés plus nombreuses, la simple raison indique à chaque individu qu'il doit étendre ses instincts sociaux et sa sympathie à tous les membres de la même nation, bien qu'ils ne lui soient pas personnellement connus. Ce point atteint, une barrière artificielle seule peut empêcher ses sympathies de s'étendre à tous les hommes de toutes les nations et de toutes les races. L'expérience nous prouve, malheureusement, combien il faut de temps avant que nous considérions comme nos semblables les hommes qui diffèrent considérablement de nous par leur aspect extérieur et par leurs coutumes » (*La Descendance de l'Homme*, chap. IV).

Darwin récusera aussi le malthusianisme. À la fin de *La Descendance de l'Homme* (chap. XXI, « Conclusion principale »), défendant ses propres conclusions contre toutes formes de sélection artificielle appliquée aux sociétés humaines, il écrit : « Il ne faut donc employer aucun moyen pour diminuer de beaucoup la proportion naturelle dans laquelle s'augmente l'espèce humaine, bien que cette augmentation entraîne de nombreuses souffrances. »

Il s'agit de n'entraver par aucun artifice coercitif ou limitatif le libre jeu d'une compétition dans laquelle les individus, quelle que soit leur origine sociale, doivent avoir des chances égales de prouver leur valeur. Darwin défend en toutes lettres le droit des plus pauvres à la procréation, car « il devrait y avoir concurrence ouverte pour tous ». Le malthusianisme est d'abord rejeté parce qu'il heurte le principe même de la poursuite de la sélection naturelle au sein des sociétés humaines. Mais il ne faut pas oublier que les modalités de cette « poursuite » sont éthiques, donc opposées à la version éliminatoire, supplantée dans l'évolution, de la sélection naturelle. L'interventionnisme social de Darwin est donc rééquilibrateur : il s'agit de rétablir les conditions d'une égalité des chances face à l'obligation civilisationnelle de produire « un grand nombre d'hommes bien doués », c'est-à-dire de sujets éthiques, faisant le plus grand cas de l'altruisme et de la solidarité.

Il s'opposera enfin, tout au long de sa vie, à l'esclavage : « Je ne voudrais pas être des Tories, ne serait-ce que pour leur sécheresse de cœur au sujet de l'esclavage, ce qui doit être un scandale pour les nations chrétiennes » (lettre à J.S. Henslow du 18 mai 1832). « Cela me réjouit le cœur d'apprendre comment marchent les événements en Angleterre. Hourra pour les honnêtes Whigs ! J'espère qu'ils attaqueront bientôt cette tache monstrueuse de notre liberté tant vantée : l'esclavage

colonial. J'ai assez vu de l'esclavage et des dispositions des nègres pour être dégoûté des mensonges, des bêtises qu'on entend à ce sujet en Angleterre » (lettre à J.M. Herbert, 2 juin 1833). « Quelques-uns, et je suis du nombre, souhaiteraient même que le Nord engageât une croisade contre l'esclavage, le sacrifice dût-il coûter la vie à des millions d'hommes. En fin de compte, la cause de l'humanité serait une ample compensation pour un million d'horribles morts. Temps extraordinaires que celui où nous vivons ! Grand Dieu ! Comme j'aimerais à voir abolie cette malédiction grande entre toutes : l'esclavage ! » (lettre à Asa Gray du 5 juin 1861).

La persistance extraordinairement tenace d'erreurs d'interprétation concernant le versant anthropologique de la pensée darwinienne s'enracine dans le moment précis qui sépare la publication en 1859 de *L'Origine des espèces* et celle, en 1871, de *La Descendance de l'Homme*. Cette décennie décisive, au cours de laquelle les partisans de Darwin – lesquels étaient pour la plupart loin d'être « darwiniens » – incitèrent sans relâche ce dernier à étendre à l'Homme son propos transformiste dans un livre qui, pour avoir été trop longtemps attendu, ne sera pratiquement jamais lu dans sa littérature ni entendu dans sa logique, a vu en effet se développer le « système de l'évolution » du philosophe Herbert Spencer et son « darwinisme social », application impitoyable du principe de l'élimination des moins aptes au sein d'une concurrence sociale généralisée. Elle a vu également, à partir de 1865, la naissance de l'eugénisme de Francis Galton, recommandant l'application compensatoire d'une sélection artificielle aux membres du groupe social pour lutter contre la dégénérescence issue selon lui de l'affaiblissement du rôle de la sélection naturelle en milieu de civilisation. Ces discours – parfois inconciliables dans leurs principes mais convergents dans leurs effets – développaient ensemble une référence également réductrice à la théorie darwinienne de la sélection, dans un accord global avec les tendances dominantes de la société industrielle anglaise emportée par l'ivresse de sa métamorphose libérale. Aucune de ces deux « déviations » n'a reçu l'aval de Darwin, qui a pris position dans l'ouvrage de 1871 contre les positions et recommandations sociales et politiques qui en émanaient. Mais la confusion était née, soutenue par un système de pensée et ancrée dans le vocabulaire théorique, de sorte qu'aujourd'hui encore, un travail idéologique incessant s'obstine, contre l'évidence historique, logique et textuelle qui ressort de l'examen approfondi de l'œuvre darwinienne, à parer du nom et du prestige de Darwin – le plus souvent au moyen de montages citationnels – des doctrines ou des pratiques, telles que l'anti-interventionnisme social radical, l'impérialisme, le racisme, le « sexisme » ou l'eugénisme négative, qu'il a toujours expressément combattues.

► BURKHARDT F. et SMITH S. éd., *The Correspondence of Charles Darwin*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, vol. 1-10, 1985-1997. – DARWIN C., *Works*, éd. Pickering and Chatto

(P. H. Barrett et R.B. Freeman dir.), 29 vol. ; *Notebooks, 1836-1844*, éd. by P. H. Barrett, P. J. Gautrey, S. Herbert, D. Kohn, S. Smith, British Museum (Natural History), Ithaca, NY, Cornell Univ. Press, 1987 ; *The Autobiography*, éd. by Nora Barlow [1958], New York, Londres, Norton & C^o, 1993 ; *L'Origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature* [1859], trad. J.-J. Moulinié (d'après les 5^e et 6^e éd. angl.). Verviers, Gérard & C^o, Marabout-Univ., 1973 ; *De la Variation des animaux et des plantes à l'état domestique* [1868], trad. E. Barbier, Paris, C. Reinwald et C^o, 1879 ; *La Filiation de l'Homme et la sélection liée au sexe* [1871], éd. P. Tort et M. Prum, Paris, Syllepse, 1999, précédé de P. Tort, « L'anthropologie inattendue de Charles Darwin ». – DARWIN F. éd., *La Vie et la correspondance de Charles Darwin*, trad. H. C. de Varigny, Paris, C. Reinwald, 2 vol., 1888. – DARWIN F. & SEWARD A. C. éd., *More Letters of Charles Darwin*, Londres, J. Murray, 2 vol., 1903. – MARX K. & ENGELS F., *Lettres sur les sciences de la nature*, Paris, Éditions Sociales, 1974. – QUINIOU Y., « La morale comme fait d'évolution : continuité, émergence, rupture », in P. Tort, dir., *Darwinisme et société*, Paris, PUF, 1992, p. 47-54. – SPENCER H., *Autobiographie*, éd. P. Tort, précédé de P. Tort, « Spencer et le système des sciences ». – TORT P., *La Pensée hiérarchique et l'évolution*, Paris, Aubier, 1983 ; (dir.), *Misère de la sociobiologie*, Paris, PUF, 1985 ; (dir.), *Darwinisme et société*, Paris, PUF, 1992 ; (dir.), *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996, 3 vol. ; (dir.), *Pour Darwin*, Paris, PUF, 1997 ; *Darwin et la science de l'évolution*, Paris, Gallimard « Découvertes », 2000 ; *La seconde révolution darwinienne (Biologie évolutive et théorie de la civilisation)*, Paris, Kimé, 2002 ; *Darwin et la philosophie (Religion, morale, matérialisme)*, Paris, Kimé, 2004.

Patrick TORT

→ Anatomie comparée ; Biogéographie ; Cellule ; Contingence ; Créationnisme ; Développement ; Ecologie ; Embryogenèse ; Eugénisme ; Évolutionnisme ; Gène ; Génération spontanée ; Haeckel ; Huxley ; Lamarck ; Lamarckisme ; Lyell ; Lysenkisme ; Marx et Darwin ; Sélection ; Sociobiologie ; Taxinomie ; Théorie ; Vivant (Théorie du).

DAVIDSON Donald, né en 1917

Philosophe américain. L'œuvre de Donald Davidson s'est développée dans un contexte britannique puis américain. Elle est essentiellement constituée par un ensemble d'articles, argumentés, concis et radicaux, qui ont suscité un nombre considérable de discussions dans le milieu philosophique anglo-saxon. Un premier axe des travaux de Davidson reprend, dans le prolongement direct de l'œuvre de W.v.O. Quine, la question de la signification, mise en cause par la thèse d'indétermination de la traduction radicale. Davidson, depuis « Truth and Meaning » (1967), tente de reconstruire une théorie systématique de la signification sur la base de la théorie de la vérité de Tarski, et dans le cadre d'une théorie générale de l'interprétation du langage et des croyances. Davidson substitue à l'énigme de la traduction radicale une méthode de l'« interprétation radicale » qui permet, via un « principe de charité », de réduire l'indétermination et d'affirmer le caractère communicable des significations et des croyances. Le but de la théorie naturaliste de Davidson est de sauver la connaissance d'une « réalité objective » des critiques

contemporaines de la signification et du réalisme – comme en témoigne son rejet provocateur du « schème conceptuel » et du relativisme de Quine et Kuhn –, et de donner substance à la notion de croyance et plus généralement à une forme renouée de psychologisme, devenue centrale en philosophie de l'esprit récente. En témoigne l'autre axe de son œuvre, la philosophie de l'action, qui complète ce projet d'ensemble d'une théorie de l'interprétation du langage, des croyances et des actions en tant qu'événements et conjonctions du physique et du mental.

● *Essays on Actions and Events* (1980), trad. fr. P. Engel, *Actions et événements*, Paris, PUF, 1993. – *Inquiries into Truth and Interpretation* (1984), trad. fr. P. Engel, *Enquêtes sur la vérité et l'interprétation*, Nîmes, J. Chambon, 1993.

Sandra LAUGIER

→ Kuhn ; Quine ; Vérité.

DÉCOUVERTE

La fin du XVI^e s. inaugure l'ère des découvertes. Elles ne sont pas le tout de la science, mais désormais les autres moments de la recherche scientifique apparaîtront comme des étapes de leur préparation. De l'Antiquité grecque au XVI^e s., les découvertes avaient été rares, et la philosophie n'avait pas eu à leur consacrer une réflexion spéciale. Au regard de la science, elle se bornait à une théorie de la connaissance ou une cosmologie. À partir du XVII^e s., les découvertes se multipliaient, dans des domaines de plus en plus étendus, force fut de reconnaître leur spécificité. La tentative de les considérer comme des « accroissements de connaissances », dans le cadre des conceptions classiques de la science, a duré jusqu'à nos jours dans la littérature épistémologique ; mais la notion de découverte ne peut se laisser ainsi réduire. La multiplication de découvertes importantes depuis les lois de Kepler appelait une réflexion sur les conditions de leur genèse. La question des moyens de les stimuler et de les orienter allait être au centre des conceptions de la science des siècles ultérieurs.

Descartes exposa dans le *Discours de la méthode* des règles de logique pratique tirées de sa propre expérience de découvreur. Il croyait possible de « trouver en général les principes ou premières causes de tout ce qui est ou qui peut être dans le monde », mais il entendait aussi « descendre (aux choses) plus particulières... en venant au-devant des causes par les effets » par l'observation, l'expérience et le raisonnement. Il posait ainsi les principes d'une autonomisation durable de la science par rapport à la philosophie, dont F. Jacob, au XX^e s., dans *Le Jeu des possibles*, pourra encore faire la caractéristique de la « science moderne », fixant le début de celle-ci au moment « [...] où au lieu de se demander "Comment l'univers a-t-il été créé ? De quoi est faite la matière ? Quelle est l'essence de la vie ?" on a commencé à se demander "Comment tombe une

pièce ? Comment l'eau coule-t-elle dans un tube ? Quel est le cours du sang dans le corps ?" » (p. 27). C'est déjà dans cet esprit que Descartes désignait les objets qui seraient désormais ceux de la science, et le lieu de ses découvertes : des phénomènes, c'est-à-dire des événements « particuliers », enchaînements de moments successifs liés par une causalité ; concrètement, ceux auxquels lui et la science de son temps ont « livré bataille » : chute des corps, mouvement inertiel, réfraction de la lumière, circulation du sang. Une découverte est celle d'un phénomène, de propriétés nouvelles d'un phénomène déjà connu, ou de leurs causes.

L'hégémonie de l'empirisme et ses butoirs

L'œuvre scientifique de Newton et son interprétation philosophique par ceux qui se voulaient ses adeptes, allaient ensuite déterminer pour au moins deux siècles les conceptions dominantes concernant les conditions de la découverte scientifique : les ambitions d'explication des phénomènes affichées par Descartes, jugées excessives, sont désormais plus strictement définies, et sévèrement contenues. D'autre part, la théorie de la gravitation ouvrait des perspectives tellement prometteuses d'explication des phénomènes naturels que leur mise en œuvre, pour un siècle au moins, devait accaparer une grande partie des moyens du monde scientifique, et apparaître, pour un savant comme Laplace, comme la tâche par excellence de la science : pour résoudre les « problèmes relatifs au système du monde », on rectifierait leur analyse (forcément approchée à cause de la difficulté de ces problèmes) dans le cadre de la théorie newtonienne, et on retrouverait toujours « la cause des anomalies observées » (*Essai philosophique sur les Probabilités*, p. 101).

L'éclat de la réussite de Newton en faisait un exemple pour les autres sciences, invitées à se conformer pour leurs propres découvertes à la même méthode (ou supposée telle) que la Physique. Sous son influence, la pratique scientifique du XIX^e s. a perfectionné la méthode expérimentale, et l'a justifiée théoriquement par un corps de doctrine systématisant les notions déjà acquises d'induction, d'hypothèses, de dérivation déductive de leurs conséquences, de vérification. La conception empiriste de la science trouvera ses justifications philosophiques chez les empiristes anglais (de Bacon à Hume), chez Kant, et surtout chez Auguste Comte. Des premiers (en réaction contre le cartésianisme), la subordination du raisonnement théorique au primat de l'expérience. De Kant, le scepticisme quant à la vocation de la science à produire des représentations adéquates de la réalité des phénomènes, et une conception des lois de la nature comme cadres de l'explication scientifique imposés par l'entendement, et non comme des expressions de réalités naturelles. Et suivant Comte, qui proscrivait toute hypothèse « concernant la détermination des agents généraux auxquels on rapporte les différents genres d'effets naturels » (*Cours de Philosophie positive*,

28^e leçon), l'empirisme, allant plus loin que Kant, s'interdit toute recherche sur les « causes des causes ». A. Comte ne voulait connaître, outre les causes premières et les causes finales (qu'il excluait les unes et les autres du champ de la connaissance scientifique), que les causes prochaines des phénomènes, qu'il ne tenait pas pour passibles d'une explication causale à un niveau plus profond : « [...] les phénomènes les plus généraux de l'univers sont expliqués, autant qu'ils puissent l'être, par la loi de la gravitation newtonienne. [...] Quant à déterminer ce que sont en elles-mêmes cette attraction et cette pesanteur, quelles en sont les causes, ce sont des questions que nous regardons comme insolubles » (*ibid.*, 1^{re} leçon).

Avec des nuances de l'un à l'autre, parfois des réticences (et des exceptions de premier plan, comme Darwin, Maxwell ou Boltzmann), cette conception de la recherche scientifique, adoptée par la majorité des savants du XIX^e s., a marqué leurs politiques personnelles de recherche ; elle continuera à prévaloir dans la première moitié du XX^e s., et conserve encore une influence.

Elle avait pourtant des points faibles. La focalisation de l'analyse épistémologique sur un moment de la recherche scientifique concentré entre la formulation des hypothèses, leur test expérimental, et la critique de ses résultats, ne facilitait la prise en considération ni de l'historicité de la découverte – son insertion entre un passé où sont ses racines, et un avenir où se révélera sa fécondité – ni sa socialité, inscrite non seulement dans la division du travail scientifique mais dans les applications pratiques qu'elle engendre, dont une demande sociale peut la stimuler, et qui même peuvent être à la source de transformations de ses représentations. Mais c'étaient les limites imposées par l'empirisme à l'explication causale qui devaient à la fin du XIX^e s. le confronter à une véritable crise, déjà en germe dans la théorie de l'évolution de Darwin, mais dont une manifestation aiguë fut la « bataille de l'atomisme », à l'intérieur même de la Physique. L'empirisme logique tenta encore de s'adapter au flot des découvertes de la première moitié du XX^e s., en particulier en élaborant une logique formalisée de l'induction (Carnap, Reichenbach...), mais sans remédier à ses points faibles ; ce que ne fit pas non plus la Philosophie analytique, qui le prolongea par des analyses raffinées d'allure scolastique (Quine, Hempel...). La « critique » poppérienne, faisant des « discussions critiques » des résultats expérimentaux et des hypothèses théoriques, entre savants, la principale source des découvertes (*La connaissance objective*), ne pouvait avoir qu'une portée étroitement limitée.

Retour au réalisme

Pour Descartes, la réalité des phénomènes de la nature allait de soi : le titre de la sixième Partie du *Discours de la méthode*, « Choses requises pour aller plus avant dans la recherche de la Nature », substituant le mot « recherche » à celui de « connaissance » qu'on

aurait attendu, est significatif d'un esprit réaliste que la philosophie pourra contester, mais dont la recherche scientifique ne pourra jamais se détacher entièrement. Le scepticisme kantien, auquel Hegel puis Marx allaient opposer une réplique philosophique, devait d'autant plus heurter la conviction spontanée de savants désormais autant ambitieux de découvrir que de connaître, qu'une conception idéaliste de la découverte est plus difficile à défendre que celle de la connaissance. Au milieu du XIX^e s. déjà, Darwin référerait sa conception de l'évolution des espèces au « système naturel » élaboré par les naturalistes (*L'Origine des espèces*, chap. VII). À la fin du siècle, en Physique, fait plus significatif, Duhem, qui au nom d'un positivisme comtien s'était opposé jusqu'au bout à la théorie atomique, se référerait explicitement à l'exemple des naturalistes pour en venir à admettre (en le soulignant lui-même), que « au fur et à mesure qu'elle progresse, la théorie physique devient plus semblable à une classification naturelle, qui est son idéal et sa fin » (Appendice à *La Théorie Physique, son objet, sa structure*, p. 452-453).

Le triomphe de l'atomisme allait avoir des conséquences allant plus loin. L'hypothèse atomique ne pouvait relever de la procédure de validation du « schéma hypothético-déductif » standard de l'empirisme. Le processus de recherche par lequel l'existence réelle des atomes devait s'imposer impliquait un ensemble de recoupements entre des manifestations multiples, convainquantes ensemble, de la réalité (et non seulement de l'objectivité) des phénomènes concernés : lorsqu'un phénomène devient le point de convergence de pratiques scientifiques objectives (dont les règles peuvent être formulées indépendamment des identités personnelles des sujets qui les représentent), et indépendantes les unes des autres, en ce sens que les résultats des unes ne peuvent être déduits des théories qui conditionnent les autres, il devient difficile d'imaginer une autre raison de cette convergence que la réalité de ce phénomène. L'ouvrage de J. Perrin, *Les Atomes*, était une véritable anthologie des recoupements dont la convergence devait finalement faire adopter l'hypothèse atomique par l'ensemble des physiciens. L'hypothèse génétique en Biologie, l'hypothèse du big bang en Cosmologie, s'imposèrent selon la même logique de recoupement que l'hypothèse atomique en Physique. La règle méthodologique du recoupement s'imposait aussi à la Biologie évolutionniste, parce qu'elle est de rigueur dans les sciences historiques dont les objets, se situant dans le passé, sont inaccessibles à des tests expérimentaux directs. Pour établir la réalité des événements historiques, il faut disposer d'une pluralité de sources, et s'assurer de leur indépendance mutuelle ; cette exigence vaut aussi bien pour l'histoire des sociétés humaines que pour celle de la vie, des climats, ou de l'Univers lui-même. L'« accord intersubjectif » des savants, expression de l'objectivité des phénomènes selon la pensée positiviste, se fonde en fait sur les recoupements permis par les travaux, à la fois convergents et indépendants, de leurs participants ; la

seule répétition têtue d'expériences fondées sur un même principe (même avec des variantes) ne peut y suffire. La conséquence d'un recoupement n'est pas d'établir sans conteste possible l'existence objective d'un phénomène réel, mais d'obliger à la prendre en considération. Il est le déclin d'un processus d'exploration de ce phénomène, qui à la fois consolidera les preuves de sa réalité et pénétrera dans le monde de ses propriétés. Les explorations de phénomènes, méconnus des philosophies empiristes, sont la partie de la recherche scientifique qui mobilise la plus grande part de ses moyens humains, matériels et financiers.

L'interdiction de rechercher les « causes », opposée à la science par le dogme comtien, une fois transgressée, va l'être à répétition, indéfiniment : sous l'atome, les particules élémentaires ; sous l'élémentarité apparente des hadrons, les quarks, etc. (cf. J.-P. Baton & G. Cohen-Tannoudji, *L'horizon des particules*) ; sous les organes de l'organisme vivant, les cellules, sous les cellules, les molécules... La pratique scientifique se prête ainsi à une conception philosophique du monde, celle d'une organisation hiérarchique, qui, bien qu'étayée par les découvertes de la science, ne relève pas de ses procédures de validation, mais est un cadre de référence pour la conception des programmes de recherches. Elle implique une nouvelle conception des lois de la nature, selon laquelle celles d'un niveau donné de son organisation doivent être compatibles avec celles des niveaux d'organisation plus élémentaires, mais ne peuvent en être déduites. Cette conception des lois de la nature n'est pas incompatible avec leur interprétation kantienne comme des cadres *a priori* de la connaissance, mais une philosophie réaliste peut aussi suggérer que les lois des phénomènes naturels sont des produits réels de phénomènes relevant d'une histoire réelle de la nature. Déjà Darwin avait avancé l'idée que dans les sciences de la vie : « [...] toute classification vraie est [...] généalogique ; la communauté de descendance est le lien caché que les naturalistes ont, sans en avoir conscience, toujours recherché, sous prétexte de découvrir, soit quelque plan inconnu de création, soit d'énoncer des propositions générales, ou de réunir des choses semblables et de séparer des choses différentes » (*L'Origine des espèces*, chap. VII). La Physique et la Cosmologie scientifique du XX^e s. ne disent pas autre chose quand elles vont chercher l'origine des lois de la Physique dans des brisures spontanées de symétrie, historiquement datées, de l'Univers primitif.

La découverte, phénomène historique

La découverte n'est pas seulement dans certains cas celle d'une histoire, elle a aussi sa propre histoire. À la fin du XIX^e s., Duhem fera remarquer que « les hypothèses ne sont point le produit d'une création soudaine, mais le résultat d'une évolution progressive », et montrera, notamment par une longue analyse de la genèse de la théorie newtonienne de la gravitation (*op. cit.*, chap. VII, § II), qu'il lui avait fallu tous les

moyens de la pratique scientifique : une exploration longue et diverse de phénomènes dont les relations réelles ou supposées avec la gravitation avaient été plus ou moins clairement perçues ou supposées (l'aimantation, les marées, les lois de l'éclaircissement) ; des représentations théoriques de ces phénomènes ébauchées ou déjà élaborées (les lois de Kepler), et la conquête corrélatrice de notions théoriques (centre de gravité ; effets en raison inverse du carré de la distance ; et en dernier lieu, la notion d'attraction mutuelle, imposée par les phénomènes d'aimantation). Il y fallait, en outre, des progrès dans les moyens de représentation des phénomènes, que ce soit ceux des moyens de mesure et d'observation, de plus en plus précis (l'augmentation de la précision des observations des astres, permise par les précautions méticuleuses mises en œuvre par Tycho Brahé, avait été décisive pour fonder la remise en question des orbites circulaires encore admises par Copernic), ou les nouvelles possibilités de modélisation mathématique offertes par la Géométrie algébrique de Descartes et l'Analyse différentielle de Newton. Duhem pouvait conclure qu'à la fin du XVII^e s. tout était prêt pour la découverte de la gravitation universelle. Il y fallait un savant de génie ; mais si ce n'avait été Newton, un autre savant de génie l'aurait faite. Cette conception de la genèse des découvertes, qui ne se contente pas d'en faire (comme l'ont pensé Reichenbach ou Popper) l'œuvre de l'invention irrationnelle d'hypothèses improbables par des intuitions de savants de génie, sera applicable, au XX^e s., à la théorie de la Relativité. Elle semble valoir pour toute science suffisamment mûre. À la fin du XX^e s., une somme comme *La Logique du vivant* de F. Jacob pourra faire une démonstration analogue pour la Biologie.

L'historicité de la découverte scientifique appelle une réflexion sur les modes de transformation des connaissances scientifiques : continuité ou sauts qualitatifs ? Aux conceptions continuistes, T. Kuhn, dans *La Structure des Révolutions scientifiques*, a opposé l'idée que le travail continu de la « science normale » finit par se résoudre en révolutions scientifiques qui transforment la structure des connaissances. Son analyse repose sur les notions, strictement homologues, de « paradigme » et de « groupe scientifique » : un paradigme implique à la fois un ensemble cohérent de représentations théoriques des phénomènes relevant d'une discipline scientifique, et un ensemble d'applications-types, servant en particulier à la transmission du savoir ; un groupe scientifique s'en fait le représentant et le gardien ; une révolution scientifique consistera en un renversement d'un paradigme ancien, mis en « crise » par son incapacité de résoudre des « anomalies », inexplicables sans l'abandon du paradigme, son remplacement par un nouveau paradigme, et corrélativement le renversement et le remplacement des groupes scientifiques qui leur sont respectivement homologues.

La notion de révolution en tant que rupture qualitative avec des représentations scientifiques anciennes désigne des événements dont la réalité ne fait pas de

doute, même si leur définition peut prêter à discussion. Déjà Duhem avait fait remarquer qu'« une expérience de Physique ne peut jamais condamner une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble théorique », ce qui implique la possibilité d'un changement qualitatif d'ensemble du système théorique en question (sans qu'il soit nécessaire d'y impliquer d'emblée, au même niveau d'essentialité que les systèmes théoriques, les expressions paradigmatiques qui les soutiennent). Le schéma kuhnien était d'autre part discutabile en ce qu'il se bornait à considérer les changements de paradigme et de groupes scientifiques à l'intérieur d'une discipline donnée, en sous-estimant les phénomènes d'éclatement des disciplines scientifiques, et le renforcement de leurs relations avec d'autres disciplines plus ou moins étrangères – phénomènes pourtant patents dans les principaux événements qu'on peut s'accorder à tenir pour révolutionnaires. Ceux-ci supposent au contraire l'ouverture des disciplines scientifiques concernées, au point qu'on pourrait plutôt les définir comme des synthèses entre des domaines de connaissances antérieurement étrangers l'un à l'autre : synthèse des sciences de la Terre et des sciences du Ciel (Copernic), synthèse de la Géométrie et de la Mécanique (Kepler, Galilée, Newton), synthèse de l'Optique et de l'Électrodynamique (Maxwell), des sciences de la Terre et des sciences de la Vie (Darwin), de la Biologie et de la Chimie (Biologie moléculaire), synthèse encore en chantier de la Mécanique et des sciences du rayonnement (Relativité, Quanta, et la suite). L'efficacité des révolutions scientifiques tient à leur caractère de synthèse : une révolution scientifique met en relation tout phénomène de chacun des domaines qu'elle unifie avec ceux des autres ; elle stimule un réexamen général de tous les phénomènes des uns et des autres, et la découverte d'aspects nouveaux de ces phénomènes ; des phénomènes jusqu'alors inaperçus de l'un deviennent évidents d'après leur correspondance à des phénomènes bien connus de l'autre ; elle croise les résultats expérimentaux et théoriques des domaines concernés ; les modèles théoriques de l'un prennent un sens nouveau à la lumière des résultats expérimentaux de l'autre, et réciproquement. Une science théoriquement plus avancée peut ainsi recevoir un renfort de soutien expérimental, tandis qu'une autre, disposant d'une riche collection d'expériences, mais en quête d'explications théoriques de leurs résultats, peut les recevoir de la première. L'une et l'autre deviennent pratiquement beaucoup plus puissantes, et du même coup se préparent à de nouvelles avancées de la connaissance.

Les révolutions scientifiques scandent ainsi un développement continu de travaux d'exploration de phénomènes et de théorisation, et la croissance continue des précisions des représentations des phénomènes (précision des mesures, des techniques d'observation et d'expérience, des moyens de calcul, instruments et analyse numérique), par des synthèses dont le résultat est une extension qualitative du champ des connaissances scientifiques, et une maîtrise toujours plus

étendue dans les dimensions du « très grand », du « très puissant » et du « très petit ».

La découverte, phénomène social

Une des difficultés des philosophies de la connaissance pour penser la découverte scientifique est qu'on ne peut parler d'un « sujet » d'une découverte comme on le fait de celui d'une connaissance. Une découverte a un auteur qui, même quand il n'est pas collectif, est déjà un personnage social occupant une place donnée dans une structure sociale donnée. La socialité de la découverte se manifeste d'abord par le rôle qu'y joue la division du travail scientifique. Celle-ci, au début du XIX^e s., était à peu près limitée aux seules divisions de la classification des sciences ; elle s'est énormément développée depuis lors, et compliquée de divisions transversales, entre théoriciens, expérimentateurs, concepteurs et réalisateurs de moyens de mesure, de contrôle et de calcul, et d'autre part, entre chercheurs de recherches fondamentales et appliquées. Le rôle de la division du travail scientifique est explicitement reconnu et signalé au XX^e s. par des philosophes comme Bachelard. Mais il ne rend pas compte de la solidarité de la science avec l'ensemble des pratiques humaines, au-delà de la « cité scientifique » dans laquelle Bachelard la confine, et dont Kuhn ne l'extrait pas. Non seulement les pratiques humaines, dans leur ensemble, ont besoin de représentations scientifiques des phénomènes qui les conditionnent, mais, en stimulant l'exploration de ces phénomènes, en appelant des progrès dans la précision de leurs représentations, elles sont des facteurs actifs de découvertes, et remuent le terrain qui les fécondera. Cet aspect de la socialité de la découverte scientifique ne trouve que peu d'échos dans la littérature épistémologique. Ce n'est qu'au détour d'une remarque de Duhem, par exemple, qu'on trouvera une allusion (en l'occurrence convaincante) au rôle des astrologues et des médecins dans la genèse de la théorie newtonienne de la gravitation. Des efforts venus d'autres côtés ont entrepris de pallier cette carence de l'épistémologie : ceux de la pratique (purement empirique) de la prospective, et ceux d'une sociologie et d'une socio-économie de la science. Ces efforts ont en général été marqués par la liaison plus étroite qu'ils établissent entre la science et le développement technologique, qu'avec ses applications pratiques en général.

La prospective, invention des années 1940, a voulu « prévoir » quelque chose des évolutions à venir, d'abord du développement technologique, si possible des structures sociales, et accessoirement de la science. Bien que toute découverte introduise dans la science des connaissances sur lesquelles on ne peut anticiper complètement qu'en la réalisant (il en va de même de l'innovation technologique), il n'est pas entièrement illusoire de chercher à déterminer quelles sont les conditions générales qui fertilisent le terrain des découvertes, la question étant de déterminer le degré de généralité auquel on s'arrête. La prospective implique un

utile inventaire des phénomènes qui appellent des compléments d'exploration. Mais, inspirée par des intérêts industriels et politiques, et souvent pressée d'aller trop loin dans le détail (qu'il s'agisse de ses « scénarios », des « faits porteurs d'avenir » ou des « tendances lourdes » qu'elle a cru identifier), elle a, de l'aveu même d'auteurs qui l'ont pratiquée comme P. Papon, davantage montré les limites de la prévision des évolutions de la science qu'elle n'a conduit à éclairer leurs conditions. Ces limites tiennent notamment au morcellement des analyses, et au conservatisme, plus encore de l'esprit qui l'inspire en général, que de ses méthodes.

L'originalité de la sociologie de la science est d'avoir délibérément entrepris de considérer celle-ci comme une activité pratique. L'ouvrage de T. Kuhn, *La structure des révolutions scientifiques*, écrit en réaction contre l'abstraction de la « critique » poppérienne, a été une des premières et des plus marquantes manifestations de cette nouvelle orientation. Il annonçait aussi un glissement vers une anthropologie de la science, qui se donnerait pour objets la structure, les mœurs et les formes de la pensée des populations de travailleurs scientifiques. La sociologie de la science proprement dite devait aussi s'orienter vers des enquêtes monographiques. Ces travaux dans leur ensemble sont restés marqués d'empirisme, et la fécondité de ces nouvelles formes d'analyse des processus de découverte ne peut être actuellement ni prouvée ni récusee.

La socio-économie de la science trouve son inspiration à l'extérieur de la science. Une part importante de ses travaux, portant par priorité sur les apports de la science à la solution de problèmes de la production marchande industrielle, agricole et de services, plutôt que sur la genèse de ses découvertes, a été effectuée sous l'inspiration en particulier de l'Organisation de coopération et de développement économique. Mais à partir de cet aspect des relations de la science avec d'autres pratiques sociales, elle doit prendre acte de la dépendance réciproque qu'elles impliquent, et de l'importance de favoriser la fécondité de la science en découvertes pouvant retentir sur l'économie générale. Elle est ainsi amenée à ouvrir des perspectives plus larges que son inspiration ne l'y disposait, en mettant l'accent sur le rôle d'une organisation sociale de la recherche scientifique et de ses relations avec les lieux de l'application pratique de ses découvertes (et bien entendu, l'innovation technologique). L'intérêt porté aux « technopoles » et plus récemment aux réseaux de la recherche scientifique, comme facteurs de fécondité de la science, exprime cette prise de conscience, que la constitution effective de réseaux a d'ailleurs précédée. Un réseau unit, de façon formelle ou informelle, et plus ou moins durable, des chercheurs de laboratoires de différentes spécialités de la recherche fondamentale ou appliquée, autour d'un ensemble de problèmes interdépendants de théorie, d'explorations de phénomènes, de technologie de la science (mesure, contrôle, calcul), et autour de grands équipements. L'union organique des

moyens de recherche, réalisée par les réseaux, s'adapte bien aux conditions complexes de la découverte scientifique. Elle pose des questions d'appropriation (publique ou privée) des connaissances produites. Plus fondamentalement, elle pose la question de la spécificité de la recherche fondamentale, unie plus ou moins étroitement dans certains réseaux à des recherches appliquées, et que le monde de l'économie sollicite de se fondre dans celles-ci. Un certain recouvrement entre elles a d'ailleurs des bases réelles : une exploration de phénomène est toujours motivée par la finalité d'une pratique sociale conditionnée par le phénomène exploré, qui peut être la pratique scientifique elle-même (un résultat scientifique, une découverte scientifique ne produisent pas seulement des connaissances, mais des moyens de recherche nouveaux qui serviront à des avancées scientifiques ultérieures), mais peut tout aussi bien être une pratique extérieure à la science (et notamment une pratique de production industrielle) ; il en va de même des moyens de la technologie, qui ne sont pas forcément destinés uniquement à un marché, mais peuvent aussi servir à des recherches scientifiques et même dans certains cas sont conçus et réalisés pour elles. Une exploration de phénomène, une innovation technologique n'ont pas exactement les mêmes caractères selon leur intention de connaissance ou d'application, mais le recouvrement est réel entre ce qui dans ces démarches de la science relève respectivement du fondamental et de l'appliqué. Il n'en va pas de même des recherches théoriques consacrées à l'élaboration des concepts scientifiques et de leurs modes d'emploi. Une caractéristique des recherches fondamentales se trouve dans l'étroitesse et le caractère organique des liaisons qu'elles entretiennent avec des recherches théoriques. Un réseau ne réunit pas seulement des savants individuels, mais des savants qui appartiennent à des organismes de recherches, et sont imprégnés de la culture qu'ils ont héritée de l'histoire de ces organismes : il y a des organismes de recherche fondamentale qui assurent à leurs chercheurs la base théorique dont ils ont besoin. Une autre caractéristique de la recherche fondamentale tient à la nature des moyens de représentation des phénomènes qu'elle élabore, qui sont, à chaque époque, les plus précis existants (qu'il s'agisse des moyens d'expérimentation, de mesure ou de calcul) et en quelque sorte les « étalons de connaissance » de l'époque. Ces deux caractéristiques font que la recherche fondamentale n'est pas seulement destinée à la satisfaction d'un désir de connaissance, ou au soutien à des recherches appliquées aux besoins de la production marchande ; elle est la matrice des révolutions scientifiques à venir. L'ère de celles-ci n'est à l'évidence pas close, et cela permet de mesurer l'importance de la recherche fondamentale à l'aune des conséquences qu'on peut attendre d'elles.

► BACHELARD G., *Le Matérialisme rationnel*, Paris, PUF, 1934 ; *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1977. — BATON J.-P. & COHEN-TANNOUJ G., *L'horizon des particules*, Paris, Gallimard, 1989. — CARNAP R., *Philosophical*

Foundations of Physics, Basic Books, 1966 (trad. fr., *Les Fondements philosophiques de la Physique*, Paris, A. Colin, 1973). — COMTE A., *Cours de Philosophie positive*, éd. crit., Paris, Hermann, 1975. — DARWIN C., *L'Origine des espèces* (1872), trad. fr., Paris, Flammarion, 1992. — DESCARTES R., *Discours de la Méthode*, Paris, Gallimard « Pléiade », — DUHEM P., *La Théorie physique, son objet, sa structure*, 2^e éd., Paris, Vrin, 1914 (rééd. en facsimilé, 1981). — HEMPEL C.G., *Empirical Criteria of cognitive significance problems and changes, in Aspects of scientific explanation* (1965), trad. fr. in JACOB P., *De Vienne à Cambridge*, Paris, Gallimard, 1980. — JACOB F., *La Logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970 ; *Le Jeu des Possibles*, Paris, Fayard, 1982. — KANT E., *Critique de la Raison Pure* (1781), trad. fr. Tremesaygues & Pacaud, Paris, PUF, 1944. — KUHN T., *The Structure of scientific revolutions*, 2^e éd., Presses Univ. de Chicago, 1970 (trad. fr., *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1972). — LAPLACE P.-S., *Essai philosophique sur les probabilités*, 5^e éd., 1825, rééd. Paris, C. Bourgois, 1986. — PAPON P., *Pour une Prospective de la science*, Paris, Seghers, 1983. — PERRIN J., *Les Atomes* (1913), rééd., Paris, Flammarion, 1991. — POPPER K.R., *Logique de la découverte scientifique* (1935), trad. fr., Paris, Payot, 1978 ; *Objective Knowledge* (1972), trad. partielle *La Connaissance objective*, Paris, Complexe, 1978. — QUINE W.V.O., *World and Object*, Cambridge, 1960. — REICHENBACH H., *The Theory of Probability*, Presses de l'Univ. de Californie, 1949. — SCHLANGER J. & STENGERS I., *Les concepts scientifiques, invention et pouvoir*, Paris, La Découverte, 1989. — Coll. : OCDE, *La Technologie et l'économie, les relations déterminantes*, 1992.

Jacques BONITZER

→ Abduction ; Analyse et synthèse ; Bachelard ; Cercle de Vienne ; Complexité ; Conjecture ; Duhem ; Expérience cruciale ; Fait ; Hanson ; Idonéisme ; Invention ; Méthode ; Parcomonie ; Popper ; Prix Nobel des sciences ; Réalisme ; Test ; Validation ; Whewell.

DEDEKIND Julius Wilhelm Richard, 1831-1916

J.W.R. Dedekind participe à la grande école allemande des mathématiques du XIX^e s. La carrière de cet homme discret se déroule parmi les plus grands centres des sciences en Allemagne et en Suisse, toujours au contact des plus grands mathématiciens contemporains. Ses travaux renouvellent bon nombre de questions soulevées à son époque, et enclenchent une dynamique qui aboutira aux grands développements modernes autour des fondements des mathématiques, de la formalisation et de l'axiomatique, et de la théorie des ensembles.

Les progrès de l'analyse au XIX^e s. et son ancrage parmi les nombres font ressentir la nécessité d'en expliciter les fondements. Dedekind se propose de construire les irrationnels à partir des nombres rationnels. Il montre que certaines coupures bien choisies de l'ensemble des rationnels, soit sont des nombres rationnels, soit définissent complètement les nombres irrationnels. Sa construction des réels repose sur la construction des ensembles des entiers et des rationnels, à laquelle il s'attellera, mais aussi sur une méthode qu'on qualifie de complétion, devenue classique aujourd'hui. Dedekind poursuit aussi les travaux

de Gauss et Kummer sur ce qu'on appellera plus tard l'algèbre commutative, pour laquelle il donne une axiomatique et un sens ensembliste aux notions fondamentales de corps, d'anneau, d'idéal.

Les concepts qu'il développe — avec son ami Georg Cantor — déplacent les questions des fondements sur le terrain de la théorie des ensembles, qui, même si elle butera plus tard sur les fameux paradoxes, est encore le lot quotidien du mathématicien fondamentaliste.

● *Stetigkeit und irrationale Zahlen* (1872) et *Was sind und was sollen die Zahlen ?* (1888), trad. J. Miller & H. Sinaceur, in *Les nombres. Que sont-ils et à quoi servent-ils*, Paris, Oricat, 1979.

Jean-Pierre SUTTO

→ Cantor ; Ensemble ; Extension ; Induction complète ; Local et global.

DÉDUCTION

LOGIQUE

La déduction constitue un mode particulier d'inférence, d'enchaînement discursif de propositions. Manifestement, elle se distingue de l'argumentation rhétorique en ce qu'elle ne vise pas à disputer, réfuter pour convaincre, persuader l'auditoire en vue de l'action, quitte à user de raisonnements incorrects. Son objet est précisément de fournir les règles de correction des inférences. Loin d'être de l'ordre de l'*ethos* (l'image que l'orateur veut donner de lui-même par sa parole) ou du *pathos* (les émotions qu'il vise à éveiller chez l'auditoire), la déduction relève du *logos* (l'organisation proprement rationnelle du discours) (cf. Aristote, *Rhétorique*, I, 2, 1356 a, 5-20).

Longtemps, le modèle de déduction fut le syllogisme aristotélicien ainsi défini : « Le syllogisme est un discours dans lequel, certaines choses étant posées, quelque chose d'autre que ces données en résulte nécessairement par le seul fait de ces données » (*Prémiers Analytiques*, I, 1, 24 b, 19). Sous sa forme canonique, il permet de déduire une conclusion à partir de deux prémisses, l'une majeure, l'autre mineure :

Tous les hommes sont mortels,
Tous les Grecs sont des hommes,
Donc tous les Grecs sont mortels.

L'important est ici que la nécessité de la déduction est totalement indépendante du contenu des propositions et relève de leur seule forme exprimable en usant de variables, en l'occurrence ici :

Tous les A sont B,
Tous les C sont A,
Donc tous les C sont B.

Le syllogisme est ainsi tributaire d'une structure formelle. Purement analytique, il s'avère d'application universelle. Tout ceci parce qu'est en jeu non la vérité factuelle des propositions qui le composent mais la validité, vérité purement formelle, portant sur le seul

enchaînement des propositions dans le raisonnement. À preuve, le fait que l'inférence :

- Toutes les baleines ont des fanons,
- Tous les canaris sont des baleines,
- Donc tous les canaris ont des fanons,

est bien un syllogisme alors même que sa conclusion est matériellement fautive parce que sa mineure est fautive (lorsque les deux prémisses sont vraies, le syllogisme assure que la conclusion est vraie).

Ce rappel permet de comprendre en quoi la déduction se distingue de l'autre grand mode d'inférence : l'induction. Non point parce que l'induction irait du particulier au général alors que la déduction procéderait du général au particulier. Pour ne parler pour l'instant que du syllogisme comme déduction, il est divers types de syllogismes dont certains vont du général au général (en BARBARA, tel l'exemple précédent sur les hommes, les mortels et les Grecs) ou même du particulier au particulier (en DISAMIS, par exemple : « Quelques Grecs sont Athéniens et tous les Grecs sont des hommes, donc quelques hommes sont Athéniens »). Ni même parce que seule la déduction ferait l'objet d'une formalisation et d'un traitement logique. On développe actuellement des logiques inductives qui acceptent formalisation et même présentation axiomatique (cf. Boudot, *Logique inductive et probabilité*). Comme l'avait bien vu Hume qui ne traitait de l'induction qu'à propos de la relation causale : « La connaissance de cette relation ne s'obtient en aucun cas par des raisonnements *a priori* » (*Enquête sur l'entendement humain*, p. 72). Si la déduction est totalement *a priori*, l'induction, si logiquement armée soit-elle, ne peut pas ne pas s'ancrer sur une connaissance expérimentale, sur des constats de faits. Ce rapport à l'empirie met en jeu le temps et pose la délicate question de la prédictivité. En cela, l'induction s'avère *a posteriori* et ne peut atteindre qu'au vraisemblable, cette vraisemblance fut-elle contrôlée par un calcul probabiliste. Se trouvent ainsi inéluctablement exclues validité, nécessité et universalité.

Reste qu'il ne faudrait pas réduire toute déduction au syllogisme. C'est une forme déductive particulière qui ne vaut que pour la logique des termes, ancêtre de notre moderne calcul des prédicats. D'autres formes deductives valent pour le calcul des propositions. Des exemples antiques en sont les tropes des Stoïciens, structures inférentielles qu'ils tenaient pour évidentes et principielles. Considérons les deux premiers de leurs cinq tropes en présentant leur forme (les Stoïciens usaient de variables numériques ordinales pour les propositions), puis une application :

* *Premier trope* : « Si le premier, le second, or le premier, donc le second. »

S'il fait jour, il fait clair.

Il fait jour,

Donc il fait clair.

* *Deuxième trope* : « Si le premier, alors le second, or pas le second, donc pas le premier. »

S'il fait jour, il fait clair,

Il ne fait pas clair,

Donc il ne fait pas jour.

On a bien affaire à deux règles d'inférence permettant à partir de deux propositions (cette fois non analysées) de déduire nécessairement une conclusion. Et cela, une fois de plus, indépendamment du contenu de chaque proposition.

Le premier trope, nommé par les scolastiques *modus ponens* (en latin *ponere* signifiant poser, affirmer) parce qu'il porte sur des propositions affirmatives, a donné naissance en calcul propositionnel à la règle de détachement suivante :

$$\begin{array}{l} p \rightarrow q \\ p \\ \hline q \end{array}$$

Étant donné une proposition conditionnelle et son antécédent, on peut détacher son conséquent. Cette même règle est souvent employée en Intelligence artificielle sous le vocable de « chaînage avant » : elle autorise en effet des enchaînements deductifs par applications en cascade. Si, par exemple, on admet le système élémentaire de règles suivant :

- 1 - Athénien(x) → Grec(x),
- 2 - Grec(x) → Homme(x),
- 3 - Homme(x) → Mortel(x).

Et si on accepte le fait selon lequel Socrate est Athénien : Athénien (Socrate), on satisfait la partie gauche de la règle 1, ce qui permet d'en détacher la partie droite comme fait nouveau : Grec (Socrate) ; ce qui satisfait à son tour la partie gauche de la règle 2 et donne : Homme (Socrate) ; puis, en itérant le processus sur la règle 3 : Mortel (Socrate).

Le deuxième trope, nommé par les scolastiques *modus tollens* (*tollere* = lâcher, nier), met en jeu des propositions négatives. Il s'agit de remonter de la négation du conséquent du conditionnel à la négation de son antécédent. D'où la dénomination de « chaînage arrière » attribuée en Intelligence artificielle à tout processus qui remonte des « buts » (partie droite des règles) à leurs conditions (partie gauche).

Syllogismes et tropes caractérisent les formes les plus générales de déduction. Mais il en existe d'autres, utilisées par exemple en mathématiques, tels le raisonnement par l'absurde, le raisonnement par récurrence (encore appelé induction mathématique parce qu'il va du particulier au général !) ou la méthode diagonale inventée par Cantor. Ainsi, le raisonnement par l'absurde qui consiste pour prouver A à poser son contraire $\neg A$, puis à montrer que $\neg A$ produit une contradiction pour enfin, en recourant au « principe » du tiers exclu ($A \vee \neg A$), en inférer A, constitue bien une authentique déduction : un mode de raisonnement totalement *a priori* imposant une conclusion nécessaire. Il demeure toutefois que ces types particuliers de déduction sont réductibles à des raisonnements logiques complexes qui, eux, recourent au seul *modus ponens*. En ce sens, la déduction trouve son expression la plus pure dans les systèmes logiques.

Aujourd'hui, les systèmes de logique formelle sont généralement présentés sous forme axiomatique. Ils se composent d'un minimum d'axiomes et de règles de déduction permettant de dériver les théorèmes. Si Frege et Russell tenaient encore les axiomes pour l'expression de vérités d'évidence, on les considère maintenant comme de pures hypothèses, des conventions initiales. Dans cette perspective, les logiques se réduisent à de purs systèmes hypothético-deductifs. Par exemple, un système de calcul propositionnel comprendra :

- des schémas d'axiome :

- 1 - $A \rightarrow (B \rightarrow A)$
- 2 - $[A \rightarrow (B \rightarrow C)] \rightarrow [(A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow C)]$
- 3 - $(\neg A \rightarrow \neg B) \rightarrow (B \rightarrow A)$,

- une règle de déduction (le *modus ponens*) :

de A et $(A \rightarrow B)$, détacher B.

C'est dire le rôle crucial que joue la déduction en logique. Rôle qu'on peut préciser en distinguant entre déduction proprement dite et démonstration.

- La déduction (notée \vdash) permet de dériver une proposition B_m à partir d'une suite finie d'hypothèses A_1, A_2, \dots, A_n en recourant au *modus ponens*. On obtient alors :

$$A_1, A_2, \dots, A_n \vdash B_m.$$

- La démonstration constitue un cas particulier de déduction dans lequel ne figure plus aucune hypothèse. La proposition démontrée B dérive alors des seuls schémas d'axiome du système au moyen du *modus ponens*. D'où :

$$\vdash B$$

qui constitue alors un théorème ou une loi logique du système considéré (cf. Kleene, *Logique mathématique*, p. 41-42). Une démonstration est ainsi une séquence de formules dans laquelle chacune est soit une instance d'un schéma d'axiome, soit le résultat de l'application du *modus ponens* à deux formules qui la précèdent, la dernière formule étant le théorème démontré. Soit, par exemple, à démontrer l'expression la plus simple de l'identité $p \rightarrow p$. On procède en utilisant le *modus ponens* (MP) et en opérant des substitutions (Sub A/...) à partir des schémas d'axiome :

- (1) $p \rightarrow (q \rightarrow p)$ schéma 1, sub A/p, B/q
 - (2) $p \rightarrow [(q \rightarrow p) \rightarrow p]$ schéma 1, sub A/p, B/(q → p)
 - (3) $[p \rightarrow ((q \rightarrow p) \rightarrow p)] \rightarrow [(p \rightarrow (q \rightarrow p)) \rightarrow (p \rightarrow p)]$ schéma 2, sub A/p, B/(q → p), C/p
 - (4) $[(p \rightarrow (q \rightarrow p)) \rightarrow (p \rightarrow p)]$ MP sur (3) et (2)
 - (5) $(p \rightarrow p)$ MP sur (4) et (1)
- C.Q.F.D.

Ainsi l'identité n'est-elle plus un principe, mais bien un théorème démontrable dans le système.

Une déduction *lato sensu* (incluant les démonstrations comme cas particuliers) constitue une procédure syntaxique de dérivation des formules du système. Sur quoi insiste Carnap qui définit la déduction comme une simple « règle de transformation ». De plus, elle relève de la métalogue et le symbole \vdash (ou l'expression

« donc » qui le traduit) appartient au métalangage. Il s'avère cependant possible d'exprimer dans le langage-objet par une loi logique la procédure deductive, c'est-à-dire de traduire l'inférence en « donc » par une conditionnelle en « si... alors ». Ceci, déjà connu des Stoïciens, résulte formellement du *métathéorème de déduction* démontré par Herbrand en 1930 pour lequel (Δ étant une suite finie de formules et α et β deux formules) on a :

$$\text{Si } \Delta, \alpha \vdash \beta, \text{ alors } \Delta, \vdash (\alpha \rightarrow \beta).$$

Dans le cas particulier où Δ est vide, on obtient :

$$\text{Si } \alpha \vdash \beta, \text{ alors } \vdash \alpha \rightarrow \beta$$

qui autorise bien le passage d'une déduction relevant du métalangage à une formule conditionnelle du langage-objet. Ceci permet, par exemple, la traduction du *modus ponens* comme règle de déduction en la loi logique suivante :

$$[(p \rightarrow q) \cdot p] \rightarrow q,$$

ou encore une expression logique de la *reductio ad absurdum* :

$$[(\neg p \rightarrow q) \cdot (\neg p \rightarrow \neg q)] \rightarrow p.$$

Ainsi, une grande partie des recherches logiques concerne la théorie de la preuve, ou de la démonstration, qui porte sur l'aspect syntaxique et calculatoire de la logique. Son pendant, la théorie des modèles, relève du versant sémantique rendant compte du fait que la logique est aussi un langage qui doit être interprété. En calcul des propositions, par exemple, on appelle modèle une distribution de valeurs de vérité qui rend vraie une formule donnée et on définit une formule B comme conséquence valide (notée \models) d'une autre formule A si et seulement si tout modèle de A est modèle de B, ce qui se note : $A \models B$. On obtient alors le pendant sémantique de la déduction syntaxique. De même, pour le théorème de déduction dont l'expression sémantique devient :

$$\text{Si } \alpha \models \beta, \text{ alors } \models (\alpha \rightarrow \beta).$$

Comme on vient de le voir, les systèmes logiques standard appliquent la règle de déduction sur des schémas d'axiome qui, notamment, spécifient syntaxiquement le fonctionnement des connecteurs (e.g. dans notre exemple, les trois schémas d'axiome déterminent l'usage de la négation et du conditionnel). On peut toutefois construire des systèmes qui dispensent de tout axiome en introduisant les connecteurs sous forme de règles de déduction. C'est le cas des systèmes dits de « déduction naturelle » inventés indépendamment par Jaskowski et Gentzen au début des années 1930. Des règles opérationnelles permettent d'introduire (R.I.) et d'éliminer (R.E.) les connecteurs dans une déduction. Par exemple, pour la conjonction, on a :

$$\begin{array}{l} \text{R.I.} \quad \frac{A \quad B}{A \cdot B} \quad \text{R.E.} \quad \frac{A \cdot B}{A} \quad \frac{A \cdot B}{B} \end{array}$$

La première règle signifie que si, dans une déduction, figurent la proposition A puis la proposition B, il

est possible d'introduire la conjonction des deux propositions (A. B). Les deux autres, à l'inverse, permettent, lorsque figure déjà dans une déduction la conjonction de A et B, de n'utiliser par la suite qu'une des deux propositions conjointes. C'est donc bien le comportement déductif des connecteurs qui est caractérisé par les règles.

On notera que la règle d'élimination du conditionnel :

$$\frac{A, A \rightarrow B}{B}$$

correspond au traditionnel *modus ponens* et la règle d'introduction de la négation retrouve la traditionnelle *reductio ad absurdum* :

$$\frac{[A] \dots B, \neg B}{\neg A}$$

On le voit, de tels systèmes assignent à la notion de règle de déduction un rôle fondamental. Contre la conception frégréenne selon laquelle la logique a pour objet la découverte des lois de l'« être vrai », ces systèmes fournissent des arguments à ceux qui conçoivent la logique comme un système de règles d'inférence. Dès lors, la vérité ne réside plus dans des axiomes tenus pour évidents, mais résulte des règles d'inférence et est désormais tributaire du système de règles choisi. Un théorème est toujours théorème d'un système ou d'un langage logique particulier. Ainsi $\vdash_1 A$ signifie que A est théorème du système L. Dans cette perspective, la déduction demeure formelle, *a priori* et analytique, mais sa nécessité devient relative à un système et son universalité compromise.

► ARISTOTE, *Premiers Analytiques (Organon III)*, trad. fr. et notes J. Tricot, Paris, Vrin, 1947; *Rhétorique*, trad. fr. M. Dufour, Paris, Les Belles Lettres, 1991. — BOUDOT M., *Logique inductive et probabilité*, Paris, A. Colin, 1972. — CARNAP R., *Logische Syntax der Sprache*, Vienne, Julius Springer, 1934 (trad. angl. A. Smeaton, *Logical Syntax of Language*, Londres, Kegan Paul, 1937). — GENTZEN G., « Untersuchungen über das logische Schliessen », *Mathematische Zeitschrift*, vol. 39, p. 176-210, 1934-5, 405-431 (trad. fr. J. Ladrière, *Recherches sur la déduction logique*, Paris, PUF, 1955). — HERBRAND J., « Recherches sur la théorie de la démonstration », *Société des Sciences et des Lettres de Varsovie*, Classe III, n° 33, 1930. — HUME D., *Enquête sur l'entendement humain* (1748), trad. fr. A. Leroy, Paris, Aubier-Montaigne, 1947. — JASKOWSKI S., « On the Rules of Propositions in Formal Logic », *Studia Logica*, n° 1, Varsovie, 1934. — KLEENE S.C., *Mathematical Logic*, New York, John Wiley & Sons, 1967 (trad. fr. J. Largeault, *Logique mathématique*, Paris, A. Colin, 1971).

Denis VERNANT

→ Abduction; Aristote; Corroboration; Démonstration; Évidence; Formalisme; Induction; Méthode; Nécessité; Récurrence; Réfutabilité; Validation.

DELBRÜCK Max, 1906-1981

Biologiste américain, Max Delbrück, né à Berlin en 1906, soutint en 1930 une thèse de physique théorique avant de s'orienter vers la biologie. Il était convaincu qu'il fallait étudier le système biologique le plus simple possible pour découvrir le secret de la vie. Le bactériophage, virus bactérien dont il découvrit les propriétés lors de sa visite à Thomas H. Morgan, en 1937, lui apparut tout de suite comme le système idéal pour étudier les propriétés autorépliquatives, caractéristiques du vivant. Max Delbrück s'attacha au problème de la répllication du bactériophage de manière totalement originale, sans examiner les événements chimiques qui se déroulaient dans la cellule bactérienne. Il s'installa définitivement aux États-Unis en 1939, et anima le Groupe du phage, dont il est le fondateur. Ce groupe désigne l'ensemble des chercheurs qui, entre 1940 et 1960, utilisèrent les virus bactériens pour étudier les êtres vivants. À l'actif de ce groupe il faut citer la naissance d'une génétique bactérienne, mais le groupe ne parvint pas à comprendre la répllication sans ouvrir la « boîte noire » biochimique.

L'histoire des sciences retiendra que le premier travail de Max Delbrück en biologie reposait sur le principe du « bombardement » du noyau de l'atome avec des particules qu'il utilisa pour l'étude du gène. Son œuvre illustre ainsi la marque que les physiciens apportèrent à la « révolution moléculaire ». Enfin, Max Delbrück était convaincu que des principes identiques permettent d'expliquer le fonctionnement et la reproduction des êtres vivants. Le développement de la biologie moléculaire allait confirmer avec éclat cette prémonition de l'unité du vivant.

► CAIRNS J., STENT G.S. & WATSON J.D., *Phage and the Origins of Molecular Biology*, Cold Spring Harbor, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1966. — MAYR E., *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance*, Harvard Univ. Press, 1982. — MORANGE M., *Histoire de la biologie moléculaire*, Paris, La Découverte, 1994. — MULLINS C., « The Development of a Scientific Specialty: the Phage Group and the Origins of Molecular Biology », *Minerva*, vol. 10, 1972.

Jean Paul THOMAS

→ Bactériophage; Régulation moléculaire.

DÉMONSTRATION MATHÉMATIQUES

Que ce soit par la réduction à l'absurde, ou par des étapes constructives, la démonstration se donne comme une chaîne d'identités reliant des propositions. La forme syllogistique consacrée par Aristote suppose une base axiomatique (l'admission des syllogismes en « BARBARA » et « CELARENT » et les lois de conversion), si bien que pour toute démonstration, on ne peut faire l'économie d'une réflexion sur les axiomes ou sur les indémonstrables ainsi que sur les règles de dérivation ou

de déduction grâce auxquels on obtient de nouvelles vérités. Le donné des axiomes suppose des critères (choix, évidence, construction) et engage des attitudes épistémologiques devant ce que doit être une démonstration.

L'exigence de démontrer

Avec B. Bolzano et G. Frege, la disparité entre le régime de l'évidence et celui de la preuve devient patente. L'évidence est une auto-affection de l'esprit qui connaît une grande diversité de degrés et de variations selon les circonstances et les individus; elle ne saurait être au fondement des premières vérités: il est faux de dire que les axiomes par exemple disposent d'une évidence intuitive. « Après que la mathématique se fut un temps écartée de la rigueur euclidienne, elle y revient, et non sans de vifs efforts pour la dépasser. [...] les développements ultérieurs de l'analyse ont enseigné de plus en plus clairement que, en mathématique, une simple conviction morale (*eine bloß moralische ueberzeugung*) qui s'appuie sur le succès de nombreuses applications ne suffit pas. On exige maintenant une preuve pour de nombreuses choses tenues jusqu'ici pour évidentes par soi (*selbverständlich*) » (Frege, *Les fondements de l'arithmétique*, § 1, p. 125).

Il faut, à défaut d'évidence intuitive, reconnaître qu'il y a des indémonstrables, des indémontrables en soi, c'est-à-dire des propositions primitives parce qu'elles n'ont pas d'*ultima ratio*. Bolzano appelle *Deduktion* la démonstration de l'indémonstrabilité des axiomes, par différence avec la démonstration ordinaire des théorèmes, qui elle, est appelée *Beweis*. La démonstration de l'indémonstrabilité, qui a longtemps reposé sur l'intuition, consiste en une sélection d'axiomes susceptibles de fonder un ordre logique de propositions, ce qu'on appellera plus tard un système formel. La *Deduktion* est donc une exposition de propositions qui servent de point de départ à une connexion objective de vérités. En ce sens elle a une valeur non de démonstration mais de justification et de légitimation des propositions qui sont considérées comme principes pour obtenir d'autres propositions: « Ceci exigera dans la plupart des cas une considération particulière que je désigne pour la distinguer d'une véritable preuve (*eigentlicher Beweis*) du nom précis de déduction (*Herleitung*). Les axiomes ne peuvent pas être démontrés (*bewiesen*), mais ils peuvent être déduits (*deduciret*) et cette déduction (*Deduktion*) est une partie essentielle de l'exposition scientifique » (B. Bolzano, in *Beiträge zu einer begründeteren Darstellung der mathematik*, II, § 21, 1810, rééd. H. Wussing, 1974, p. 93).

Cette attitude face aux axiomes prend acte de l'injonction pascalienne, selon laquelle on ne peut pas tout définir ni tout prouver. Les axiomes seront donc des propositions primitives simples, c'est-à-dire formées de concepts eux-mêmes simples, i.e. indéfinissables. Ils seront en petit nombre (rasoir d'Ockham); il faut toujours veiller à ne prendre comme axiomes que

les propositions qu'on ne pourrait pas obtenir par déduction. Les axiomes sont des raisons, jamais des conséquences, autrement dit ce ne sont pas des vérités dérivées. Il faut donc se garder des axiomes communément reçus, disait Leibniz, ces « axiomes vulgaires qui pourraient être et qui mériteraient d'être démontrés parmi les théorèmes et qu'on laisse passer cependant pour axiomes, comme si c'étaient des vérités primitives. Cette indulgence nuit plus qu'on ne pense » (Leibniz, *Nouveaux essais sur l'entendement humain*, II, chap. XXI, § 3, Paris, GF, p. 144). Les axiomes seront enfin des propositions à grande puissance déductive. Plus leur puissance déductive est grande plus les axiomes sont justifiés.

Styles de démonstration

Les différents styles démonstratifs que l'on trouve chez Aristote (ecthèse, réduction à l'absurde, conversion) ont chacun des points d'appui divers qu'on peut soumettre à la critique; la conversion, qui permet de retrouver les syllogismes parfaits de la première figure en convertissant les prémisses (exemple: convertir une proposition comme « M n'appartient à aucun N » en la proposition « N n'appartient à aucun M »), utilise trop de suppositions; « on ne démontrera pas par la supposition de la conversion ce qui se peut démontrer par le seul principe primitif, qui est celui de la contradiction et qui ne suppose rien » (Leibniz, *op. cit.*, p. 320).

L'ecthèse est une méthode de démonstration par exposition. Elle introduit un nouveau terme dans la démonstration de la validité d'un syllogisme, dit terme « exposé », sous la forme suivante: « Si A n'appartient à aucun B, B n'appartient à aucun A. Car s'il appartenait à quelque, disons C, il ne serait pas vrai que A, n'appartient à aucun B; car C est un des B » (*Premiers Analytiques*, I, 2, 25 a, 15). C est dit terme exposé. Cette méthode existe chez Euclide; elle repose sur 6 étapes: 1) L'indication du problème considéré: l'énoncé indique de façon universelle ce qui est donné et ce qui est cherché; exemple: « sur une droite donnée et finie construire un triangle équilatéral »; 2) l'exposition du problème: c'est l'ecthèse proprement dite ou spécification des données en les désignant; c'est le moment où l'on expose le problème en reprenant l'énoncé universel et en le particularisant; exemple: « soit AB une droite donnée et finie »; 3) la détermination du problème: on donne là ce qu'il faut résoudre, à savoir pour notre exemple « construire le triangle équilatéral sur la droite AB »; 4) la construction du problème: on invoque alors les outils permettant la construction, pour notre exemple, on reprend le postulat 3: « D'un point quelconque et avec un intervalle quelconque, décrire une circonférence de cercle; on construit ainsi un cercle de centre A et de rayon AB et un cercle de centre B et de rayon AB; ces deux cercles ont deux points d'intersection, on en choisit un auquel on donne le nom G et en appliquant le postulat 1 qui nous dit de « conduire une droite d'un point quelconque à un point quelconque », on joint les points G

ct A, puis G et B, et on obtient le triangle ABG ; 5) la démonstration ; pour notre exemple, on pose $GA = GB = AB$; 6) la conclusion : le triangle GAB est construit sur la droite AB.

Selon Leibniz, on a voulu accorder plus d'importance à l'ecthèse qu'elle n'en avait en réalité : « Il faut savoir que ce ne sont pas les figures qui donnent la preuve chez les géomètres, quoique le style ecthétique le fasse croire. La force de la démonstration est indépendante de la figure tracée, qui n'est que pour faciliter l'intelligence de ce qu'on veut dire et fixer l'attention ; ce sont les propositions universelles, c'est-à-dire les définitions, les axiomes, et les théorèmes déjà démontrés qui font le raisonnement et le soutiendraient quand le raisonnement n'y serait pas » (Leibniz, *op. cit.*, p. 317), si bien que les démonstrations euclidiennes sont bien des « arguments en forme » c'est-à-dire des arguments qui concluent par la force de la forme ; et même lorsqu'elles prennent une forme enthymématique (ellipse d'une partie du raisonnement) il est parfois possible de suppléer aux prémisses manquantes en regardant les marges de la démonstration où Euclide ne manque pas de les noter. Mais il peut cependant arriver qu'Euclide s'appuie sur des propositions implicites sans que les marges puissent nous aider ; auquel cas les conclusions de la démonstration bénéficient d'une « généralité supérieure à celle qui leur revient de droit » (G. Frege, *La science justifie le recours à une idéographie, in Écrits logiques et philosophiques*, Paris, Le Seuil, 1971, p. 65) : « Même un auteur aussi scrupuleux et rigoureux qu'Euclide fait usage à plusieurs reprises d'hypothèses tacites qu'il n'énonce ni dans ses principes, ni dans les hypothèses des théorèmes particuliers » (*ibid.*). Frege cite un exemple à propos de la proposition 19 du livre I. Concernant l'exemple que nous avons développé plus haut, nous pouvons dire qu'Euclide fait usage de la proposition implicite suivante : « Quand deux cercles de même rayon se coupent mutuellement, leurs points d'intersection forment avec leurs centres un triangle équilatéral. »

Enfin concernant la réduction à l'absurde qui permet, dans la syllogistique d'Aristote, avec la démonstration par conversion, de réduire tous les modes aux deux premiers modes de la première figure, à savoir « BARBARA » et « CELARENT », elle est fondée sur deux suppositions et le constat d'une contradiction : si les deux prémisses sont vraies et si la conclusion est fautive (nos deux suppositions), alors il y a une contradiction manifeste entre la conclusion et les prémisses (constat). On sait que ce procédé a été pris comme argument pour considérer le syllogisme comme une forme de raisonnement stérile par toute une tradition de philosophes (Descartes) et de logiciens. Poincaré lui préfère le raisonnement par induction mathématique ou démonstration par récurrence : « On établit d'abord un théorème pour $n - 1$; on montre ensuite que s'il est vrai de $n - 1$, il est vrai de n et on conclut qu'il est vrai pour tous les nombres entiers » (*La science et l'hypothèse*, Paris, GF, p. 38). La force de

ce raisonnement c'est de condenser en « une formule unique une infinité de syllogismes » et surtout de nous « élever au théorème général » que les seules ressources de la syllogistique ne parviennent pas à atteindre. À l'itération dont nous parle ici Poincaré, il faut ajouter la substitution qui est une règle qui permet une liaison nouvelle entre formules et par conséquent une progression dans les étapes d'une démonstration.

Définition d'une démonstration formelle

La critique du syllogisme vient aussi d'une autre tradition des mathématiques. Elle porte sur les déficiences de la formalisation syllogistique : les constantes logiques (et, ou, négation, etc.) ne sont pas présentes chez Aristote de façon univoque ; or, en permettant de relier les propositions, elles sont la base de toute démonstration ; de plus la décomposition des propositions en sujet et prédicat peut s'avérer un obstacle pour déduire, dès lors que les quantifications générale et restreinte ne trouvent pas le moyen de leur expression adéquate. La *Begriffsschrift* de Frege a inauguré de nouveaux procédés démonstratifs en logique ; le but reconnu au langage formulaire que Frege construit en 1879 est de conduire les preuves de façon telle qu'on n'ait plus les implicites euclidiens (cf. *supra*) ni les fautes de raisonnement induits par les déficiences de la syllogistique, et que d'un petit nombre d'axiomes, pris pour base de ce qu'on appellera plus tard un système formel, on puisse démontrer les théorèmes.

À l'aide des règles et des axiomes définis sur un langage formel du premier ordre nous pouvons définir une preuve formelle comme une séquence de formules. Soit G un ensemble de formules de notre langage : 1) une dérivation ou démonstration à partir de G est une suite finie $f_0 \dots f_n$ de formules telles que pour tout i inférieur ou égal à n (entier naturel) l'une des conditions suivantes est remplie : 1) f_i appartient à A (A est l'ensemble d'axiomes de notre système) ; 2) f_i appartient à G ; 3) f_i est obtenue par *modus ponens* à partir de f_j et f_k pour des j, k inférieurs à i . ii) Une formule f est dérivable à partir de G (ou encore est un théorème de G) s'il existe une dérivation ($f_0 \dots f_n$) à partir de G telle que $f_n = f$. Dans ce cas on note $G \vdash f$ — j . Ainsi, disposer de la démonstration d'une formule c'est construire une suite d'étapes où nous ne faisons usage que des règles de déduction comme le *modus ponens* (pour le langage du premier ordre, il faut ajouter celle de la généralisation) et des axiomes du système. Le développement d'une théorie de la démonstration est donnée par Gentzen (*Recherche sur la déduction logique*, Paris, PUF, 1969).

Le vrai et le démontrable

Hilbert a cherché un système formel qui nous donnerait tous les énoncés mathématiques vrais, c'est-à-dire un système cohérent et complet qui nous permettrait de décider de la vérité ou de la fausseté de n'importe quel énoncé mathématique formulable en lui. Mais le

simple cas de l'arithmétique élémentaire mit fin à cette recherche. Gödel a montré en effet que la théorie qui comprend les axiomes de Peano avec addition, multiplication et égalité des nombres naturels est indécidable : on y trouve des énoncés vrais exprimant des propriétés d'objets, mais tels qu'on ne peut ni les démontrer ni démontrer leur négation : ce sont des énoncés indécidables. Il a montré qu'il n'y avait aucun espoir d'axiomatiser complètement l'arithmétique.

Deux théorèmes (1930 pour le premier et 1931 pour le second), sont énoncés par lui : 1) Toute théorie axiomatisable même rudimentaire est indécidable (premier théorème d'incomplétude). Si on prend une théorie cohérente du premier ordre qui est axiomatisable (l'arithmétique de Peano) dans laquelle on peut définir l'addition et la multiplication, cette théorie est indécidable : il y a des théorèmes vrais dans N (ensemble des entiers naturels) qu'on ne pourra pas démontrer. Vrai n'est donc pas synonyme de démontrable. 2) Toute théorie axiomatisable ne permet pas de prouver sa propre cohérence (second théorème d'incomplétude). Il n'y a donc pas d'espoir de prouver la cohérence de toutes les mathématiques à partir d'un système formel pour toutes les mathématiques.

Les démonstrations de Gödel reposent sur un codage par des expressions arithmétiques des formules du système. On peut reprendre l'exemple simplifié qu'en donne R. Penrose pour en saisir les enjeux : on code ainsi une formule du type « il n'y a pas de démonstration, dans le système, de la proposition $Pk(k)$ » — où $Pk(k)$ est la *k*ème formule sur la liste des formules codées, elle affirme une propriété de k (nombre entier naturel) — par la proposition arithmétique particulière $Pk(k)$. Si maintenant on se pose la question de savoir si $Pk(k)$ ou $\neg Pk(k)$ est démontrable dans notre système, la réponse est non : « Si nous avons été attentifs au moment de poser nos axiomes et nos règles d'inférence, et à supposer que notre numérotation soit correcte, il ne peut alors y avoir de démonstration de cette $Pk(k)$ à l'intérieur du système. Car s'il y avait une telle démonstration, alors la signification de l'énoncé que $Pk(k)$ affirme effectivement, à savoir qu'il n'y a pas de démonstration, serait fautive, en sorte que $Pk(k)$ devrait être fautive en tant que proposition arithmétique. Notre système formel ne devrait pas être mal construit au point d'autoriser la démonstration de propositions fausses ! C'est pourquoi il doit en fait ne pas y avoir de démonstration de $Pk(k)$. Mais c'est précisément ce que $Pk(k)$ essaie de nous dire. Ce que $Pk(k)$ affirme doit donc être un énoncé vrai, en sorte que $Pk(k)$ doit être vraie en tant que proposition arithmétique. Nous avons découvert une proposition vraie qui n'est pas démontrable dans le système ! » (R. Penrose, *L'esprit, l'ordinateur et les lois de la physique*, trad. fr. InterÉditions, 1992, p. 115).

Démonstration intuitionniste

Les intuitionnistes (Brouwer, Heyting, Weyl) avaient pris acte à leur manière de la non-coïncidence

entre le vrai et le formellement dérivable. La critique qu'ils adressèrent au programme de Hilbert dès les années 1920 rencontre les limites du formalisme que nous donnent les résultats de Gödel. Dans la mesure où il n'est pas avéré que tous les problèmes mathématiques ont une solution, affirmer l'existence d'une entité mathématique quelconque demande, selon eux, qu'un algorithme soit donné pour la production de cette entité. Il s'agit de faire barrage aux propositions d'existence non fondées sur l'exhibition d'un objet et de rejeter le principe du tiers exclu. Ce principe dit plus qu'il ne prouve, car il admet des disjonctions vraies ($p \vee q$) sans donner la méthode déterminant lequel des deux énoncés p et q est vrai. Le refus de ce principe et la reconstruction de l'existence peuvent être considérés comme des façons de critiquer la généralité et de rapprocher le constructivisme de la méthode empiriste qui ne reconnaît d'existence qu'aux particuliers. Le refus du principe du tiers exclu c'est aussi une façon de prendre conscience que toute proposition mathématique n'est pas décidable. L'accepter impliquerait la possibilité de déduire la vérité de la non-contradiction ; or en logique intuitionniste, à partir de $\neg \neg p$ on ne peut conclure p . Le refus du principe du tiers exclu et la notion constructive de l'existence sont étroitement liés : même lorsque « $x (P(x) \vee \neg P(x))$ » est vrai, on peut n'avoir ni $\exists x P(x)$, ni $\neg \exists x P(x)$, contrairement à ce qu'affirme le tiers exclu.

Dans les démonstrations intuitionnistes, toutes les formules sont construites par des actes intuitifs. Elles ne sont pas reconnues vraies à la suite de l'application d'un principe du tiers exclu, mais elles sont construites démonstrativement comme des vérités : ainsi la loi de la contraposition en calcul propositionnel qui permet de dire que si $a \rightarrow b$ alors $\neg b \rightarrow \neg a$ demande une preuve par étapes : cette « loi » est vraie parce que ($(a \rightarrow b) \wedge (\neg a \rightarrow \neg b) \rightarrow a$).

► ARISTOTE, *Premiers analytiques*, trad. fr., Paris, Vrin.
— CAVAILLES J., « Logique mathématique et syllogisme », in *Œuvres Complètes*, Paris, Hermann, 1994.
— CROSSLEY J.N. et al., *What is mathematical logic ?* Oxford Univ. Press, 1972.
— DUMMETT M., « The justification of deduction », in *Truth and other enigmas*, Londres, Duckworth, 1978.
— FREGE G., « La science justifie le recours à une idéographie », trad. fr. C. Imbert, in *Écrits logiques et philosophiques*, Paris, Le Seuil, 1971 ; *Die Grundlagen der Arithmetik* (1884), trad. fr., *Les fondements de l'arithmétique*, Paris, Le Seuil, 1969.
— GENTZEN G., *Untersuchungen über das Logische Schliessen* (1935), trad. fr., *Recherche sur la déduction logique*, Paris, PUF, 1969.
— LARGEAULT J. (textes réunis par), *Intuitionnisme et théorie de la démonstration*, Paris, Vrin « Mathesis », 1992.
— LEIBNIZ G.W., *Nouveaux essais sur l'entendement humain* (1704 ; publ., 1765), Paris, GF, 1966.
— LUKASIEWICZ J., *La syllogistique d'Aristote*, trad. fr., Paris, A. Colin, 1972.
— PENROSE R., *L'esprit, l'ordinateur et les lois de la physique*, trad. fr., Paris, InterÉditions, 1992.
— POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1968.
— PRAWITZ D., *Natural Deduction*, Stockholm, Almqvist & Wiksell, 1965.
— WEYL H., *Le continu et autres écrits*, Paris, Vrin « Mathesis », 1994.

→ Analyse et synthèse; Axiomatisme et formalisme;
Conjecture; Constructivisme; Dialectique; Preuve;
Vérification.

DENNETT Daniel Clement, né en 1942

Philosophe américain, D. Dennett est considéré comme l'un des principaux représentants actuels de la philosophie de l'esprit. Ses travaux sur l'intentionnalité et la conscience intègrent largement les apports des sciences cognitives. Sa « théorie des systèmes intentionnels » apparaît comme une théorie normative et pragmatique : un système peut être considéré comme intentionnel si l'on peut prédire son comportement en faisant l'hypothèse qu'il est optimalement conçu et commande un comportement rationnel. Dans le cas de systèmes naturels, cette hypothèse trouverait sa garantie dans la théorie darwinienne de la sélection naturelle.

Dennett a également développé un modèle de la conscience qui dénonce l'illusion du « théâtre cartésien », lieu privilégié mythique où des informations venues de diverses sources viendraient former un unique flux de conscience, et propose de lui substituer une conception du flux de conscience comme « versions multiples » de la réalité, continuellement élaborées et remaniées par la mise en jeu de multiples processus cognitifs. Muni de ce modèle, il propose une nouvelle interprétation des problèmes traditionnels de la conscience : introspection, qualia, conscience de soi, conscience animale.

● *The intentional stance* (1987), trad. fr., *La stratégie de l'interprète*, Paris, Gallimard, 1990. – *Consciousness explained* (1991), trad. fr., *La conscience expliquée*, Paris, Odile Jacob, 1993. – Coll. : *Lekton*, n° 2, D. Fisette dir., Montréal, 1992.

Élisabeth PACHERIE

→ Intentionnalité.

DEPÉRET Charles, 1854-1929

Les travaux de géologie de Depéret, nommé professeur à la Faculté des sciences de Lyon en 1889, s'inscrivent dans le prolongement des recherches de William Smith, Cuvier, Brongniart, puis de Gressly, inventeur de la notion de faciès servant à désigner « les différences qui existent entre les terrains de même âge au point de vue de la nature des dépôts, des changements de faune, des conditions d'ordre bathymétrique ou géographique qui ont procédé à la formation des terrains » (Depéret, *Sur l'importance de l'étude des faciès en géologie*, 1889), et des travaux de l'école viennoise (von Hauer, von Klipstein, Suess). Depéret conçoit la géologie comme reconstitution de « l'histoire complète » de chacune des périodes de la vie du globe. L'étude stratigraphique approfondie des terrains constitue en effet la base de tout travail paléontologique : « La connaissance exacte de la succession des

couches dans une région donnée permet seule d'apprécier les relations des diverses faunes entre elles, la durée relative de l'intervalle qui les sépare, les changements de milieu qui ont pu se produire pendant le dépôt des différentes assises superposées, même enfin la valeur des modifications organiques subies par les êtres vivants dont les générations successives se retrouvent enfouies dans les couches du sol » (*La faune de mammifères miocènes de la Grive-Saint-Alban*, 1892). Dans *Les transformations du monde animal* (1907), Depéret déplorera ainsi la faiblesse des arguments paléontologiques de Lamarck et de ses successeurs négligeant de s'appuyer sur « la reconstitution précise et réelle de la série des formes par lesquelles a dû passer, dans la longue série des temps géologiques, chacun des types actuels d'êtres vivants » (ce que Depéret nomme « évolution paléontologique »). Or, l'existence de ce lien indissociable unissant paléontologie et zoologie constitue aux yeux de Depéret « la preuve la plus directe et la plus démonstrative de l'hypothèse transformiste ».

● *Description géologique du bassin tertiaire du Roussillon*, 1885. – « Recherches sur la succession des faunes de vertébrés miocènes de la vallée du Rhône », *Archives du Muséum d'histoire naturelle de Lyon*, 4, 1887, 45-313. – *Sur l'importance de l'étude des faciès en géologie*, 1889. – *La faune de mammifères miocènes de la Grive-St-Alban*, 1892. – « Les terrains tertiaires de la Bresse », *Étude des gîtes minéraux de la France*, 1893 (écrit en coll. avec F. Delafond). – *Les transformations du monde animal*, 1907. – « La classification des temps quaternaires et ses rapports avec l'antiquité de l'homme en Europe », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 mars 1923 (un résumé de 10 notices intitulées : « Essai de coordination géologique des temps quaternaires », publ. dans les *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* entre 1918 et 1922).

► BOURDIER F., « Origine et succès d'une théorie géologique illusoire : l'eustatisme appliqué aux terrasses alluviales », *Revue de géomorphologie dynamique*, 10, 1959, 16-29. – GIGNOUX M., « Charles Depéret », *Bulletin de la Société géologique de France*, 4^e sér., 30, 1930, 1043-1073 (avec portrait et bibliogr. de 223 titres). – ROMAN F., « La vie et l'œuvre de Charles Depéret », *Revue de l'Université de Lyon*, juil. 1929, 304-322. – Coll. : *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1971, t. IV, p. 39.

Éric HAMRAOUI

→ Espèce; Fossile.

DÉRIVE DES CONTINENTS

Naissance et traits essentiels de la théorie des translations

Dans la littérature géologique et historique, la *dérive* des continents est liée à Wegener (1880-1930). Celui-ci présente initialement son hypothèse en janvier 1912, puis la complète progressivement au cours des éditions allemandes successives (1915, 1920, 1922, 1929) de son livre *La genèse des continents et des*

océans. Wegener n'est pourtant pas le premier à postuler une translation continentale : Owen (1857), Snider-Pellegrini (1858), Fisher (1882), Pickering (1907), Baker (1912) et surtout Taylor (1910) ont pu avant lui émettre des idées mobilistes, mais le titre de « père de la dérive » lui revient indiscutablement car il est le premier à étayer son hypothèse par un nombre considérable de « preuves » émanant de sources très diverses pour en faire une théorie scientifique cohérente.

Lorsque Wegener présente son idée de la dérive, deux théories sont en place. D'une part, le modèle contractionniste mis en avant par Suess dans sa magistrale synthèse, *La Face de la Terre*, parue entre 1883 et 1909 et d'autre part le modèle permanentiste développé à partir de 1846 par Dana aux États-Unis. Suess supposait que les bassins océaniques se sont formés par l'effondrement de parties continentales. Deux paléocontinents, l'un austral (nommé Gondwana) et l'autre septentrional (Atlantis), séparés par une mer (la Téthys), se sont morcelés par affaissement progressif de leurs régions centrales pour constituer les continents actuels. Il appuyait son raisonnement essentiellement sur deux observations. D'une part les analogies de faunes et de flores entre des continents aujourd'hui séparés par des océans. Ces similitudes entre des manifestations anciennes de la vie étaient impossibles à comprendre, selon la théorie darwinienne de l'évolution, si on ne supposait pas une ancienne connexion entre les continents : l'isolement génétique aurait nécessairement abouti à des profondes divergences. D'autre part, les ressemblances géologiques entre les côtes américaines et européennes de l'océan Atlantique. Marcel Bertrand, en 1887, supposait lui aussi l'affaissement de l'océan Atlantique et cherchait la continuation des chaînes européennes sur le continent nord-américain. Aux États-Unis, au contraire, les disciples de Dana considéraient que les océans et les continents constituaient des figures permanentes de la surface du globe depuis son origine et insistaient sur les différences de nature entre les deux structures.

Au début du xx^e s., les études sur l'équilibre isostatique des continents montrent que ceux-ci peuvent être considérés comme des blocs légers de *sial* (roches composées essentiellement de silicium et d'aluminium) en équilibre sur une couche plus dense de *sima* (roches composées principalement de silicium et de magnésium) qui affleure au niveau des océans. Ces travaux favorisent le modèle permanentiste aux dépens du modèle contractionniste. Comment en effet pourrait-on postuler que des parties continentales légères puissent s'enfoncer au niveau des fonds océaniques ? D'un autre côté, chaque nouvelle preuve paléontologique ou biologique d'une liaison intercontinentale renforce les conceptions de Suess aux dépens de celles de Dana. Wegener, en affirmant que les continents étaient autrefois réunis en une seule masse et qu'ils ont ensuite dérivé en fendant le sima qui les entoure, peut éviter les objections tout en conservant les aspects positifs des deux théories : « Ponts

continentaux ? Oui, non pas grâce à des continents intermédiaires affaiblis, mais à des socles continentaux jadis contigus. Permanence ? Oui, pas de chaque continent ou océan pris individuellement, mais permanence de la surface océanique totale et de la surface continentale totale prises en bloc. »

Wegener ne s'appuie pas seulement sur l'incohérence des théories précédentes, il cherche à conforter son idée par toute une série de faits nouveaux. Une première « preuve » de l'ancienne réunion des continents est fournie bien évidemment par la correspondance entre les formes des continents. Il ne s'agit pas toutefois uniquement de l'emboîtement géométrique des pièces d'un même puzzle car, d'un continent à l'autre, ce sont également les formations géologiques qui se poursuivent de manière satisfaisante. Et c'est cette complémentarité des structures intracontinentales qui justifie l'exactitude de la reconstitution. Une autre « preuve » importante avancée par Wegener est la répartition des climats anciens. L'existence, au Carbonifère, de traces glaciaires dans toutes les terres du Gondwana et de dépôts houillers (climat intertropical) en Europe impose que les continents austraux aient été plus proches l'un de l'autre qu'actuellement et que l'axe de rotation ait dérivé par rapport à l'ensemble de la croûte. Wegener reprend également les arguments des géologues alpins (Argand, Staub) : les mouvements tangentiels observés dans les chaînes de montagnes sont trop amples pour être expliqués par la contraction thermique. Il ajoute finalement les mesures géodésiques de positionnement sur le globe qui semblent indiquer une évolution dans la différence de longitude entre le Groenland et l'Europe et donc un mouvement relatif actuel entre les deux continents.

La théorie de la dérive est grandiose, mais une difficulté essentielle demeure, celle de savoir comment cette mise en mouvement est possible. La sismologie a en effet démontré au début du xx^e s. que le globe est entièrement solide jusqu'à une profondeur de 2 900 km : comment les continents peuvent-ils se déplacer au sein d'un milieu solide ? En s'appuyant sur les mouvements isostatiques, Wegener explique que la couche de *sima*, tout en étant solide, peut présenter un comportement fluide, et il fait remarquer que si les mouvements verticaux sont possibles pourquoi les mouvements horizontaux seraient-ils exclus ? Même s'il reconnaît modestement que « la théorie des translations n'a pas encore son Newton », il envisage quatre forces susceptibles de jouer un rôle moteur : la force d'Eötvös qui est une conséquence de la théorie de l'isostasie sur une Terre aplatie et qui pousse les continents vers l'équateur, les forces de précession et les frictions des marées, qui poussent les continents vers l'ouest, et l'attraction directe entre les continents. Ces forces sont excessivement faibles (la force d'Eötvös, de loin la plus importante, a une amplitude qui ne dépasse pas trois millièmes de celle de la pesanteur), mais parce qu'elles agissent constamment dans la même direction et avec la même intensité, Wegener

affirme qu'elles peuvent produire des déplacements conséquents.

Les réactions et le rejet de la théorie de Wegener

Les premiers articles de Wegener n'ont pas immédiatement attiré l'attention et ce n'est qu'à partir de 1922 que les géologues, en particulier anglais et américains, commencent à s'y intéresser. Quatre débats sont successivement organisés, respectivement à Hull (septembre 1922) par la British Association for the Advancement of Science, à Londres (janvier 1923) par la Royal Geographical Society, à Paris (avril 1923) par la Société géologique de France et surtout à New York (novembre 1926) par l'American Association of Petroleum Geologists. Passée la réserve du début, les thèses de Wegener sont perçues comme un bouleversement radical des conceptions géologiques classiques et rencontrent une hostilité de plus en plus virulente. La plupart des opposants à la dérive restent très sceptiques devant son attitude et doutent même de son sérieux scientifique ! Ils lui reprochent de ne présenter que les faits en faveur de son hypothèse sans mentionner ceux qui pourraient poser des difficultés et ainsi de ne pas chercher la vérité mais plutôt de défendre une cause. Pour justifier leur rejet, ils argumentent que les mesures géodésiques de l'éloignement du Groenland sont plus qu'incertaines, que les ajustements entre continents sont imprécis et sans doute accidentels, que les ressemblances géologiques et paléontologiques ne sont pas si évidentes et pas assez bien établies et qu'il est téméraire de vouloir prouver l'existence d'un ancien continent unique en cherchant à raccorder les moraines glaciaires...

Mais ils trouvent leurs objections les plus fortes dans le mécanisme invoqué pour rendre compte des mouvements. Pour la majorité des chercheurs l'intensité des forces postulées est bien trop faible, la résistance du sima solide bien trop forte pour permettre un déplacement appréciable des continents. Le chef de file des négateurs absolus est Jeffreys. Il calcule que la force d'Eötvös a une amplitude $2,5 \cdot 10^9$ fois trop faible pour pouvoir provoquer le plissement des montagnes et que si les forces envisagées pour rendre compte de la dérive vers l'ouest suffisaient, elles arrêteraient la rotation de la Terre en moins d'une année ! Pour lui, la théorie des translations est donc « out of the question ». Les contradicteurs de la dérive relèvent en outre une incohérence entre la possibilité de la dérive et la formation des montagnes en bordure des continents par la compression due à leur mouvement. De deux choses l'une : soit la couche simique du fond des océans est moins résistante que les continents et ces derniers peuvent dériver à travers elle, mais alors on ne comprend pas pourquoi ils sont déformés par le mouvement (un bateau qui se déplace dans l'eau n'est pas comprimé !). Soit elle est plus résistante : on peut donner une explication à la formation des montagnes mais on ne comprend plus comment les continents peuvent fendre le sima.

En 1930, l'année de la mort de Wegener, malgré les explications lumineuses que sa théorie apporte à un nombre important de faits géologiques, paléontologiques et paléoclimatiques et le soutien de quelques géologues éminents (Argand, Staub) qui l'appuient ou proposent des conceptions voisines (Daly, Gutenberg), son hypothèse des translations continentales est écartée par la majorité de la communauté scientifique. Les forces postulées apparaissent entièrement inadéquates ; et puisqu'aucun mécanisme satisfaisant n'existait pour déplacer les continents, les continents n'avaient pas pu dériver et la théorie de Wegener n'avait plus lieu d'être considérée ! Mais l'absence d'un mécanisme plausible n'explique pas tout. Car lorsque Holmes présente en 1928 un mécanisme beaucoup plus satisfaisant (même s'il n'est pas sans défaut) en invoquant les courants de convection, il n'est pas suivi et l'hypothèse de la dérive n'est pas reconsidérée. Finalement, ce sont les réticences à abandonner les anciennes connaissances et à changer radicalement de cadre interprétatif qui n'ont pas permis de suivre les visions de Wegener.

Après 1930, la théorie des translations acquiert un statut particulier. Si elle est clairement repoussée par la majorité, elle n'en est pas pour autant entièrement oubliée. Elle continue, même si c'est sans grand enthousiasme, d'être exposée dans les livres et de figurer dans l'arrière-fond des spéculations géologiques. Il faut attendre l'année 1954, qui marque le début des études paléomagnétiques de Runcom et d'Irving, pour qu'elle puisse revenir momentanément sur le devant de la scène. Les études paléomagnétiques sont fondées sur le fait que les roches volcaniques, lors de leur refroidissement, et les roches sédimentaires, lors de leur dépôt, s'aimantent parallèlement au champ magnétique terrestre ambiant et constituent ainsi des mémoires du champ magnétique. Runcom et Irving remarquent que la direction d'aimantation des roches d'un même lieu s'éloigne d'autant plus de la direction du champ actuel que les roches sont plus âgées, ce qui ne peut s'interpréter que par un mouvement relatif continu entre le lieu d'échantillonnage et le pôle du champ magnétique. Les deux chercheurs se proposent de tracer pour chaque continent supposé fixe le chemin suivi par le pôle magnétique au cours des temps. Ils découvrent que ces chemins sont différents pour chaque continent mais qu'ils peuvent coïncider si l'on suppose une dérive continentale. Cette nouvelle « preuve » des translations relance pour un temps la théorie de Wegener. Cependant, pas plus que les « preuves » précédentes, elle n'arrive à ébranler le scepticisme des opposants qui cette fois mettent en doute la qualité des mesures, il est vrai délicates. Un autre développement aux idées mobilistes est donné par Carey à partir des années 1950. Il suppose que la translation des continents provient de l'expansion de la Terre.

La dérive des continents telle que l'avait imaginée Wegener et fondée sur la seule observation des continents continue donc d'être rejetée. Ce n'est que lorsque

Hess découvrira en 1960 l'expansion des fonds océaniques que les idées mobilistes pourront s'imposer et permettre d'aboutir à la formulation de la théorie de la tectonique des plaques.

► ALLÈGRE C., *L'écume de la Terre*, Paris, Fayard, 1983.
- GOHAU G., *Une histoire de la géologie*, Paris, Le Seuil, 1990.
- GREENE M.T., *Geology in the Nineteenth Century - Changing Views of a Changing World*, Ithaca, Cornell Univ. Press, 1982.
- HALLAM A., *Une révolution dans les sciences de la Terre*, Paris, Le Seuil, 1976. - HOLMES A., *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, 18, 1931, p. 559-606. - LEGRAND H.E., *Drifting continents and shifting theories*, Cambridge, Univ. Press, 1988. - SUESS E., *La Face de la Terre (1883-1909)*, trad., Paris, A. Collin, 1897-1918. - WEGENER A., *La genèse des continents et des océans (1929)*, trad., Paris, C. Bourgeois, 1990 (préface F. Achache, postface G. Gohau). - Coll. : *Theory of continental drift : a symposium*, Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, 1928.

Vincent DEPARIS

→ Courant de Convection ; Expansion terrestre ; Orogenèse ; Tectonique des plaques ; Wegener.

DESCARTES René, 1596-1650

Descartes fut indissociablement physicien et mathématicien, savant et métaphysicien : « Toute la philosophie est comme un arbre, dont les racines sont la métaphysique, le tronc est la physique, et les branches qui sortent de ce tronc sont toutes les autres sciences, qui se réduisent à trois principales, à savoir la médecine, la mécanique et la morale. » À la sortie du collège de La Flèche, bien que s'étant plu « surtout aux mathématiques », l'ancien élève des Jésuites rejette la physique identifiée à celle d'Aristote. C'est à 22 ans qu'un ami lui fait découvrir que les problèmes physiques sont traitables mathématiquement. Cela change tout : un an plus tard, dans son « poêle », Descartes conçoit la portée métaphysique de cette découverte et l'idée d'une *mathesis universalis* ayant pour modèle la *mathematica*, « une science universelle de l'ordre et de la mesure » fondamentalement en rupture avec Aristote : contre sa classification des sciences miroir de la hiérarchie des réalités, Descartes soutient qu'il n'y a qu'une science (l'arbre) et qu'une « méthode » parce que l'esprit humain est un. C'est ainsi qu'il établit « la relation et la convenance mutuelles de l'algèbre et de la géométrie », qu'il traite l'optique par des raisons mathématiques (loi des sinus), identifie la matière à l'étendue, et des trois mouvements d'Aristote ne conserve que le mouvement spatial exprimable mathématiquement (énoncé correct du principe d'inertie, théorie des tourbillons) ; il comprend enfin le vivant sur le modèle de la nouvelle physique sans recourir à la notion d'« âme » (théorie de l'animal-machine).

Du coup, dans l'ordre des raisons, la métaphysique vient avant la physique : il n'y a pas à « croire que 2 et 2 sont 4 », il faut fonder cette certitude. Dans un

monde où l'expérience sensible, les croyances et les vérités rationnelles ne coïncident plus, ce n'est plus dans la nature mais dans la pensée que Descartes trouve ce fondement : je pense, je suis, je suis une chose qui pense, j'ai une idée que je n'ai pu inventer : Dieu qui garantit l'accord entre la raison humaine et la nature, Dieu qui permet ainsi à l'homme de devenir « comme maître et possesseur de la nature ».

● La totalité des œuvres actuellement connues se trouve dans la réédition chez Vrin, Paris, 1964-1974, de l'édition Adam & Tannery des *Œuvres de Descartes*, 12 vol., 1897-1913. - *Correspondance*, éd. Adam & Milhaud, Paris, PUF, 8 vol. - *Compendium musicae* (1618). - *Cogitationes privatae* (1619-1622). - *Regulae ad directionem ingenii* (1628, 1^{re} publ., 1684). - *Traité du monde ou de la lumière* (compréhensif ce que nous appelons le *Traité de l'Homme* ; 1633, 1^{re} publ., 1664). - *Discours de la méthode [...] Plus la Dioptrique, les Météores et la Géométrie [...] (1633)*. - *Méditations de prima philosophia*, avec des objections et des réponses (1641). - *Recherche de la vérité par la lumière naturelle* (1641). - *Epistola, Descartes ad celeberrimum virum G. Voetium* (1643). - *Descartes et Schook, La querelle d'Utrecht*, Impressions nouvelles, Paris (1988). - *Principia philosophiae* (1644). - *Méditations métaphysiques*, avec objections et réponses, trad. du latin Picot, avec Lettre-préface de R. Descartes au trad. (1647). - *Entretien avec Burman* (1648). - Fin de la rédaction des *Excerpta anatomica* (1648). - *De la formation du fœtus* (1648, 1^{re} publ., 1664). - *Les passions de l'âme* (1649). - Trois vol. de *Correspondance*, éd. Clerselier (1657, 1659, 1667).

► ALQUIÉ F., *La découverte métaphysique de l'homme chez Descartes*, Paris, PUF, 1950. - BAILLET A., *Vie de Monsieur Descartes*, Paris, La Table Ronde, 1992 (reprise de l'abrégé publié en 1691). - BEYSSADE J.-M., *La philosophie première de Descartes*, Paris, Flammarion, 1979. - BITBOL-HESPERIES A., *Le principe de vie chez Descartes*, Paris, Vrin, 1990. - BUZON F. DE & CARRAUD V., *Descartes et les « Principia » II : corps et mouvements*, Paris, PUF, 1994. - CANGUILHEM C., « Descartes et la technique », *Travaux du IX^e Congrès International de Philosophie*, Paris, Hermann, 1937 ; « Organisme et modèles mécaniques : réflexions sur la biologie cartésienne », *Revue Philosophique*, Paris, PUF, 1955. - GARBER D., *Descartes's metaphysical physics*, Univ. of Chicago Press, 1992. - GILSON E., *Études sur le rôle de la pensée médiévale dans la formation du système cartésien*, Paris, Vrin, 1930. - GOUIHER H., *La pensée métaphysique de Descartes*, Paris, Vrin, 1962. - GUEROUULT M., *Descartes selon l'ordre des raisons*, Paris, Aubier, 2 vol., 1953. - KOBAYASHI M., *La philosophie naturelle de Descartes*, Paris, Vrin, 1993. - KOYRÉ A., *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1966. - LENOBLE R., *Mersenne ou la naissance du mécanisme*, Paris, Vrin, 1971. - MARION J.-L., *Sur la théologie blanche de Descartes*, Paris, PUF, 1981. - MILHAUD G., *Descartes savant*, Paris, Félix Alcan, 1921. - RODISLEWIS G., *Descartes*, Paris, Calmann-Lévy, 1996 (biogr.). - SZCZECINARZ J.J., « Un mathématicien philosophe », *Descartes, les nouvelles lectures*, Paris, Magazine littéraire, 1996.

François REMOISENET

→ Analyse et synthèse ; Automate ; Cartésianisme ; Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Découverte ; Espace-temps ; Evidence ; Géométries ; Immatérialisme ; Inertie (Principe de) ; Logique et informatique ; Loi de la nature ; Lumière ; Matière [PHYSIQUE] ; Nature (Système de la) ; Origines de la vie ; Réflexe ; Singularité ; Technique ; Terre ; Topologie ; Travail ; Vision ; Vitalisme et mécanisme.

DÉTERMINISME

Le mot de « déterminisme » a été introduit en français dans la langue de la philosophie des sciences par Claude Bernard en 1865. Son antonyme – « indéterminisme » – a été formé la même année. Leur opposition témoigne d'une « querelle » qui n'a cessé de rebondir depuis, non sans confusions multiples.

Dans les *Principes de médecine expérimentale* rédigés en 1865, Bernard oppose aux expérimentations empiriques, qualifiées d'« expériences pour voir », les « expériences scientifiques faites d'après une idée préconçue afin de saisir dans toutes les circonstances qui accompagnent la production du phénomène celle qui constitue réellement son déterminisme et qui doit être appelée sa cause prochaine ». On voit qu'il s'agit, à ses yeux, d'un principe méthodologique. S'excusant d'utiliser un mot « nouveau et mal sonnant », il en vient à le qualifier de « premier principe des sciences expérimentales ».

La célèbre *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, publiée la même année, permet de mesurer la portée épistémologique immédiate de ces sentences en faisant le lien avec le travail scientifique du physiologiste : « Il faut admettre comme un axiome expérimental que dans les êtres vivants aussi bien que dans les corps bruts les conditions d'existence de tout phénomène sont déterminées d'une manière absolue [...] La négation de cette proposition ne serait rien autre chose que la négation de la science même. » Le « déterminisme » résume donc une prise de parti contre les partisans de la « force vitale » – les « vitalistes » – pour qui l'analyse des êtres vivants ne pourrait être menée selon les mêmes principes que ceux des « corps bruts ». La découverte de la fonction glycogénique du foie et la formation du concept de « milieu intérieur » lui paraissent en constituer le fruit.

En présentant dès lors avec insistance le « déterminisme » comme un précepte général valable pour « toute science », Claude Bernard, à son corps défendant, semble inscrire sa pensée dans une tradition qu'il s'empresse de récuser. « Lorsque j'employai pour la première fois le mot déterminisme pour introduire ce principe fondamental dans la science physiologique, je ne pensais pas qu'il pût être confondu avec le déterminisme philosophique de Leibniz... » (*Leçons sur les phénomènes de la vie commune aux animaux et aux végétaux*, Paris, 1867). De là, un prudent repli sur des positions positivistes strictes : « Nulle part on n'atteint les causes premières ; les forces physiques sont tout aussi obscures que la force vitale et tout aussi en dehors de la prise directe de l'expérience... L'ensemble des conditions déterminantes d'un phénomène entraîne nécessairement ce phénomène. Voilà ce qu'il faut substituer à l'ancienne et obscure notion spiritualiste ou matérialiste de cause. » Bernard assimile à tort la doctrine de Leibniz au « fatalisme ». Il soutient que sa propre conception, « loin d'être la négation de la liberté morale, en est au contraire la condition nécessaire ».

Quoi qu'il en soit, le mot de « déterminisme »

appartenait de fait depuis longtemps au vocabulaire philosophique allemand. D'ascendance théologique, il se trouvait lié à la question de la prédestination, donc à celle du libre arbitre, de la grâce et des œuvres. Leibniz ne l'emploie guère, mais utilise le mot de « détermination » dans la *Théodicée* (I. 44. 52, 288) pour reformuler cette question : si l'on admet le principe de raison suffisante selon lequel tout effet a une cause, ne doit-on pas de toute nécessité nier la liberté humaine ? Kant reprend la question et la désigne comme celle du « déterminisme » dans *La religion dans les limites de la simple raison* (1793).

Le texte de l'*Introduction* fait implicitement référence à l'ouvrage du mathématicien et astronome français Pierre-Simon Laplace, intitulé *Essai philosophique sur les probabilités*, publié en 1814. Claude Bernard en avait eu connaissance directe par son maître Magendie. Astronome, Laplace pouvait se flatter d'avoir rectifié et corrigé l'œuvre de son modèle, Isaac Newton. Le « système du monde » exposé dans la troisième partie des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* avait eu l'immense mérite, à ses yeux, de « ramener tous les phénomènes célestes à une seule formule », la loi de la gravitation universelle. Elle laissait cependant encore subsister quelques « scandales dans le ciel » (Clairaut) : on ne savait encore rendre compte des mouvements exacts des corps célestes, de la stabilité du système solaire, de la figure de la Terre... Laplace montre qu'une nouvelle branche des mathématiques, le calcul des probabilités, permet de lever l'essentiel de ces difficultés par une estimation rigoureuse des erreurs d'observation. Il propose de compléter le système en déterminant la probabilité des causes par les événements. « Chacune des causes auxquelles un événement observé peut être attribué est indiquée avec d'autant plus de vraisemblance qu'il est plus probable que, cette cause étant supposée exister, l'événement aura lieu » (*Leçons à l'École normale de l'An II, Œuvres*, t. 11, p. 162).

Newton avait présenté son système comme fondé sur les principes (mathématiques) de la mécanique rationnelle exposés au début de son maître-livre. Tout reposait donc sur les équations différentielles permettant de déterminer les mouvements de points matériels considérés comme centres de forces. Il avait cependant laissé ouverte la question de l'« action immédiate à distance » que soulevait l'usage de telles équations dans le cas du système planétaire. Refusant de tenir la force de gravitation pour mécanique, il ne « forgeait point d'hypothèse » sur sa nature. Laplace pense pouvoir surmonter l'obstacle. Sa cosmologie peut s'affirmer entièrement régie par des causes mécaniques. Si certaines d'entre elles nous restent encore inconnues, et ne sont qu'inférées grâce au calcul des probabilités à partir des régularités observées, elles ne sauraient être tenues pour différentes de celles que met en jeu la mécanique. Tous les mouvements des corps célestes lui apparaissent ainsi calculables avec une précision toujours plus grande et imputables à des causes constantes. De là l'hypothèse cosmogonique de la formation du

système solaire à partir d'une nébuleuse en rotation en établissant « la probabilité que la disposition du système du monde ne soit pas due au hasard mais à une cause primitive qui aurait dirigé les mouvements planétaires ».

Puisque la mécanique rationnelle suppose, selon Newton lui-même, une composition corpusculaire de la matière, on peut étendre cette thèse ontologique à l'Univers considéré comme un Tout, dont il sera en droit possible par l'analyse d'appréhender les « états » successifs.

Ainsi l'idée de déterminisme comporte-t-elle deux thèses majeures : une thèse cosmologique et une thèse ontologique, dont le lien vient se substituer à celui qui reliait encore chez Newton la « philosophie naturelle » à la théologie.

Pierre-Simon Laplace associe à ces deux thèses un idéal de la science qui met l'accent sur deux de ses caractères : son pouvoir de prévision et la certitude de ses énoncés. « Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ses données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'Univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux. » Et il ajoute : « L'esprit humain approche de cette perfection grâce à l'Astronomie, mais en restera cependant toujours infiniment éloigné » (*Essai philosophique sur les probabilités*).

Cette thèse épistémologique se complète par une vue de l'histoire des progrès de la connaissance comme processus d'unification par les mathématiques : « En appliquant la même méthode à quelques autres objets de ses connaissances, il est parvenu à ramener à des lois générales les phénomènes observés... » Thèse qui se trouve, à son tour, sous-tendue par une thèse métaphysique : « Les événements actuels ont avec les précédents une liaison fondée sur le principe évident qu'une chose ne peut commencer d'être sans une cause qui la produise. » La référence à Leibniz est explicite : « Cet axiome, connu sous le nom de principe de la raison suffisante s'étend aux actions mêmes que l'on juge différentes. La volonté la plus libre ne peut sans un motif déterminant leur donner naissance. » La thèse métaphysique enveloppe ainsi enfin une position éthique qui va s'imposer comme thème de discussion à l'horizon de la recherche scientifique.

En Allemagne, un autre illustre physiologiste, Emil du Bois Reymond, peu après la publication de l'*Introduction* de Claude Bernard, prononce, en 1872, un célèbre discours sur les limites de la connaissance (*Über die Grenzen des Naturerkennens*) dirigé contre le matérialisme scientiste des évolutionnistes allemands (Vogt, Buchner...) et connu sous le nom du *Discours de l'ignorabimus*. Du déterminisme universel de Laplace, il reprend tout, sauf la position éthique mais, au lieu de fonder son refus sur la position positiviste adoptée par Claude Bernard, il réaffirme au contraire le

caractère intégralement mécanique de la causalité. Il doit donc creuser un abîme entre le domaine des phénomènes naturels et celui des questions qui touchent toutes, directement ou indirectement, au libre arbitre : origine du monde, de la pensée, du langage...

En France, le philosophe Charles Renouvier défend lui aussi en 1885 la thèse du libre arbitre, mais en l'inscrivant, pour sa part, dans le prolongement de la critique positiviste de la notion de cause : « Le libre arbitre pose des commencements et marque des limites, rompt la continuité qui serait l'infini, et s'accorde avec l'idée du commencement premier, premier acte et première limite ; tandis que la nécessité ne se rapportant pourtant qu'à l'enchaînement ne peut s'arrêter nulle part, à des points et à des actes discrets, dans la série des effets et des causes, ni trouver un terme à la régression des phénomènes dans le passé, et implique l'actualité du nombre infini » (*Esquisse d'une classification des systèmes*, 1885, t. II, p. 397). Émile Boutroux procède selon la même démarche dans *De la contingence des lois de la nature* (1895). La notion de cause n'apparaît claire que référée à la volonté humaine. Les « vraies causes » ne peuvent exister que si l'on fait place dans le monde à la contingence.

Telle apparaît la première forme de l'« indéterminisme » : une thèse métaphysique à visée éthique qui aboutit paradoxalement à retourner les thèses positivistes contre elles-mêmes et à rétablir l'idée d'un certain réalisme causal de tonalité anthropomorphique (J. Largeault).

Cependant le débat sur le déterminisme reste marginal en physique. Il n'en vient à affecter directement la recherche qu'avec les travaux de Ludwig Boltzmann. En abordant l'étude du comportement des gaz, il s'aperçoit en effet qu'il faut faire usage du calcul des probabilités, lequel permet d'établir un lien entre des concepts macroscopiques (pression, température, viscosité, etc.) et les descriptions microscopiques. On parlera alors de « déterminisme statistique ».

Avec la constitution de la théorie de la relativité restreinte (1905), Albert Einstein, suivant en cela les remarques d'Ernst Mach (1838-1916), réouvre la question enfouie de l'« action immédiate à distance ». Mach, tirant les leçons des débuts de la thermodynamique, avait montré qu'« il n'existe pas de phénomène purement mécanique » et dénoncé comme un préjugé « l'opinion qui fait de la mécanique la base fondamentale de toutes les autres branches de la physique, et suivant laquelle tous les phénomènes physiques doivent recevoir une explication mécanique » (*La Mécanique*, 1883, chap. V, section 1). On allait désormais désigner cette opinion erronée comme le « mécanisme ». Avec la notion d'« espace-temps », le « mystère insconcevable » est levé, la conception newtonienne de l'espace et du temps absolus recusée. La théorie de la « relativité générale » étend, dix ans plus tard, ce renouveau de la pensée au concept de la gravitation.

Si indéniable cependant qu'ait été la nouveauté de la pensée d'Einstein, son irruption ne fit point « rupture » aux yeux des physiciens dans leur discipline.

Elle résolvait en effet bien des problèmes qui s'étaient accumulés sur la nature de la lumière depuis que le physicien anglais James Clerk Maxwell (1831-1879) avait formulé les équations majeures de la théorie de l'électromagnétisme ; elle trouvait dans la géométrie non euclidienne de Bernhard Riemann des instruments puissants et, débarrassait élégamment les physiciens de quelques apories expérimentales, comme celle qu'avait manifestée la célèbre expérience de Michelson et Morley qui mettait en cause la notion de « simultanéité ». Elle s'inscrivait, en définitive, surtout dans le droit fil d'une pensée de la relativité amorcée depuis la réflexion de Galilée sur le mouvement : elle en étendait et en thématise le principe dans le cadre d'une théorie qui rendait parfaitement compte de sa limitation initiale. S'il dénouait le lien entre le déterminisme et les présupposés philosophiques de la mécanique newtonienne, Einstein ne portait apparemment pas atteinte à l'idéal de la science qui, sous ce vocable, avait été étroitement associé au « mécanisme » laplacien. La naissance de la mécanique quantique représente, elle, une remise en question radicale de cet idéal laplacien.

La thèse ontologique qu'enveloppait l'idée de déterminisme universel focalise le débat depuis le célèbre article dans lequel Niels Bohr, en 1913, propose un modèle de l'atome qui fait intervenir les « quanta » dans la détermination de ses états possibles : le changement ne s'effectue pas de façon continue, mais par quantités discrètes bien définies. Les atomes ne sont plus des « atomes » au sens de corpuscules simples et insécables, puisqu'ils s'avèrent composés et, en droit, désintégrables. Plus grave : l'équation d'onde d'Erwin Schrödinger substituée à la représentation intuitive de l'atome une représentation mathématique, elle remplace la « présence » d'un être par une « probabilité de présence » d'un objet. Comment admettre un tel hiatus ontologique ? Albert Einstein, dont les recherches sur l'effet photoélectrique avaient contribué de façon décisive à l'avènement de la nouvelle théorie, ne s'en satisféra jamais. Saisis par le « vertige quantique », certains physiciens tirent de cette situation une conclusion radicale en faveur de l'indéterminisme : le « hasard » se révèle installé au cœur de la matière, et la physique peut être appelée à soutenir la conception philosophique classique du « libre arbitre ».

Werner Heisenberg refuse de s'engager sur cette voie. La formulation dudit « principe d'incertitude » en 1927 lui paraît mettre en pleine lumière la question décisive. Elle apporte la démonstration mathématique qu'il est impossible de préciser tout à la fois la position et la vitesse d'un électron ou d'une particule quantique quelconque. L'aspect statistique de la théorie quantique se trouve donc lié à l'impossibilité de déterminer avec l'exactitude que l'on veut les paramètres qui définissent classiquement l'état du système.

De la thèse selon laquelle « si nous connaissons le présent avec certitude, nous pouvons calculer le futur », Heisenberg fait remarquer que ce n'est point la conclusion mais la prémisse qui est fautive, car nous ne pouvons connaître le présent dans tous ses aspects. Il

dénoue le lien établi par Laplace entre le déterminisme et le principe de la causalité qui régit les systèmes physiques dans la mécanique classique, mais il souligne que la mécanique quantique apparaît, elle aussi, régie par une loi de causalité : « Si à un instant donné, certaines grandeurs physiques sont mesurées aussi exactement qu'il est possible par principe, il existe à tout autre instant des grandeurs dont la valeur peut être exactement calculée, c'est-à-dire pour lesquelles le résultat d'une mesure peut être prédit exactement, à condition que le système observé ne soit soumis à aucune autre perturbation que celle des mesures considérées. » Pas plus que Niels Bohr, Heisenberg n'admet donc que la théorie quantique introduise dans la physique le règne de l'incertitude.

Mais, demande-t-on, toute observation d'une réalité subatomique ne perturbe-t-elle pas à ce point l'objet observé que l'observateur s'en trouve réduit à n'observer que les effets de sa propre intervention ? Il suffit d'identifier l'« observateur » – en réalité le système matériel qui constitue l'instrument d'observation – à la conscience d'un « sujet » pour annoncer la disparition de l'« objet ». La remise en question de la thèse métaphysique du déterminisme laplacien ouvre la voie à une interprétation positiviste de la connaissance – le physicien n'aurait jamais à faire qu'à des données sensibles – voire à une interprétation « immatérialiste » selon laquelle l'esprit ne ferait jamais en physique que contempler son propre pouvoir.

Gaston Bachelard en tire une tout autre leçon : tout physicien, même classique, dès lors qu'il expérimente avec des instruments qui ne sont que des « théories matérialisées », modifie son objet d'observation. Il « détermine » cet objet parce qu'il n'en retient que les paramètres susceptibles d'être appréhendés par la mathématique des lois auxquelles il a recours. Jamais donc, même au XVIII^e s., la science moderne, en tant qu'expérimentale, n'a véritablement procédé par observation pure. Rien ne lui a été « donné », tout y a été « construit ». L'idée d'« exactitude » ne s'applique pas à la physique, qui se présente toujours comme une science « approchée ». Sur d'autres bases, Karl Popper récusera le « déterminisme scientifique » par voie logique : il serait contradictoire que nous puissions prédire scientifiquement le développement futur de nos connaissances. Si l'avenir est partiellement ouvert, et que seules certaines des potentialités présentes sont réalisées, il faut poser un « indéterminisme métaphysique ».

Aujourd'hui, le caractère illusoire de la vue laplacienne de la science ne fait plus de doute : nous savons que tous nos appareils de mesure, objets macroscopiques par définition, sont doués d'une structure quantique au niveau de leur constitution atomique. L'« interaction quantique » apparaît donc universelle dans l'expérimentation. Que, dans certains cas, elle puisse être négligée sans aucun inconvénient pour la connaissance qu'on veut obtenir de l'évolution d'un système physique donné, c'est évident. Elle n'en existe

pas moins ; et elle peut, à l'occasion, réserver des surprises même à l'échelle macroscopique.

Un nouveau tournant a été pris en physique avec l'intérêt soudain porté en Occident, au début des années 1960, aux phénomènes dits de « turbulence » et de « chaos ». Ces phénomènes appartiennent bien au monde macroscopique : évolution d'un nuage, d'une volute de fumée, de l'écoulement d'un robinet... Il ne s'agit en l'occurrence nullement d'un simple « retour » de la physique, lassée de l'extrême abstraction, à ce monde familier concret de l'expérience vécue qu'elle aurait trop longtemps négligé, dans sa quête obstinée de l'infiniment petit. Sans théorie quantique, en effet, ce prétendu « retour » n'aurait pas été possible : c'est en effet l'usage de puissants ordinateurs qui a donné en branle. Aucun succès n'eût été, de surcroît, obtenu dans cette voie sans la mise en œuvre de la pensée mathématique sophistiquée qui a été ajustée et développée pour appréhender le comportement des particules subatomiques.

En 1963, les travaux de l'Américain Edward Lorenz au Massachusetts Institute of Technology (MIT), suivis de ceux du Français David Ruelle à l'Institut des hautes études scientifiques de Bures-sur-Yvette, sont venus, par surprise, répandre le trouble sur le terrain même où la physique semblait avoir gardé tout son empire. La météorologie, discipline par nature hantée par les impératifs de la prévision, a ouvert la voie. Cherchant à modéliser les mouvements convectifs d'une couche d'air, Lorenz, utilisant un ordinateur, montra en effet qu'un système d'équations très simples rendait compte d'un processus jusque-là jugé beaucoup trop complexe pour faire l'objet d'une analyse mécanique. Considérant l'atmosphère comme un fluide, il parvenait à expliquer l'apparition de la turbulence par un système à trois degrés de liberté seulement ! Le cas pouvait surprendre puisqu'il s'agissait d'un système « classique » – au sens où il est non quantique – qui semblait devoir satisfaire aux exigences du « déterminisme » puisqu'il ne dépendait que d'un nombre très petit de degrés de liberté, mais qui s'avérait cependant intrinsèquement probabiliste ! Le trouble fut à son comble lorsqu'on s'aperçut, d'ailleurs très vite, que ce cas n'avait rien d'exotique : une multitude de systèmes dont on attendait classiquement un mouvement régulier s'avéraient en réalité susceptibles de présenter ainsi un comportement erratique !

Ainsi rebondissait la querelle du « déterminisme », puisqu'il s'avérait que la prévision intégrale du comportement d'un système macroscopique, qui était tenue en droit pour assurée depuis Laplace, se révélait impossible.

L'attention se trouva ainsi focalisée sur un nouvel élément essentiel de la fiction laplacienne : la connaissance des conditions initiales du système soumis à la prévision. Cette connaissance, il avait supposé qu'elle pouvait être « exacte ». Or, l'explication des phénomènes de chaos montre que des différences infimes dans lesdites conditions, insaisissables par des mesures « classiques », peuvent conduire à des états extrêmement différents du

système. On redécouvrit alors l'intérêt d'un texte du mathématicien français Henri Poincaré, qui écrivait dans *Science et méthode* dès 1908 : « Une cause très petite, qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard... Il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux ; une petite erreur sur les premiers produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit. » On a maintenant étudié de nombreux systèmes en situation dite de « dépendance sensible aux conditions initiales ». Dans de tels systèmes, des perturbations microscopiques peuvent se trouver amplifiées au point de produire des changements macroscopiques spectaculaires. Mieux, on s'est rendu compte que tous les systèmes un peu complexes, et même la boule de billard chère aux philosophes classiques, s'avèrent soumis à ce type d'évolution ! De telles amplifications figurées dans un espace abstrait dit « espace de phases » sont graphiquement représentées par ce qu'on appelle des « attracteurs étranges ». Ces figures montrent comment des trajectoires initialement voisines divergent, puis se plient et se rapprochent en faisant apparaître, par étirements et repliements successifs, des plis à l'intérieur des plis. Le mathématicien Benoît Mandelbrot a popularisé les images des « fractales » qui se déploient ainsi.

Voilà donc un « chaos », mais dont l'apparition, la structure et l'évolution peuvent être, par un calcul de probabilités adéquat, étudiées avec précision. Pour le qualifier, certains ont risqué l'expression paradoxale de « chaos déterministe », voulant le dissocier de son image antique qui suggère, par opposition au « cosmos », l'informe et l'obscur. René Thom réagit en plaidant pour l'« actualité du déterminisme ».

L'essentiel ne tient-il pas, au contraire, à ce que de tels phénomènes achèvent de ruiner la représentation fictive de la mécanique classique sur laquelle Laplace avait précisément fondé l'idée philosophique du déterminisme universel ? Ils confirment, si besoin était, que les « objets » de la mécanique classique étaient des constructions prélevées sur la nature pour figurer dans l'activité rationaliste d'une science qui « couple » hypothèses théoriques et conditions expérimentales. La mécanique classique ne donnait nullement un « tableau de la nature », car elle ne pouvait s'emparer des phénomènes sans négliger délibérément, et en un sens « arbitrairement », dans les conditions initiales, les perturbations nombreuses (notamment les frottements) qui auraient empêché de les traiter en termes de fonctions analytiques linéaires.

L'actuelle physique du chaos dispose des moyens mathématiques pour traiter les fonctions non linéaires : elle s'ouvre ainsi de nouveaux horizons de connaissance. Elle prouve en même temps que la notion classique de « déterminisme » qui travestissait la démarche même des physiciens du siècle précédent ne peut plus légitimement prétendre à faire figure d'idéal de la

science, sinon au prix des pires confusions de langage et de pensée, dont témoigne l'usage actuellement relâché de l'adjectif « déterministe » pour qualifier tantôt une loi ou une équation, tantôt un phénomène ou un système.

Autrefois flambeau d'une philosophie conquérante qui célébrait, après un siècle de durs combats, la défaite de la vision chrétienne de la nature hiérarchiquement ordonnée par Dieu, l'idée de déterminisme permit aux meilleurs esprits de lutter en tous domaines contre le finalisme et ses avatars vitalistes toujours prêts à renaître, y compris sous des habits matérialistes ; au début de ce siècle, le parti du « déterminisme » regroupa tous ceux qui refusèrent de prendre prétexte de la crise philosophique ouverte dans la pensée physique par la mécanique quantique pour désespérer de la science et se livrer à la mystique. Aujourd'hui, il fait souvent figure d'un spectre philosophique qui hante la conscience de chercheurs en mal de certitudes scientistes.

- BACHELARD G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934 ; *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951. — BERGÉ P. éd., *Le Chaos*, Saclay, Eyrolles « CEA », 1988. — BERGMANN G., *Philosophy of science*, Madison, 1957. — BERNARD C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), rééd., Paris, Garnier-Flammarion, 1966. — BOHR N., *Physique atomique et connaissance humaine*, éd. C. Chevalley, Paris, Gallimard, 1991. — BOUTROUX E., *De la contingence des lois de la nature*, Paris, Alcan, 1895. — COHEN-TANNOUDJI G. & SPIRO M., *La Matière espace-temps*, Paris, Fayard, 1986. — COSTA DE BEAUREGARD O. et al., *La Physique moderne et les pouvoirs de l'esprit*, Paris, Le Hameau, 1988. — DAHAN DALMEILO A., CHABERT J.-C. & CHEMLA K. dir., *Chaos et déterminisme*, Paris, Le Seuil, 1992. — EKELAND I., *Le calcul, l'imprévu*, Paris, Le Seuil, 1984. — GLEICK J., *La théorie du chaos. Vers une nouvelle science*, Paris, Albin Michel, 1989. — HEISENBERG W., *Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science* (1958), trad. fr., *Physique et philosophie, la science moderne en révolution*, Paris, Albin Michel, 1961. — KOJÈVE A., *L'Idée de déterminisme dans la physique classique et dans la physique moderne*, Paris, LGF, 1990. — LAPLACE P.-S., *Essai philosophique sur les probabilités* (1825), rééd., Paris, Bourgois, 1986 ; *Exposition du système du monde*, in *Œuvres Complètes*, Paris, Gauthier-Villars, 14 vol., 1878-1912. — LARGEULT J., *Principes classiques d'interprétation de la nature*, Paris, Vrin, 1988. — LECOURT D., *La philosophie des sciences*, 2001, 3^e rééd., Paris, PUF/Que sais-je ?, 2005 ; *Les philosophes et la science*, sous la direction de P. Wagner, Paris, Gallimard, 2002. — MANDELBROT B., *The fractal geometry of nature*, New York, W.H. Freeman & Co, 1982. — NAGEL E., *The structure of science*, New York, 1901. — NEWTON I., *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 1687. — PLANCK M., *Initiation à la physique*, Paris, Flammarion, 1941. — POINCARÉ H., *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 1908. — POPPER K., *The Postscript*, Hutchinson, 3 vol., 1982-1983 (trad. fr., *Le réalisme et la science*, Paris, Hermann, 1990) ; *L'Univers irrésolu. Plaidoyer pour l'indéterminisme*, Paris, Hermann, 1984. — THOM R., *Apologie du Logos*, Paris, Hachette, 1990. — WEISSKOPF V., *La Révolution des Quantas*, Paris, Hachette « Questions de Sciences », 1989. — Coll. : *Le début : La querelle du déterminisme*, Paris, Gallimard, 1990.

Dominique LECOURT

→ Causalité (Principe de) ; Champ ; Chaos et déterminisme ; Contingence ; Irréversibilité ; Probabilité (Logique) ; Réel ; Téléologie ; Vitalisme et mécanisme.

DÉVELOPPEMENT

BIOLOGIE

Développement et préformation

La notion de « développement » (*Entwicklung* en allemand) est proche du sens premier du terme « évolution », qui désigne la génération et le déroulement de l'embryon, du germe à la forme pleinement développée.

Ces théories premières de l'évolution appaurent au XVII^e s. en réaction contre les théories épigénétiques de W. Harvey, qui considérait que les organes des animaux supérieurs passaient au cours du procès embryonnaire d'une condition initiale amorphe à un état articulé et hétérogène. L'entomologiste néerlandais Swarmerdam critiqua les théories de Harvey dans son *Historia Insectorum Generalis*, leur reprochant leur appui sur une « force plastique » occulte de type aristotélécien. Pour Swarmerdam, le germe embryonnaire était prédéterminé selon une similitude rationnelle : l'ensemble de l'humanité existait déjà en Adam et Ève. C'est à cette théorie, dite préformationniste, que le naturaliste suisse Albrecht von Haller, en 1744, donna le nom de « théorie des évolutions », qu'il opposait aux théories épigénétiques. Pour les épigénétistes, le germe initial homogène croissait en complexité et hétérogénéité ; pour les tenants de l'« évolution », il croissait dans un champ homogène où la forme initiale contenait la forme finale pleinement développée. Haller distinguait alors une théorie du développement dite oviste, qui situait le germe dans l'œuf, et une théorie animalculiste (spermiste) qui, avec Boerhaave (et à sa suite Erasmus Darwin), considérait que la chaleur et les humeurs matricielles réchauffent et dilatent le germe mâle. Haller lui-même hésita longtemps entre épigénèse et théorie des évolutions, avant de se rallier à cette dernière, critiquant les théories de l'épigénèse renouvelées par C. F. Wolff, sans doute sous l'influence de son ami Charles Bonnet.

Ce dernier, dans ses *Considérations sur les corps organisés* (1762), élargit la notion d'évolution des individus aux espèces. Puis, dans sa *Palingénésie philosophique*, il développa sa thèse de l'emboîtement des germes. Aux origines, Dieu avait créé l'ensemble des germes, emboîtés les uns dans les autres. Chacun de ces êtres miniatures contenait tous les traits de sa forme adulte. Partisan d'une géologie catastrophique, où la Terre était soumise à un certain nombre de cataclysmes régis directement par une Cause Première, Bonnet pensait qu'après chaque catastrophe des espèces s'éteignaient, mais non leurs germes, qui pouvaient alors évoluer vers une plus grande perfection, donnant naissance à de nouvelles espèces d'un degré plus élevé de perfection. Ainsi se trouvèrent liées pour

la première fois « évolution » de l'embryon et évolution des espèces, et Bonnet fut souvent mentionné comme précurseur de la théorie de l'évolution au sens du XIX^e et du XX^e s.

Développement, évolution, épigénèse

Sous les critiques des épigénétistes, la théorie du développement et de l'évolution cessa vers la fin du XVIII^e s. d'être associée au préformationnisme de Haller et Bonnet pour désigner toute théorie, aussi bien épigénétique que préformationniste, qui liait développement individuel de l'embryon et développement des espèces. C'est ainsi que, en 1833, Étienne Geoffroy Saint-Hilaire distinguait deux théories du développement des organes, l'une supposant la préexistence des germes et leur emboîtement indéfini, l'autre leur formation successive et leur évolution au cours des âges. Il se prononçait sans ambiguïté en faveur de la théorie épigénétiste.

En Allemagne, le philosophe Schelling considérait que la nature progressait graduellement vers des étapes plus élevées, et que chacune des étapes était l'expression d'un type idéal. Il existait une sorte de développement parallèle, procès d'individuation des créatures animales et végétales et procès d'individuation humaine. Le germe originel qui donnait naissance aux premiers individus d'une espèce n'était qu'une représentation imparfaite du concept d'espèce, dont les caractères s'exprimaient de mieux en mieux au cours du développement, sous la pression de l'environnement : la nature s'élevait peu à peu au véritable concept de l'espèce. L'évolution dynamique de l'embryon devenait le signe du développement de l'Être absolu dans les étapes de son parcours.

Goethe avança à la même époque l'idée d'une « unité de plan », considérant les diverses parties des plantes comme des métamorphoses d'une structure idéale ; selon lui, les vertébrés étaient construits selon un plan unique original, « Urbild ». La tâche de la science naturelle était de reconstruire l'archétype des vertébrés, *intellectus archetypus* conçu sur le modèle d'une série de vertébrés identiques se différenciant au cours des âges. Les animaux constituaient des étapes fœtales de l'homme, et le fœtus se développait en passant par toute la série hiérarchisée des êtres, polype, insecte, escargot, poisson, amphibie, etc. Mais, pas plus que Schelling, il n'envisageait de transformation des espèces au sens évolutionniste contemporain : le développement de l'embryon symbolisait les émanations d'un Être Infini, et ses transformations n'impliquaient nullement un franchissement de la forme spécifique.

C'est à partir de Schelling et Goethe que se développa l'idée d'une morphologie transcendante, dont l'idée de base était que les êtres vivants formaient, à partir d'une unité de plan originelle, une série allant du plus simple au plus complexe, selon un ou quelques types idéaux. Le développement de l'embryon se déroulait selon l'essence du type. Les mots employés

pour exprimer ces théories étaient évolution dynamique, développement, métamorphose, *Entwicklung*. L'évolution de l'embryon, d'image en miniature de sa propre espèce agrandie progressivement, devenait alors un développement graduel d'images en miniature des espèces inférieures jusqu'à la forme adulte de leur propre espèce.

Pour Kielmeyer, la force qui avait créé la série des espèces était la même que celle qui avait programmé le développement de l'embryon. Tiedemann voyait un parallèle étroit entre d'une part le développement des espèces et des genres animaux et d'autre part celui des formes d'espèces inférieures à travers lesquelles se constituait graduellement l'embryon. Lorenz Oken étendait ces analogies à une conception macrocosmique de l'univers : selon lui le règne animal ne constituait qu'un seul et même être. Une sorte d'animal originel composé d'infusoires ou de monades, l'Urter, se développait et se diversifiait au cours du progrès de la nature : les embryons des animaux supérieurs passaient par les mêmes étapes que les animaux inférieurs, et le règne animal constituait le macrocosme de ce microcosme qu'est l'homme. C'est à cette conception holiste et idéaliste que l'on donna le nom de biologie romantique.

Meckel, dès 1811, affirma plus clairement encore qu'il existait des ressemblances significatives entre l'état embryonnaire des animaux supérieurs et l'état permanent des animaux inférieurs. En 1821, il considérait les espèces comme des modifications et diversifications à partir d'un même organisme originel. En France, Étienne Serres affirma quelques années plus tard que les organes de l'embryon traversent une multitude de formes transitoires, des plus simples aux plus complexes. Les formes embryonnaires des classes supérieures récapitulaient les formes permanentes des classes inférieures. Fervent partisan de l'unité de plan, il considérait que les vertébrés, les poissons, les reptiles, les oiseaux et les mammifères avaient primitivement la même structure et que les animaux qui composaient ces quatre classes se différenciaient les uns des autres par des métamorphoses successives et graduelles depuis leur point de départ jusqu'au terme de leur complet développement. Cette étude du développement Serres l'appela « métamorphogénie », tout en employant l'expression « théorie des évolutions ».

Ces théories, qui liaient plus ou moins étroitement évolution de l'embryon et parcours de la chaîne des êtres, demeuraient, à quelques exceptions près, strictement fixistes. Chaque être vivant se développait « selon son espèce ». Leur évolution n'avait lieu que dans l'Idée : à l'intérieur du moule fixe de l'espèce, les êtres vivants déployaient leurs virtualités. Ils progressaient en Idée à partir de la forme archétypale originelle vers l'essence même de leur espèce. Le germe originel qui avait donné naissance aux premiers individus d'une espèce en était une représentation imparfaite, et la nature s'élevait peu à peu à la véritable essence de l'espèce. Les archétypes n'étaient nullement des ancêtres réels. Rares furent les naturalistes, à

la fin du XVIII^e s. ou au début du XIX^e s., qui envisagèrent l'idée d'un progrès réel des espèces en correspondance avec l'évolution de l'embryon. Lamarck, dans sa *Philosophie zoologique*, ne fit guère appel à ces conceptions, esquissées, en Angleterre, par Erasmus Darwin, et plus sérieusement élaborées, en France, par Étienne Geoffroy Saint-Hilaire.

Les « lois de développement » de von Baer

K.E. von Baer, dans son *Ueber Entwicklungsgeschichte der Tiere* (1828), renouvela profondément les études d'embryologie. Réfutant résolument toute possibilité d'évolution réelle des espèces, il rejeta également la notion d'unité de type de la morphologie transcendante. Selon lui les tenants de la thèse de l'unité de type ne prenaient en compte que le « degré de développement », défini comme le degré d'hétérogénéité des parties élémentaires d'un agrégat complexe ; mais ils négligeaient le « type d'organisation », défini comme « position relative des éléments organiques et des organes ». Von Baer distinguait alors quatre types fondamentaux d'organisation (périphérique, longitudinal, massif, vertébré) fondés sur quatre archétypes différents, et correspondant aux quatre embranchements distingués par Cuvier (radiaires, articulés, mollusques, vertébrés). Les embryons se développaient par différenciation des tissus et organes ; la différence existant entre les premiers et derniers stades de développement d'un embryon était comparable à celle qui existait entre degré supérieur et inférieur de développement des animaux adultes. Il y avait donc bien correspondance entre les embryons des animaux supérieurs et adultes des espèces inférieures, mais elle ne concernait que le degré de développement, et non le type d'organisation, qui était manifeste dès les premiers stades du développement embryonnaire.

Il existait bien des ressemblances entre embryons des formes supérieures et adultes des formes inférieures dans la mesure où tous deux se situaient à un degré inférieur de développement et partageaient une indifférenciation initiale. À l'intérieur d'un même type, la ressemblance entre l'embryon des mammifères et un poisson adulte, par exemple, s'expliquait à la fois par un type de structure commun et un degré inférieur de développement. L'embryon du mammifère ressemblait au poisson, mais ne passait pas par la forme poisson : celle-ci possédait des caractères que l'embryon de mammifère n'acquerrait jamais.

Les « lois de développement » formulées par von Baer mettaient l'accent sur le passage d'une masse homogène à une hétérogénéité croissante par différenciation. À partir d'une forme fondamentale commune et indifférenciée, apparaissaient très vite les caractères d'appartenance à l'un des quatre types fondamentaux, puis ceux de la classe, de la famille et de l'espèce. La loi de développement de von Baer précisait que :

- 1) Les caractères les plus généraux d'un groupe d'animaux apparaissent dans leurs embryons avant les caractères plus spéciaux ;
- 2) les formes les plus

diversifiées dans leur structure apparaissent après les formes les plus générales ;
- 3) les embryons d'une espèce quelconque ne passent pas successivement par les formes d'autres espèces inférieures, mais s'en différencient ;
- 4) l'embryon d'une forme supérieure ne ressemble pas, au cours de son développement, à une forme adulte inférieure, mais uniquement à l'embryon de cette dernière. Cette loi de développement était avant tout passage de l'homogène par différenciation progressive, et les recherches de von Baer posaient les bases de l'embryologie comparée.

En France, les travaux de Henri Milne Edwards mirent l'accent sur l'importance de l'étude du développement de l'embryon pour la classification des espèces. Tout comme von Baer, il considérait le développement comme un mouvement allant du général au particulier ; les caractères particuliers d'une espèce n'apparaissent qu'à un certain stade du développement de l'embryon. Il était donc possible d'appuyer la classification sur le procès de développement, car il existait une correspondance étroite entre les degrés de relations entre espèces et les moments de divergence entre embryons. L'histoire du développement permettait ainsi de mieux saisir les affinités entre espèces que l'étude des organismes adultes. Ce développement par diversification consistait en une division physiologique du travail qui était en même temps mesure du degré de perfection d'un organisme.

En Angleterre, Richard Owen, au cours des années 1840, s'inspira également des travaux de von Baer : il considérait que tous les embryons d'espèce différente se ressemblaient à leur premier stade de développement, puis divergeaient vers des formes communes à chacun des grands types d'organisation. L'on pouvait alors, par exemple, reconstruire une sorte d'archétype idéal des vertébrés, forme non spécialisée regroupant l'ensemble des caractères communs à tous les vertébrés. Cet archétype était caractérisé par une « répétition végétative des parties », homogènes, et les formes particulières qui en étaient idéalement issues se développaient sous l'influence d'une force adaptative. Aux États-Unis, Louis Agassiz lia étroitement développement embryonnaire et succession des espèces fossiles. Plus ouvertement récapitulacionniste que von Baer et Owen, il soutenait que, dans un même embranchement, non seulement les embryons des animaux supérieurs passaient par les formes des adultes inférieurs, mais répétaient la suite chronologique des séries fossiles. Mais ni Owen ni Agassiz n'envisagèrent l'idée que la classification appuyée sur le développement embryologique pût être d'ordre généalogique, et ils se refusèrent à envisager l'idée d'une évolution des espèces au sens moderne du terme. Les archétypes étaient des formes idéales, des modèles structuraux qui existaient dans la pensée de Dieu, et n'étaient nullement des ancêtres. Dans l'édition de 1851 de ses *Principes de Physiologie comparative*, William Carpenter appliqua la loi de von Baer à l'interprétation de la succession des formes organiques au cours des époques géologiques. S'appuyant sur les recherches de Richard

Owen, il traitait en particulier du développement du « général au spécial » appliqué à l'interprétation de la succession des formes organiques qui se présentent dans le temps géologique. Il y soutenait que les séries fossiles s'ordonnaient selon une loi de développement analogue – mais non identique – aux lois de développement de l'embryon théorisées par von Baer.

Du développement à l'évolution

Au XIX^e s., ces théories du développement servirent de modèle ou de point d'appui à de nombreuses théories du progrès ou de l'évolution de l'humanité, ou même de l'ensemble du cosmos. Chez Comte, le concept de développement servit de médiateur entre les concepts d'ordre et de progrès, ce dernier étant conçu par lui comme un développement de l'ordre. La loi de Serres était pour lui une loi de « représentation », et il se référait ouvertement aux thèses préformationnistes, où l'état primitif représentait les caractères essentiels de l'état complet. Le concept de développement permettait de déterminer directement en quoi consistait nécessairement le perfectionnement de l'humanité : des facultés de base préexistantes, à l'origine sous forme latente, se déployaient en trois états successifs au cours de l'histoire.

Mais ce fut Herbert Spencer qui appliqua le plus complètement et le plus systématiquement l'« hypothèse du développement » à la biologie – ouvrant ainsi la voie à l'idée d'évolution des espèces au sens moderne du terme –, aux sociétés humaines, et à l'ensemble du cosmos. Dès le début des années 1850, dans une série d'articles, il exposa son « hypothèse du développement » et sa théorie du progrès, qui postulait une évolution générale de la nature et de la société de l'homogène à l'hétérogène. C'est après la lecture de Carpenter qu'il étendit la « loi de von Baer » à l'ensemble de l'univers. Pour la première fois, ouvertement, la notion de développement impliquait une évolution des espèces. L'analogie entre développement des espèces et développement de l'embryon rendait ce procès de développement aisément concevable : une graine se métamorphosait en arbre, un germe gélatineux en enfant puis en homme. Par analogie, on pouvait fort bien concevoir que tous les êtres vivants, y compris l'homme, pouvaient être sortis, avec le temps, de la plus simple monade. Tel était le développement de tout être individuel. Les deux formes de développement (ce qu'on allait appeler plus tard ontogenèse et phylogénèse) étaient « identiques en genre ». Il fallait, pour avancer une hypothèse aussi audacieuse, une certaine connaissance générale des sciences de la nature, mais surtout une confiance inébranlable à la fois en son unité de plan structural et en l'harmonie des adaptations fonctionnelles.

Dans son essai sur le progrès, Spencer affirmait plus ouvertement encore que la loi du développement organique était la loi de tout développement. Le passage de l'homogène à l'hétérogène était la loi de tout progrès, applicable au développement de la terre et de la vie au

développement de la société, du gouvernement, des manufactures, du commerce, du langage, de la littérature, des sciences et des arts : une même évolution du simple au complexe par différenciations successives s'y manifestait. Les causes de ce progrès s'expliquaient, dans cet essai, par une « loi de multiplication des effets », production de plusieurs effets par une même cause. Spencer, pour la première fois, introduisait le mot « évolution », jusque-là utilisé comme synonyme de développement de l'embryon, pour désigner, au-delà même de l'évolution phylogénétique, toute forme de transformation physique, biologique ou sociale allant du simple au complexe. Il affirmait, dans sa correspondance, ne pas avoir introduit ce terme dans son simple sens épigénétique, mais comme mot apte à exprimer le procès d'évolution dans toute son étendue, organique et inorganique. Spencer, ainsi, étendait la « loi de von Baer » à tout phénomène naturel et humain ; la notion de développement cédait la place à celle d'évolution, impliquant à la fois développement épigénétique, transformation réelle des espèces, et extension à l'ensemble des phénomènes sociaux et cosmiques.

Dans ses *Premiers Principes*, Spencer élabora plus précisément ses lois d'évolution. Les changements intégratifs manifestaient un passage de l'incohérent au cohérent coextensif au passage de l'homogène à l'hétérogène. L'évolution était également « redistribution secondaire » accompagnant la « redistribution primaire », ce qui permettait à Spencer d'intégrer l'évolution biologique (redistribution secondaire) dans l'évolution inorganique (primaire). Elle était également passage de l'indéfini au défini, les changements impliquant également une distinction claire et nette entre les parties hétérogènes, et une précision accrue de la structure. Elle était, enfin, accroissement de l'uniformité dans les rythmes, constituant un système de mouvements de plus en plus intégrés, les mouvements hétérogènes intégrés pouvant être définis comme des fonctions. En combinant ces quatre caractéristiques, on parvenait ainsi à la célèbre définition de l'évolution par Spencer : « L'évolution est une intégration de la matière et une dissipation concomitante de mouvement ; pendant l'évolution, la matière passe d'une homogénéité indéfinie et incohérente à une hétérogénéité définie et cohérente et le mouvement conservé subit une transformation semblable. »

Les causes de l'évolution répondaient à un certain nombre de principes, dont le premier était l'instabilité de l'homogène – et l'adaptation fonctionnelle qui en découlait. Le second principe était la multiplication des effets (l'exemple le plus amplement développé par Spencer était celui de la multiplication des effets d'une invention technologique, la locomotive, comme si l'image de la révolution industrielle sous-tendait sa loi de diversification). Une loi de ségrégation rendait compte de l'ordre dans lequel se produisait le passage de l'homogène à l'hétérogène : dans toutes les actions et réactions de la force et de la matière, toute dissemblance dans les forces incidentes agissant sur des objets

semblables entraînait une dissemblance entre les effets. Il se produisait alors une division entre les unités différemment affectées, qui rendait compte des adaptations des êtres vivants à leurs conditions de vie par modification fonctionnelle. L'on pouvait enfin envisager, dans un temps très reculé, un équilibre cosmique où tous les mouvements de masse seraient transformés en mouvements moléculaires, et tous les mouvements moléculaires équilibrés. Dans l'ordre de la société, l'équilibration démographique prévue par la théorie de population devait mener vers un équilibre parfait.

Spencer avait ainsi réduit à un seul principe évolution du système solaire, géologie, lois physiques, développement de l'embryon, adaptation fonctionnelle des espèces, lois de développement social, morale individuelle, dépérissement de l'État et administration de la justice. Ce faisant, il était passé de la notion initiale de « développement » à la notion d'évolutionnisme philosophique. Les thèses spencériennes furent immensément populaires dans le monde industrialisé ou en voie d'industrialisation jusqu'à la fin du XIX^e s. Elles marquent à la fois l'extension maximale des lois embryologiques de développement et leur remplacement par des lois d'évolution, où les lois de l'embryologie servent de modèle à des lois générales s'appliquant à l'ensemble de l'univers.

Il est plus difficile de saisir à quel point les lois de développement jouèrent un rôle dans l'élaboration et l'exposition des théories de Charles Darwin. Pour certains (R. Richards, D. Ospovat), les thèses sur le développement, de Meckel, voire de Bonnet, à von Baer, constituaient une sorte de « proto-évolutionnisme » (l'expression est de Dov Ospovat) : il aurait, en quelque sorte, suffi à Charles Darwin de transformer les « archétypes » en ancêtres, et de se fonder sur les lois du développement pour aboutir à sa théorie de la sélection naturelle. Pour d'autres (G. Canguilhem), l'intérêt que Darwin porte à la distribution géographique, aux changements géologiques, à leur action sur les êtres vivants, interdit d'opérer une telle réduction : la réalité d'un être vivant ne saurait être réduite à sa structure, et doit comprendre des fonctions de relation et un rapport au milieu. Darwin se serait ainsi refusé à voir dans l'évolution des espèces une transposition sur une grande échelle du développement épigénétique.

Les textes sur lesquels s'appuient les deux parties sont d'un côté comme de l'autre amplement convainquants. Mais il semble que Darwin ait construit sa théorie dans un espace modelé par une tension constante entre d'une part un progrès d'ordre structural, dont le critère est le degré de complexité et le modèle les lois de développement, et d'autre part l'adaptation, dont le critère est la « valeur compétitive ». D'une part il pensait que la forme la plus élevée était celle qui avait subi le plus de différenciations à partir de l'embryon ou archétype de la classe, d'autre part il pensait de plus en plus en termes de valeur compétitive, où le progrès dépendait d'une pression de compétition. L'importance accordée à l'un ou l'autre élément varie au fil des éditions de *L'Origine des*

espèces, mais en aucun cas Darwin ne réduisit, comme le fit Spencer, l'évolution des espèces à de simples lois de développement embryologique. Il se refusa même pendant longtemps à employer le terme « évolution ».

La notion de développement, dans les années 1860, fut alors soumise à celle d'évolution des espèces, popularisée en Angleterre par T.H. Huxley et en Allemagne par E. Haeckel. Mais ce dernier reprit à son compte les théories du développement qui mettaient l'accent sur un parallélisme étroit entre développement embryonnaire et transformation des espèces. La loi biogénétique fondamentale de Haeckel affirmait que l'ontogénie (le développement d'un organisme) était une récapitulation de la phylogénie (histoire de l'espèce et du groupe). La série des formes par lesquelles passait l'organisme individuel était une répétition en miniature de la série de transformations subies par les ancêtres. Il ajoutait que la phylogénèse était la cause mécanique de l'ontogénèse, et déterminait les phases de développement de l'individu. L'ontogénie fournissait ainsi les principales preuves de la phylogénie : il était possible de déduire des formes que revêtait passagèrement l'embryon individuel celles qu'avaient eues jadis ses ancêtres. Cette théorie renouvelée de la récapitulation, qui suscite de nos jours de nombreuses réserves, eut une profonde influence, non seulement dans le domaine des sciences de la nature, mais sur les sciences humaines. Haeckel lui-même avait affirmé que toute science pouvait – ou devait – s'appuyer sur l'embryologie. Par analogie, l'histoire du développement de la société pouvait être pensée à partir des lois de développement de l'individu. Dans le dernier tiers du XIX^e s., la loi biogénétique fondamentale, étendue hors de son objet d'étude propre, servit ainsi de point d'appui à un évolutionnisme philosophique de type spencérien, finalisé, où le progrès, individuel, social, naturel, était conçu comme simple accroissement en hétérogénéité, intégration, diversification, et complexité, sur le modèle du passage du germe à la forme pleinement développée.

► BAER K.E. VON, *Entwicklungsgeschichte der Tiere*, Königsberg, Bornträger, 1828. – BONNET C., *Considérations sur les corps organisés*, Amsterdam, Marc-Michel Rey, 1762 ; *La Palingénésie philosophique*, Genève, Philibert & Chiroi, 2 vol., 1769. – CANGUILHEM G., LAPASSADE G., PIQUEMAL C. & ULMANN J., « Du développement à l'évolution », *Thalès*, XI (année 1960), 1962, rééd. Paris, PUF, 1962. – DARWIN C., *L'Origine des espèces* (1859), Paris, Flammarion, 1994. – DARWIN E., *Zoonomia, or the laws of organic life*, Londres, Johnson, 1796. – DE BEER G., *Embryology and evolution*, Oxford, Clarendon Press, 1930. – GEOFFROY-SAINT-HILAIRE É., *Principes de philosophie zoologique*, Paris, Didier, 1830. – GOETHE J.W. VON, *Die Schriften zur Naturwissenschaft*, vol. 9 et 10, *Morphologische Hefte*, éd. D. Kuhn, Weimar, Böhlhaus Nachfolger, 1977-1986. – GOULD S.J., *Ontogeny and phylogeny*, Cambridge, Harvard Univ. Press, 1977. – GUYENOT E., *Les Sciences de la vie aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, Albin Michel, 1957. – HAECKEL E., *Generelle Morphologie der Organismen*, Berlin, Reimer, 1866 ; *Anthropogenie oder Entwicklungsgeschichte des Menschen*, Leipzig, Engelmann, 1874. – HALLER A. VON, in BOERHAAVE H., *Praelectiones academicae*, avec notes de Haller, vol. 5, part 2, Göttingen,

Vandenhoeke, 1744. – HARVEY W., *Exercitationes de generatione animalium*, Londres, DuGaidianis, 1651. – KJELMEYER K.F., in *Sudhoffs Archiv für Geschichte der Medizin und der Naturwissenschaften* 23, 1930 (1793). – MECKEL J.F., *System der vergleichenden Anatomie*, vol. 1, Halle, Renger, 1821. – MILNE EDWARDS H., « Considérations sur quelques principes relatifs à la classification naturelle des animaux », *Annales des sciences naturelles*, 3^e sér., 1, 1844. – OKEN L., *Abriss des Systems der Biologie*, Göttingen, Vandenhoeck & Ruprecht, 1805. – OSPOVAT D., *The Development of Darwin's theory*, Cambridge, Harvard Univ. Press, 1981. – OWEN R., *Richard Owen's Hunterian lectures, May-June 1837*, éd. Phillip Sloane, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1992. – RICHARDS R.J., *The Meaning of evolution*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1992. – ROGER J., *Les Sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e siècle*, Paris, A. Colin, 1971. – SCHELLING F.W., *Sämmtliche Werke*, Stuttgart & Augsburg, Cotta'scher Verlag, 14 vol., 1856-1861. – SERRES E.R.A., *Anatomie comparée du cerveau*, Paris, Baudouin Frères, 1829. – SPENCER H., *Essays*, vol. 1, Londres, Williams I Norgate, 1857 ; *First Principles*, Londres, Chapman & Hall, 1862. – SWAMMERDAM J., *Historia insectorum generalis*, Pays-Bas, Luchtman, 1685. – TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 3 vol., 1996. – WOLFF C.F., *Theoria generationis*, Halle, Hendelianis, 1759.

Daniel BECQUEMONT

→ Anatomie comparée ; Catastrophisme ; Darwinisme ; Espèce ; Évolutionnisme ; Gène ; Spencer ; Vivant (Théorie du).

DE VRIES Hugo, 1848-1935

Généticien hollandais. En 1889, De Vries expose, sous le nom de « pangénèse intracellulaire », une théorie de l'hérédité formée sur la base de l'étude des conditions de croissance des plantes et de leur descendance. Il y considère les caractéristiques héréditaires des plantes comme des unités susceptibles de se manifester indépendamment les unes des autres, et pouvant, par conséquent, être étudiées séparément. Il associe chaque caractère indépendant à un support matériel qu'il nomme « pangène ». Le terme de « gène » qui sera donné plus tard (par Johannsen) aux unités héréditaires est dérivé du terme de « pangène » introduit par De Vries. Cette théorie le conduisit à retrouver les principes de ségrégation des caractères héréditaires des hybrides qu'il expose à ses étudiants en 1896. Il mène à cette époque d'importants travaux pour confirmer sa théorie, tant expérimentaux que bibliographiques. Sur le plan expérimental il montrera, sur une vingtaine de cas, la justesse de sa conception. Sur le plan bibliographique, ses recherches le conduiront à retrouver « accidentellement » le mémoire oublié du moine de Brno, Johann Grégor Mendel. Cet épisode est généralement décrit comme « redécouverte » des lois de Mendel. De Vries, qui s'intéressait davantage à l'évolution des espèces qu'à la transmission stable des caractères héréditaires, poursuivit ses travaux dans le sens d'une étude des « mutations » pouvant survenir au cours d'une telle transmission, mutations dans lesquelles il voyait la

différence élémentaire pouvant permettre l'évolution des formes biologiques.

● Variabilité et mutabilité, Lons-le-Saulnier, Dechême, 1900. – *Espèces et variétés, leur naissance par mutation*, trad. fr. L. Blaringhem, Paris, Alcan, 1909.

► BERTRAND P., *Hérédité, mutation et évolution, l'œuvre de Hugo De Vries présentée au palais de la Découverte par L. Blaringhem et al.*, Paris, Masson, 1937.

Pascal NOUVEL

→ Espèce ; Évolutionnisme ; Gène ; Génétique.

DIALECTIQUE

Depuis que ses premiers titres de noblesse lui furent décernés par Platon, la notion de dialectique a toujours eu pour fonction de caractériser la spécificité du discours philosophique, si bien qu'elle fut toujours liée à la question du rapport que la philosophie doit entretenir avec les autres discours rationnels. Dès l'origine, la notion posséda la fonction critique d'une description de ce qu'il y a d'identique et de différent entre la philosophie, la logique, la mathématique et les sciences de la nature. Dotée d'aspects métaphysiques et éthiques souvent commentés, cette notion est donc également investie de ce que nous nommerions aujourd'hui une charge « épistémologique » dont on a tendance à sous-évaluer l'importance sous l'influence des critiques que la philosophie classique adressa à la scolastique et de la dénonciation positiviste de la philosophie allemande. Dans un cas comme dans l'autre, la dialectique fut synonyme de la capacité qu'a la philosophie de perdre de vue les normes définissant la rationalité et de l'incapacité à établir un rapport satisfaisant entre philosophie et science. C'est pourtant à la lumière de cette charge « épistémologique » que prennent sens les deux grands moments de l'élaboration philosophique de la dialectique, chez Platon puis chez Hegel.

L'origine grecque

Les témoignages de Platon et d'Aristote conduisirent Sextus Empiricus et Diogène Laërce à voir en Zénon d'Élée « l'inventeur de la dialectique ». Dialectique signifie alors « un art qui lui était propre et consistant à plonger ses adversaires dans l'embarras au moyen d'arguments contraires » (Plutarque, *Vie de Périclès*, IV, 5). On reconnaît les termes des définitions platoniciennes et aristotéliennes qui renvoient la dialectique à la conduite du dialogue. La dialectique est un art du dialogue, « l'art d'interroger et de répondre » (Cratyle, 390c). C'est l'art du dialogue polémique, et plus précisément, l'art du dialogue polémique voué à la recherche de vérité ; elle se distingue ainsi de l'éristique dont le sophiste Protagoras pouvait passer pour le fondateur (Diogène Laërce, *Vies*, IX, 51).

En parlant de la dialectique comme d'un « art », Platon signifie que le dialogue polémique doit être

conduit suivant des règles déterminées. Ces règles relèvent tout d'abord de ce que nous nommerions une logique : le *Phèdre* (266b) explique qu'elle est art d'apprendre à parler et à penser, c'est-à-dire qu'elle relève d'une vigilance quant au sens des mots et aux formes des raisonnements. Mais ces règles portent également sur le contenu du savoir, dans la mesure où la méthode mise en œuvre par le philosophe doit épouser les articulations du réel : le *Phèdre* (166a) peut ainsi puiser dans la tradition hippocratique et user de considérations anatomiques pour définir la philosophie. Chez Platon cependant, les règles de la dialectique semblent devoir plus encore aux mathématiques qu'à une logique ou à une tradition naturaliste, la forme de la réfutation socratique en atteste. Le dialogue procède en effet par réfutation, et par un type de réfutation bien particulier où l'on considère les thèses de l'adversaire comme des hypothèses pour en déduire des conséquences jusqu'à ce qu'une contradiction apparaisse. Platon prend soin d'indiquer que cette réfutation n'est pas ordinaire, et qu'elle se distingue notamment de la réfutation juridique (*Gorgias* 471b et sq.). Elle trouve en fait son modèle dans un type d'argumentation mathématique — la déduction à partir d'hypothèse —, et c'est ce qui fait tout le sens et l'enjeu des passages de la *République* où la dialectique est définie dans le cadre d'une comparaison de la philosophie et de la mathématique.

On a pu avancer l'hypothèse que ce type de réfutation caractérise tout aussi immédiatement la philosophie que les mathématiques et qu'il indique l'origine commune de l'une et de l'autre. Si l'on suit A. Szabo (*Les débuts des mathématiques grecques*), on considérera en effet que la philosophie éléate en général (Parménide, Zénon et Mélissos) et Zénon en particulier sont les inspirateurs de la révolution qui devait faire des mathématiques grecques un discours proprement démonstratif traitant des nombres et des figures comme des éléments purement abstraits et idéaux. Ces deux caractéristiques trouvent toutes deux leur source dans la philosophie éléate, et elles sont liées l'une à l'autre chez Zénon. Nous connaissons par Aristote (*Physique*, VI, 2, 9) quatre arguments célèbres portant sur le mouvement. Platon nous apprend quel est leur objectif : montrer que si l'on n'accepte pas l'identification parménidienne de l'être à l'un et si l'on prend la multiplicité du sensible pour la réalité, des conséquences absurdes en résultent (*Parménide*, 127e-128d). Telle semble être l'origine de la tradition qui fait de Zénon le fondateur de la dialectique, et telle semble également être l'origine de ce qui passa tout d'abord pour le modèle de la démonstration mathématique, la démonstration indirecte (par l'absurde).

Si l'on adopte le point de vue de cette tradition, on dira donc que philosophie et science furent tout d'abord associées l'une à l'autre par la dialectique et qu'il fallut attendre Platon pour qu'elle désigne la spécificité de la philosophie, ce qui la distingue de la mathématique. On connaît les pages de la *République* où ce déplacement s'effectue en une critique de la

mathématique qui se déploie suivant trois axes : une dépréciation des objets mathématiques qui ne relèvent pas seulement de l'abstraction mais encore de la figuration, un refus de la démarche démonstrative fondée sur des hypothèses plutôt que sur des thèses dont la vérité est établie, et une contestation de la démonstration indirecte dans la mesure où elle expose une nécessité logique qui n'est pas en même temps nécessité réelle (*République*, 510b-511e, 531d-534e). Alors que la dialectique désignait le procédé par lequel, après avoir supposé une thèse, on l'examine en considérant ce qui s'en déduit (*Parménide*, 135c-136c), la dialectique platonicienne consistera à prendre appui sur les hypothèses mathématiques pour s'élever jusqu'au principe et dériver ensuite les conséquences du principe. En ce qu'elle explique la dépendance des conséquences à l'égard d'un terme unique, la dialectique est connaissance intégrale, « vue synoptique » de l'ensemble des savoirs et de la totalité du réel (*République*, 537c). D'après Platon, cette connaissance intégrale doit mettre en œuvre une technique à même de rendre compte des articulations du réel et c'est pourquoi il dit également de la dialectique qu'elle est l'art des divisions et des synthèses (*Phèdre*, 266bc, *Sophiste*, 253cd). La spécification platonicienne de la philosophie dans le cadre d'une description de ses rapports avec les mathématiques conduit donc à l'élaboration complexe, riche et différenciée d'une notion qui conserve néanmoins le dialogue comme signification centrale. On voit en effet que les différents moments de l'activité philosophique ont le dialogue contradictoire pour élément (*République*, 511c, 534c). Concluons que la philosophie est dialectique parce qu'elle vise l'accomplissement de la pensée (533c) et que celle-ci trouve précisément son essence dans le dialogue (*Théétète*, 189e-190a).

Liée à la situation de la philosophie dans le champ du savoir, la notion de dialectique ne pouvait rester insensible à une nouvelle interprétation de la spécificité de la philosophie et à un changement du rapport de la philosophie aux sciences. On trouve ces modifications chez Aristote. En découpant l'être en genres distincts et irrédutibles les uns aux autres, il procure à la fois aux sciences des fondements assurés (la philosophie ne peut les déduire à partir d'un genre suprême ou d'un principe unique), et il interdit à la philosophie de se considérer comme une science supérieure en tous points aux autres. Cette nouvelle situation confirme l'identification de la philosophie à la dialectique tout en en modifiant le sens. La philosophie ne pouvant plus déduire les principes des sciences, il lui reste à montrer qu'ils disposent d'un degré de probabilité supérieur à celui de simples hypothèses en établissant qu'ils correspondent à l'opinion du plus grand nombre (*Topiques*, I, 1, 100 b 21). À cette fin, il faut exercer ce qui doit bien être nommé dialectique : « À l'égard de toute thèse, il faut se mettre en quête d'arguments à la fois pour et contre, et une fois qu'ils sont trouvés, rechercher immédiatement comment on peut les réfuter » (*Topiques*, VIII, 14, 164 b 3). La dialectique

reste comprise comme dialogue et comme dialogue polémique : c'est l'art de conclure des contraires (*Rhétorique*, I, 1, 1355 a 34), et si elle s'oppose encore à la science du point de vue de la généralité de son objet (*Seconds analytiques*, I, 11, 77 a 29-35), elle s'y oppose également du point de vue de la probabilité car elle ne peut plus revendiquer la certitude qui est propre aux sciences (*Topiques*, I, 2, 101 a 37 - b 4).

En définissant la dialectique comme la « méthode grâce à laquelle nous pourrions raisonner sur tout problème posé en partant de thèses probables » (*Topiques*, I, 1, 100 a 18), et en la distinguant de la logique syllogistique, Aristote insiste contre Platon sur le fait que les règles qui permettent d'établir un accord authentique au cours d'un échange discursif ne suffisent pas à définir la vérité scientifique. La spécificité philosophique conduit ainsi à l'opposition des conditions subjectives (dialectique) et objectives (théorie des syllogismes ou logique) de la vérité. Les Stoïciens remettront cette opposition en cause dans le cadre d'une compréhension des rapports de la philosophie et des sciences qui s'écarte autant du modèle platonicien que du modèle aristotélicien. Car s'il s'agira d'affirmer de nouveau la suprématie philosophique, celle-ci ne sera plus caractérisée par une méthode spécifique. Leur théorie de la connaissance renverra à une logique, qui pourra elle-même être nommée dialectique dans la mesure où la logique sera interprétée, non plus à la manière aristotélicienne comme l'étude des conditions objectives de la vérité, mais comme celle des conditions subjectives de la persuasion.

Jusqu'à l'époque moderne on entendit la dialectique en ces acceptions aristotéliciennes et stoïciennes. Si elle tomba ensuite dans le discrédit, c'est tout à la fois qu'il sembla impossible de rendre compte de la science galiléenne de la nature à partir des seules ressources de la logique, et qu'il parut nécessaire de rompre avec l'exercice passé de la philosophie pour la faire bénéficier de cette nouvelle rationalité scientifique. De Descartes à Kant, le concept de dialectique s'imposa comme le nom des défauts de la philosophie passée et comme l'antonyme de la science. Il fallut attendre Hegel pour que l'éclipse moderne de la dialectique prenne fin.

La tradition hégélienne

La promotion hégélienne de la dialectique. — Comme en témoignent les analyses consacrées à Zénon, Héraclite et Platon dans ses *Leçons sur l'histoire de la philosophie*, Hegel pensait retrouver les significations conférées par l'Antiquité à la dialectique. La thèse hégélienne suivant laquelle tout concept suscite des antinomies peut revendiquer un héritage éléate ; l'idée que la dialectique expose le mouvement du concept reprend le projet platonicien d'une méthode épousant le mouvement du réel ainsi que la définition platonicienne de la dialectique comme art d'apprendre à penser et à parler ; quant à l'identification du dialectique au systématique, elle retrouve l'ambition

synoptique de la dialectique platonicienne. Mais ces significations sont ressaisies en une élaboration originale qui entend la dialectique au sens du discours procédant de la contradiction (ce qui autorise Hegel à voir anachroniquement en Héraclite un penseur dialectique). On assiste ainsi à un déplacement du centre de gravité de la notion, la contradiction et non plus le dialogue, dont les conditions historiques sont à rechercher dans la philosophie postkantienne et dans les sciences de l'époque. De Reinhold à Schelling en passant par Fichte, les postkantien déplorèrent l'absence de fondement de la *Critique de la raison pure*, et tentèrent d'en déduire le contenu à partir d'un principe premier. À cette fin, Fichte et Schelling eurent recours à une démarche procédant par opposition de contraires et dépassement de la contradiction. C'est cette méthode que Hegel nommera dialectique, en référence à ce qu'il jugeait comme le cœur de la Dialectique transcendante de la *Critique de la raison pure*, l'antinomie de la raison pure, où Kant montrait que l'emploi de la logique formelle à titre d'*organon* (moyen de produire des connaissances) ne conduit pas seulement à des problèmes et à des obscurités, mais aussi à des contradictions, à des conflits où deux thèses opposées semblent jouir de la même validité. Pour que la contradiction passe ainsi chez Hegel du statut de simple signe de l'erreur à celui d'opérateur de la vérité, il fallait que des événements en changent le sens. Ils nous renvoient aux sciences de l'époque qui contribuèrent à donner à la négation, à l'opposition, voire à la contradiction, un sens non seulement logique, mais aussi réel. Comme Kant l'expliquait dans son *Essai sur les grandeurs négatives*, le statut de la négation mathématique ne pouvait manifestement pas être élucidé à partir du concept de négation logique. Ainsi conduit à distinguer négation réelle et négation logique, Kant s'autorisa ensuite à expliquer des propriétés physiques de la matière comme la densité et l'élasticité par le conflit de deux forces opposées. L'électrologie, la théorie du magnétisme, la chimie, la physiologie, sans parler de l'électrochimisme et de l'électromagnétisme naissant, des nombres relatifs et imaginaires, tout semblait aller dans le sens de la représentation d'une nature traversée par la polarité. L'objectif de Hegel fut d'exposer les conditions ontologiques d'une telle représentation, mais aussi de rendre compte en termes logiques (dans le cadre d'une logique spéculative) de ces types de négativité irréductibles à la négation logique.

C'est à ces conditions que la dialectique put redevenir chez Hegel le nom de la philosophie. Le fait que Hegel distingue parfois la dialectique et le spéculatif (*Encyclopédie*, § 79-82) ne doit pas nous cacher que plus qu'une restauration de la dialectique, c'est une véritable promotion qui a lieu. Chez Platon, la dialectique était définie dans le cadre d'une réflexion sur la méthode, ou sur les caractéristiques formelles de la philosophie. Chez Hegel, la dialectique est plus qu'une simple méthode. La notion s'applique à la forme comme au contenu philosophiques ; elle prétend en outre qu'ils sont indissociables. La dialectique n'est

pas seulement la technique que doit mettre en œuvre la philosophie pour être scientifique, si elle est la méthode adéquate, c'est parce que tout savoir enveloppe la contradiction, c'est parce que la vérité elle-même est de nature dialectique. Cette thèse prend chez Hegel la forme d'un conceptualisme : les concepts sont le cœur du savoir, et puisqu'un concept est une articulation de contenus de pensée contradictoires, le savoir est toujours traversé par la contradiction (*Science de la Logique*, préface de 1830 et chapitre « Le concept »). La science hégélienne se proposera de montrer comment les contradictions des concepts structurent les savoirs et démontrent leur vérité, ce qui revient bien à faire de la dialectique une forme de pensée épousant l'information immanente du contenu pensé plutôt qu'une technique d'information du contenu. Hegel parle indifféremment à ce propos d'« auto-mouvement » de la forme, du contenu ou du concept (*Phénoménologie de l'esprit*, préface ; *Science de la Logique*, introduction). Cette référence au dynamisme conceptuel doit également être entendue en un sens critique. Hegel indique ainsi que la démarche dialectique procède à une mise en mouvement ou « fluidification » des pensées (*Phénoménologie de l'esprit*, préface) rendant manifeste qu'elles sont solidaires les unes des autres plutôt qu'indépendantes et valant par elles-mêmes comme on est porté à le croire. Voilà qui nous conduit à la question du système, car par cette fluidification, la dialectique montre comment un concept, du fait de son articulation interne, appelle son articulation avec d'autres concepts déterminés, de sorte qu'en elle, un concept « s'amplifie en système » (*Science de la Logique*, chapitre « Idée absolue »).

Il importe de relever qu'en revendiquant la scientificité pour la philosophie Hegel ne fut pas conduit à refuser la scientificité des sciences positives. Sa théorie des rapports de la rationalité spéculative avec ce qu'il nomme « représentation » et « entendement » révèle en effet que le procès dialectique ne génère pas son propre contenu, qu'il se contente plutôt de déduire la vérité d'un contenu indépendant, élaboré notamment par les sciences positives (*Encyclopédie*, § 20, 79-82, 246, additif du § 268). On retrouve en fait chez Hegel le projet traditionnel d'une fondation des sciences par la philosophie. La dialectique ne fait que lui donner une forme originale. Les voies les plus souvent empruntées par la fondation philosophique sont celles de la description de la méthode assurant l'accès à la vérité, de l'établissement d'une théorie de la connaissance, de l'analyse de la cohérence logique des théories scientifiques, et de la théorie de la certitude des principes. La dialectique frayera un autre chemin. Plutôt que de s'attacher exclusivement à la certitude que le savoir reçoit des formes dans lesquelles il est exprimé, la dialectique s'attachera à la vérité du contenu et à l'adéquation des formes au contenu. Plutôt que de renvoyer ce contenu à sa genèse transcendante, psychologique ou historique, elle s'attachera à la vérité de ce qui est effectivement pensé dans le savoir scientifique tel qu'il est constitué. Et plutôt que de réduire la vérité de ce

contenu à des principes, elle montrera comment ce contenu s'amplifie en système. En définitive, on peut dire que la dialectique fournit les ressources d'une fondation originale, compatible avec la critique des théories de la connaissance développée dans la *Phénoménologie de l'esprit* et avec la dénonciation des différentes formes de formalisme.

On trouve l'illustration de cette fondation originale dans la *Philosophie de la nature*. La philosophie y conteste certes l'autocompréhension empiriste et formaliste de leur propre savoir par certains scientifiques, et il lui faut parfois s'attaquer à des théories scientifiques lorsque la prise de parti dans des controverses est requise. En outre, la contradiction étant un opérateur de vérité tout en restant le signe de l'insuffisance du savoir, c'est dans le discours dialectique même que le vrai et le faux, la science et la critique, sont indissociables. Il reste que si le propos philosophique prend ainsi une forme critique, c'est bien toujours une fondation qu'il s'efforce de produire. C'est ce que les lecteurs de l'époque ne purent voir. Aveuglés par les excès d'une Naturphilosophie d'inspiration schellingienne que Hegel avait pourtant sévèrement dénoncée, ils firent de la dialectique et de la philosophie hégélienne de la nature les symptômes d'un dévoiement irrationnel consécutif à un divorce de la philosophie et des sciences positives. Ce diagnostic, qui fit le lit du positivisme et du retour à Kant, prit vite la force d'un lieu commun, si bien que Marx éprouvait déjà le besoin de se justifier lorsqu'il employait la notion de dialectique dans un ouvrage aux prétentions scientifiques : « J'ai critiqué le côté mystificateur de la dialectique hégélienne il y a près de 30 ans, à une époque où elle était encore à la mode. Mais au moment même où je rédigeais le premier volume du *Capital*, les épigones grincheux, prétentieux et médiocres qui font aujourd'hui la loi dans l'Allemagne cultivée se complaisaient à traiter Hegel comme le brave Moses Mendelson avait, du temps de Lessing, traité Spinoza, c'est-à-dire en « chien crevé ». Aussi me déclarais-je ouvertement disciple de ce grand penseur » (*Le Capital*, postface).

La diffusion marxienne. — Donner un rôle décisif à la contradiction et unifier science et critique, telles seront bien les ambitions des fondateurs du marxisme. Le thème du caractère indissociable de la science et de la critique sera renouvelé par Marx dans le cadre d'une théorie de l'idéologie. Celle-ci a pour conséquence la dénonciation des tentatives philosophiques visant à transcender l'histoire pour énoncer des vérités éternelles, mais elle fait également porter le soupçon sur la capacité des sciences — particulièrement des sciences sociales — à dire le vrai. D'où la nécessité d'une « sortie de la philosophie » (*Idéologie allemande*) qui installe le discours dans la position d'une réflexion critique sur les discours positifs. Tel sera le statut du discours de Marx dans le *Capital*, où il s'agit d'« exposer sous une forme critique » l'économie politique classique, la « ramener par la critique à un niveau permettant de

l'exposer dialectiquement » (*Lettres à Lassale*, 22 fév. 1858 ; à Engels, 1^{er} fév. 1858). Dans la *Dialectique de la nature*, Engels installera ensuite son propre discours dans une situation analogue, où la réflexion critique s'exerce sur les sciences de la nature.

Mais Marx et Engels entendirent surtout la dialectique au sens d'une théorie des contradictions. Ils projetèrent de remettre la dialectique sur ces pieds, c'est-à-dire d'écarter tout ce qui dans la dialectique dépend de l'idéalisme hégélien. Ce projet ne trouva en fait d'autres réalisations que quelques critiques ponctuelles portant sur le statut de la contradiction. Marx reprocha tout d'abord à Hegel de postuler le caractère conciliable de toutes les contradictions (*Critique de la philosophie hégélienne du droit politique*), avant de lui reprocher de réduire le procès contradictoire du réel à des contradictions de la pensée (*Manuscrits de 44, Idéologie allemande, Introduction à la critique de l'économie politique*). Théorie de l'automouvement contradictoire du concept, la dialectique devint la théorie de la production du mouvement du réel par des contradictions empiriquement attestées et ouvrant sur une crise. C'est en ce sens précis que Marx peut dire du *Capital*, où le mouvement historique de la société capitaliste est étudié, qu'il extrait le « noyau rationnel » de la dialectique (postface). Ce programme d'une théorie du dynamisme contradictoire du réel sera ensuite exporté par Engels du domaine de l'économie politique à celui des sciences de la nature, la *Dialectique de la nature* tentant de montrer que seule la rationalité dialectique est en mesure de rendre compte des principes dynamistes, énergétistes et évolutifs des sciences de l'époque.

La dialectique dans la philosophie des sciences.

— Les significations nouvelles que Hegel avait attribuées à la dialectique se popularisèrent par l'intermédiaire des fondateurs du marxisme et elle se diffusèrent dans la philosophie du XX^e s. La notion de dialectique y fut utilisée jusque dans le champ de la philosophie des sciences. Certaines de ces utilisations se rattachent directement à Hegel. Depuis une trentaine d'années, les tentatives visant à donner une description formelle de la démarche dialectique hégélienne dans le cadre d'une logique formelle se multiplient. Contrairement aux allégations d'un Popper ou d'un Duhem, le fait que Hegel donne un nouveau statut à la négativité en général et à la contradiction en particulier ne signifie pas qu'il ne reconnaisse pas le principe de non-contradiction et que son discours sombre dans le non-sens. L'intérêt des recherches logiciennes est d'établir que la démarche hégélienne possède une rigueur spécifique par la formalisation de la thèse suivante laquelle la négation d'une négation (double négation) ne peut équivaut à l'absence de négation puisque toute négation est négation déterminée. On a également tenté de faire valoir l'intérêt épistémologique de la pensée hégélienne en transcrivant la psychologie génétique de Piaget en termes dialectiques. Mais peut-être le véritable intérêt épistémologique de

la dialectique, au sens hégélien du terme, est-il ailleurs, dans le projet visant à rendre compte de la vérité par l'analyse du « travail » des concepts plutôt que par une théorie de la connaissance ou une logique.

Que ce projet ait une pertinence, c'est ce que semblent avérer des philosophes des sciences comme Gonsseth, Cavailles, Lautmann et Bachelard. Lorsqu'ils emploient la notion de dialectique pour désigner la dimension processuelle de la pensée dont le transcendantalisme husserlien et le logicisme méconnaissent l'importance, ils se montrent plus fidèles à Hegel qu'ils ne le pensent. La notion trouve certes chez chacun d'eux des usages distincts, et on a même pu soutenir que Bachelard en fait une utilisation sauvage. En outre leur rapport à l'origine hégélienne suppose différentes médiations, l'intermédiaire marxien qui tend à rabattre la dialectique sur l'histoire, comme l'intermédiaire hamelinien qui pouvait donner à penser en France que toute utilisation rationnelle de la dialectique se faisait nécessairement contre Hegel, plus particulièrement contre son concept de contradiction. Il sera donc inutile de rechercher ce qui éloigne ces philosophes de la dialectique hégélienne. Relevons plutôt qu'en dépit d'un retour de la référence antique au dialogue, dans une philosophie comme celle de Bachelard où la notion joue un rôle central, c'est bien à partir de significations hégéliennes que la dialectique se déplace sur le terrain de la philosophie des sciences. C'est le cas lorsque la notion intervient pour dénoncer l'unilatéralité des positions philosophiques en matière de philosophie des sciences (rationalisme, empirisme...), c'est également le cas lorsqu'elle intervient pour décrire le rôle constitutif de la négation dans la formation des concepts, et c'est encore le cas lorsque la dialectique intervient dans une stratégie visant à renvoyer la vérité au mouvement de l'histoire et à un travail dont le centre de gravité est situé dans les concepts, lorsque l'erreur est conçue comme l'élément moteur de la connaissance plutôt que comme une simple étape de cette histoire, et lorsque le vocabulaire de la négativité permet de rendre compte de la discontinuité du mouvement historique.

► ALTHUSSER L., « Contradiction et surdétermination », « Sur la dialectique matérialiste », *Pour Marx*, Paris, Maspero, 1965, p. 87-128, 163-224. — AUBENQUE P., *Le problème de l'être chez Aristote*, Paris, PUF, 1962. — BERNAYS P., « Zum Begriff der Dialektik », *Dialectica*, 1, 1947, p. 172-175. — BOURGEOIS B., « Dialectique et structure dans la philosophie de Hegel », *Études hégéliennes. Raison et décision*, Paris, PUF, p. 111-133. — CANGUILHEM G., « Dialectique et philosophie du non chez Gaston Bachelard », *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1968, p. 196-207. — CAVAILLES J., « Transfini et continu », *Philosophie mathématique*, Paris, Hermann, 1962, p. 153-274 ; *Sur la logique et la théorie de la science*, Paris, PUF, 1947. — CHATELET G., *Les enjeux du mobile. Mathématique, physique, philosophie*, Paris, Le Seuil, 1993. — DOZ A., « Usages et abus du mot dialectique », in DUBARLE D. & DOZ A., *Logique et dialectique*, Paris, Larousse, 1972, p. 203-237. — DUBARLE D., « Logique hégélienne et formalisation », in DUBARLE D. & DOZ A., *op. cit.*, p. 1-200. — DUHEM P., *La science allemande*, Paris, Hermann, 1915. — GONSETH F., « L'idée de dialectique aux entretiens de Zurich », « Peut-on

parler de "science dialectique" ? », *Dialectica*, 1, 1947, p. 21-37, 293-303. — HAMELIN O., *Essai sur les éléments principaux de la représentation*, Paris, Alcan, 1907. — HENRICH D., « Hegels Grundoperation », in GUZZONI W., *Der Idealismus und seine Gegenwart. Festschrift für Werner Marx*, Hambourg, Felix Moiner, 1976. — KESSERLING T., *Die Produktivität der Antinomie. Hegels Dialektik im Lichte der genetischen Erkenntnistheorie und der formalen Logik*, Francfort/Main, Suhrkamp, 1984. — LAUTMAN A., « Nouvelles recherches sur la structure dialectique des mathématiques » (1939), « Mathématiques et réalité » (1935), *Essai sur l'unité des mathématiques et divers écrits*, Paris, UGE, 1977, p. 203-228, 281-285. — LÉVINE, *Cahiers philosophiques*, Paris, ES, 1973. — POPPER K., « Qu'est-ce que la dialectique », *Conjectures and Refutations. The Growth of Scientific Knowledge*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1963 (trad. fr. M. I. & M. B. Delaunay, *Conjecture et réfutation. La croissance du savoir scientifique*, Paris, Payot, 1985, p. 456-489). — REIDEL M. éd., *Hegel und die Antike Dialektik*, Francfort/Main, Suhrkamp, 1990. — RENAULT E., *Marx et l'idée de critique*, Paris, PUF, 1995. — RIVELAYGUES J., « La dialectique de Kant à Hegel », *Leçons de métaphysique allemande*, Paris, Grasset, 1990. — ROBIN L., *Platon*, Paris, Alcan, 1935. — SZABO A., *Anfänge der griechischen Mathematik*, Budapest, Akademiai Kiado, 1977 (trad. fr. M. Federspiel, *Les débuts de la mathématique grecque*, Paris, Vrin, 1977). — THEUNISSEN M., *Sein und Schein. Zur kritischen Funktion der Hegelschen Logik*, Francfort/Main, Suhrkamp, 1978. — TOSEL A., « Formes de mouvement et dialectique "dans" la nature selon Engels », *Études sur Marx (et Engels). Vers un communisme de la finitude*, Paris, Kimé, 1996, p. 105-138. — VADÉE M., *Gaston Bachelard ou le nouvel idéalisme épistémologique*, Paris, ES, 1975. — WANDSCHNEIDER D., « Dialektik als antinomische Logik », *Hegeljahrbuch* 1991, p. 227-242. — WOLFF M., *Der Begriff der Widerspruch. Eine Studie zur Dialektik Kants und Hegels*, Königstein, Hain, 1981.

Emmanuel RENAULT

→ Concept ; Conjecture ; Démonstration ; Hegel ; Naturphilosophie ; Platon ; Réfutabilité.

DONNÉ

Le donné est un concept épistémologique dont on voit mal comment une réflexion sur les sciences empiriques pourrait se passer, et auquel en même temps est associée toute une série de problèmes et d'équivoques. Là où le discours scientifique fait appel à l'expérience, il faut bien qu'il ait affaire à quelque chose qu'il n'a pas formé, qu'il reçoit dans cette expérience, et qui précisément « lui est donné ». Dans la théorie aristotélicienne de la science, la collection du donné, qui est nommée *historia* (d'où le concept ultérieur d'« histoire naturelle »), constitue la première étape indispensable du savoir empirique. On retrouve une telle exigence tout au long de l'histoire de la méthodologie de la science empirique, de Bacon au positivisme, qui fait l'apologie de l'observation, à laquelle justement le « donné » est donné. Pourtant, il faut remarquer que le concept n'est pas thématique en ce sens-là avant le tournant représenté par la philosophie critique, et notamment fort absent de l'empirisme anglais classique, que l'on retraduit aujourd'hui comme une philosophie du donné. Ainsi, Hume n'emploie pas une

seule fois le mot donné pour caractériser l'expérience ou ce qui est « donné » par elle.

Dans les textes classiques, le donné n'apparaît guère que sous la figure de l'« étant donné », là où l'on pose une hypothèse ou un constat, sans référence particulière au fait qu'il s'agisse d'une donnée d'expérience. On parlera notamment bien sûr des données d'un problème, et, dès les mathématiques grecques, la notion de donné prendra le sens plus technique de ce qui est posé par hypothèse dans ce mode de traitement d'un problème qui consiste à le supposer résolu (cf. Charles Mugler, *Dictionnaire historique de la terminologie géométrique des Grecs*, Paris, Klincksieck, 1958, p. 138 sq.). Il existera aussi un usage métaphysique de la notion de donné (*datum*), qui prendra un certain relief à partir de la détermination leibnizienne de la métaphysique : pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien. Cet usage identifie plus ou moins le donné à l'être-réel. On en trouve l'exemple chez Wolff : « On ne peut rien obtenir à partir du rien, mais il faut toujours que quelque chose soit donné » (*Vernünfftige Gedanken*, ch. VIII, § 1). Mais on remarquera ici, que, comme ce sera encore le cas chez Kant dans la *Dissertation de 1770* (cf. le § 5 où il est dit que les concepts des choses nous sont donnés par l'usage réel de l'entendement), il n'est nullement dit que le donné doive son statut de donné à quelque enracinement dans l'expérience sensible. C'est un concept purement métaphysique qui désigne le « non-rien ».

Il revenait à Kant d'infléchir de façon radicale l'histoire du terme en direction de l'idée de donation sensible et, par là même, de prescrire son usage moderne. L'opération est conduite en deux temps. D'abord, dans l'important écrit de 1763 sur *L'unique fondement possible d'une démonstration de l'existence de Dieu*, Kant définit l'être réel par l'être-donné, et non plus l'inverse. La possibilité même des choses est alors subordonnée à la possibilité pour elles d'être données : « Il est facile de voir que la possibilité fait défaut, non seulement lorsqu'on rencontre une contradiction interne, condition logique de l'impossibilité, mais aussi lorsqu'aucun élément matériel, aucun *datum* ne s'offre à la pensée. En effet, dans ce cas, rien n'est donné qui puisse être pensé. » En un second temps (ce qui n'est pas encore le cas dans l'écrit de 1763), Kant restreint le sens du donné à ce qui peut être donné de façon sensible, et ce sera l'œuvre propre de la *Critique*. C'est le fameux § 1 de l'*Esthétique transcendantale*, où Kant avance plusieurs thèses qui seront déterminantes pour l'emploi contemporain de la notion de donné, et pour les questions qui y seront liées. Il y va d'un privilège de l'intuition, axe téléologique de notre connaissance en tant que connaissance immédiate. C'est cette immédiateté qui requiert une donation dont on comprend alors qu'elle s'oppose essentiellement au fait de devoir se donner, à l'activité qu'il faudrait déployer pour obtenir ce qui précisément ne nous est pas donné : m'est donné ce dont je n'ai pas besoin de me le donner, au sens où — c'est la thèse proprement critique — au moins dans notre cas à nous, hommes, cet effort supposerait une

non-immédiateté d'accès à la chose. La donation est synonyme alors de la pure présence de la chose, qui est « donnée » sans médiation. Ce qui, chez l'homme, n'est rendu possible que par l'intuition sensible, synonyme d'une réceptivité essentiellement passive. Dès lors peut se déployer à travers le criticisme un véritable dualisme épistémologique, qui disjoint présence sensible et détermination conceptuelle de l'objet : « Sans la sensibilité, nul objet ne nous serait donné ; sans l'entendement, nul ne serait pensé » (*Critique de la raison pure*, A 51), tout en les réunissant dans une thèse de complémentarité : « Des pensées sans contenu sont vides ; des intuitions sans concepts sont aveugles. »

Un tel dispositif (donné sensible + conceptualisation / interprétation) gouverne l'ensemble de la discussion épistémologique qui suivra, du XIX^e s. jusqu'à nos jours. Mais l'aspect le plus remarquable de la construction kantienne, c'est l'attribution audit donné d'une forme *a priori* qui régit le mode de sa donation. Loin que l'*a priori* soit réservé à la seule sphère de la pensée, il existe aussi une détermination *a priori* de la façon dont les objets sont donnés. Cette détermination est celle des deux grandes formes de l'intuition, l'espace et le temps. Les positivistes du XIX^e s. ne suivront évidemment pas Kant en ce qui concerne le caractère d'*a priori* de cette structure. C'est la phénoménologie husserlienne qui, au-delà de la simple reconduction positiviste des constructions métaphysiques à la seule évidence limitative du « donné », réouvrira une interrogation sur le sens même qu'il y a à ce donné d'être donné.

La phénoménologie se définit essentiellement par l'interrogation des différents modes de donnée sous lesquels les choses, les êtres, les événements, ou tout autre type de phénomènes peuvent se manifester (à une conscience ou non, suivant le type de phénoménologie que l'on considère). Elle est descriptivement ouverte à toute forme de donnée (loin au-delà de la seule « donnée sensible » dont se réclame le positivisme), mais dans la seule mesure où celle-ci se donne et de la façon même dont elle se donne, c'est-à-dire apparaît (cf. « le principe des principes » de la phénoménologie, avancé par Husserl au § 24 des *Idées directrices pour une phénoménologie*). Il y va de se plier au régime d'apparaître propre du donné, de le saisir dans sa façon même d'apparaître — ce que vient supporter l'idée qu'il soit « donné » — qui gagne une valeur méthodologique essentielle. Dans sa version transcendantale, la phénoménologie examine cette sphère de la phénoménalité indépendamment de la réalité de ce qui est donné par là, et même la débuse par la mise en suspens d'une telle réalité, qui est mise hors jeu par son analyse (c'est la « réduction »). De l'être naturel des choses qui sont données on revient alors à leur manifestation pour une conscience transcendantale où se détermine le véritable sens de la donnée, comme donation de sens (*Sinngebung*) par cette conscience (cf. Husserl, *Idées directrices*, § 85).

Beaucoup des difficultés rencontrées au XX^e s. par la

notion de « donné » sont liées à la possibilité ou non d'une telle entente phénoménologique du problème. Il est généralement question, chez les héritiers du positivisme, du statut des « énoncés de base » (*basic statements*) qui forment le premier niveau de l'édifice scientifique, et parfois de l'existence même de tels énoncés. À quoi se réfèrent-ils, s'ils existent, et est-il même pertinent de raisonner dans ces termes ? C'est eux qu'habituellement on rapportera à un donné, qui semble toujours exprimer comme une butée à notre analyse, ce en deçà de quoi on ne peut pas remonter (ce en vertu de quoi il s'appelle « donné »). Mais qu'est-ce qu'un tel « donné » ? Tout d'abord pèse sur lui l'ambiguïté, renforcée par la phénoménologie, mais présente dès l'origine (transcendantale) de la notion, de la référence subjective qu'elle semble comporter. Ce qui est donné, n'est-ce pas toujours d'abord ce qui m'est donné ? Au § 65 de *Der logische Aufbau der Welt*, Carnap posera avec la plus grande fermeté que « le donné est sans sujet ». Le donné est alors renvoyé du côté d'un contenu d'expérience objectif qui sert d'unité de base à la science, indépendant des expériences d'une conscience subjective. Ce sera aussi la démarche de Russell par rapport à la notion de *sense-data*, qu'il avait introduite au chapitre 1 des *Problèmes de philosophie* (1912) pour caractériser le contenu immédiat de la connaissance sensible, et qu'il précise ultérieurement en un sens qui la rend selon lui indépendante du fait de savoir si lesdits *sense-data* sont effectivement « donnés » ou non — leur subsistance alors leur confère en définitive un sens purement physique. Mais, en dehors même de toute référence subjective, cette idée d'un donné élémentaire ne continue-t-elle pas de faire problème ?

Au centre de la discussion contemporaine sur le donné (jusqu'à Davidson et aux sciences cognitives), il y a la difficile question de la constitution de notre connaissance suivant une structure forme-matière de toute évidence problématique dont il est pourtant malaisé de voir comment se dispenser, et du statut d'un éventuel élément infra-conceptuel (donc, peut-être, dans un rapport là encore à déterminer, infra-linguistique) dans notre connaissance. Cette question, sous la forme de celle de la nature desdits « énoncés protocolaires » (cf. l'exposé synthétique de Russell au chapitre X de *Signification et vérité*), avait déjà mobilisé toute l'énergie du Cercle de Vienne, dont les membres proposèrent des réponses fort différentes. Dans un traitement particulièrement radical du problème, Schlick s'attaque à l'idée même d'un « contenu » de connaissance. Dans une série de conférences prononcées à Londres en 1932 sous le titre *Form and Content*, Schlick s'interroge sur la différence qui peut exister entre la perception d'un homme normal et celle d'un aveugle, problème classique de la philosophie de la connaissance, notamment dans la querelle qui au XVIII^e s. séparait l'empirisme de l'innéisme. N'est-ce pas qu'au voyant certains contenus sont donnés qui ne peuvent l'être à l'aveugle ? C'est précisément ce que récuse Schlick. Pour lui, la différence est globale : elle

a trait à ce que, en termes wittgensteiniens, on pourrait appeler la grammaire de la perception du malvoyant, qui n'est pas la même que la nôtre. Peut-être à la base des perceptions respectives y a-t-il de tels contenus, mais, comme tels, il n'y a rien à en dire. La différence de teneur cognitive des perceptions est une différence de forme, ou de structure, et seule elle importe pour le discours scientifique. Ici une première attaque est dirigée contre la dualité forme/donné qui viendrait la remplir et la rendrait vraie, qui devait être suivie de bien d'autres. La moins célèbre n'est pas celle menée par Davidson en 1974 dans son texte « On the Very Idea of a Conceptual Scheme » (repris dans *Enquêtes sur la vérité et l'interprétation*), où, poursuivant la démarche de Quine dans « Two Dogmas of Empiricism » (publié in *From a Logical Point of View*, Cambridge, Mass., Harvard Univ. Press, 1951 ; trad. fr., « Deux dogmes de l'empirisme », in Pierre Jacob, *De Vienne à Cambridge*, Paris, Gallimard, 1980), non sans réserve critique, il remet en question la séparation – et la complémentarité – entre « schèmes conceptuels » d'un côté et « donné » de l'autre. Pour lui, la référence à une « réalité ininterprétée » à laquelle viendraient s'appliquer nos énoncés (conception qui selon lui est aussi bien au fondement du relativisme, cette référence étant nécessaire à concevoir la divergence même de ces énoncés) est dépourvue de sens.

Ces discussions prennent un sens particulier à l'heure où les sciences cognitives semblent s'orienter vers la reconstitution d'une théorie du donné comme « contenu mental » à la base de l'expérience. La question reste toutefois ouverte de savoir, si – ce qui serait certainement une façon d'entendre le message de la phénoménologie, dont il ne faut pas oublier qu'elle a commencé à se constituer par la rupture avec la théorie brentianienne des contenus mentaux, au profit de l'idée d'une donation des choses « elles-mêmes » à la conscience – il ne faut pas dissocier aujourd'hui la notion de donné de celle de « contenu » ou de « matière » de la connaissance, en abandonnant un préjugé vieux comme l'empirisme et l'idéalisme. Que les choses n'apparaissent que toujours déjà informées, constituées, et selon leur mode d'information et de constitution – ce qui veut dire notamment dans un langage – ne les empêche en rien d'être données, ce qui assigne de toute façon une limite à nos prétentions à les constituer. Reste ce qui est donné, qui pourrait ne pas l'être, et que, suivant une formule qui revient toujours, nous ne pouvons pas nous donner. Dans cette évidence minimale subsiste un certain sens du donné, énigmatique dans sa pauvreté même, qui pourrait bien être celui de l'expérience en général, et qui expliquera par exemple, comme on le voit dans les *Remarques sur la philosophie de la psychologie*, que Wittgenstein, critique de l'illusion de l'immédiateté et du donné privé s'il en est, ait pu jusqu'au bout maintenir la différence entre voir et interpréter, qui joue un rôle majeur dans sa pensée. La pensée est loin d'avoir réglé ses comptes avec la priorité à elle (qui n'est certes pas un *a priori*, ou alors qui est celui de l'aposteriorité elle-même,

suivant un paradoxe fécond) de l'expérience, et à ce niveau le champ de questions ouvert par la phénoménologie demeure un problème pour l'épistémologie, sans qu'il soit sûr pour autant que le fait que les choses soient données soit justiciable d'un traitement spécifique, constituant une discipline autonome, telle qu'a prétendu l'être la phénoménologie au sens historique.

► BENOIST J., « Qu'est-ce qui est donné ? La pensée et l'événement », *Archives de philosophie*, 59, 1996, p. 629-657. – BOUVERESSE J., *Langage, perception et réalité*, Nîmes, Jacqueline Chambon, 1995. – CHENET F.-X., *L'assise de l'ontologie critique. L'esthétique transcendantale*, Lille, Presses Univ. de Lille, 1994. – DAVIDSON D., *Inquiries into Truth and Interpretation*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1984 (trad. fr. P. Engel, *Enquêtes sur la vérité et l'interprétation*, Nîmes, Jacqueline Chambon, 1993). – MAC DOWELL J., *The Mind and the World*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1994. – MARION J.-L., *Étant donné*, Paris, PUF « Épiméthée », 1997. – RUSSELL B., *An Inquiry into Meaning and Truth*, Londres, Allen & Unwin, 1950 (trad. fr. Ph. Devaux, *Signification et vérité*, Paris, Flammarion, 1969, chap. 10).

Jocelyne BENOIST

→ A priori ; Cercle de Vienne ; Criticisme ; Empirisme ; Expérience ; Fait ; Husserl ; Kant ; Objectivité ; Phénoménologie ; Russell ; Transcendantal.

DUHEM Pierre, 1861-1916

Physicien et historien des sciences né à Paris, il est nommé en 1887 maître de conférences à la Faculté des sciences de Lille, puis à celle de Rennes (1893) avant de devenir professeur à la Faculté des sciences de Bordeaux en 1894. Il a réuni ses travaux scientifiques dans son *Traité d'énergétique ou de thermodynamique générale*. Il fut élu à l'Académie des sciences en 1913.

Son œuvre épistémologique est universellement connue grâce à son grand livre intitulé *La théorie physique, son objet, sa structure* (1906). Il y écrit : « Une théorie physique n'est pas une explication. C'est un système de propositions mathématiques, déduites d'un petit nombre de principes, qui ont pour but de représenter aussi simplement, aussi complètement et aussi exactement que possible, un ensemble de lois expérimentales... »

Duhem adhère au principe de l'« économie de pensée » énoncé par Mach. La condensation d'une foule de lois en un petit nombre de principes lui apparaît comme « un immense soulagement de la raison humaine ». À quoi il ajoute que « la théorie n'est pas seulement une représentation économique des lois expérimentales ; elle est encore une classification de ces lois ». Ces connaissances classées sont des connaissances « d'un emploi commode » et « d'un usage sûr ». Mieux, « partout où l'ordre règne, il amène avec lui la beauté ». Lorsqu'on suit la marche d'une des grandes théories de la physique, on ne peut manquer d'être sensible à ce que « cette création de l'esprit humain est vraiment une œuvre d'art ».

Dans un ouvrage monumental *Le système du monde*,

histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic (1913-1917), Duhem met en scène la lutte des théories qui prétendent atteindre la réalité – toujours sujettes à controverses – et celles qui se veulent plus modestement miroirs rationnels d'une réalité qui échappe à nos prises.

Mais c'est surtout par la référence que le philosophe américain W.O. Quine a fait à l'un des arguments développés dans la deuxième partie de *La théorie physique* (chap. VI, § 2) que le nom de Duhem a acquis une renommée universelle dans le monde des épistémologues. On y parle de la « loi de Duhem-Quine ». Cet argument se présente comme une critique de l'idée d'expérience cruciale. Duhem part de la difficulté classique concernant la structure logique du raisonnement qui soutient cette idée. Cette structure est assimilable à la démonstration par l'absurde en mathématiques. Pour prouver une proposition, on part de sa négation et on en déduit une conséquence qui est reconnue fautive. De la fausseté de la conséquence, on conclut à celle du principe d'où on l'a tirée, le faux ne pouvant se déduire du vrai. Dans une deuxième étape, de la fausseté de ce principe, on conclut à la vérité de celui dont il est la négation. Mais cette seconde inférence n'est évidemment rigoureuse que si les deux principes sont contradictoires entre eux. Or, si la démonstration mathématique est susceptible de nous placer dans une telle situation d'alternative, il n'en va pas de même pour l'expérience cruciale. Les deux hypothèses entre lesquelles elle doit trancher sont simplement rivales. Rien ne nous assure qu'il n'y en ait pas une troisième, à laquelle personne n'aurait songé.

Francis Bacon faisait valoir que si l'expérience ne répondait jamais franchement oui à nos questions, il y a des cas où elle répond franchement non. L'expérience cruciale se voyait assignée une telle fonction d'exclusion. Duhem montre que dans la physique jamais on n'a affaire à une situation aussi simple. Le principe d'où l'on tire la conséquence expérimentale ne se laisse pas isoler ; il est toujours solidaire de l'ensemble de la physique du temps. Si donc il y a démenti de l'expérience, ce démenti ne permet pas d'affirmer que c'est le principe en question qui doit être rejeté. Il indique simplement qu'il y a une erreur dans l'ensemble des principes acceptés.

« Le physicien, écrit Duhem, ne peut jamais soumettre au contrôle de l'expérience une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble d'hypothèses ; lorsque l'expérience est en désaccord avec ses prévisions, elle lui apprend que l'une au moins de ses hypothèses est inacceptable et doit être modifiée ; mais elle ne lui désigne pas celle qui doit être changée. » Ce sont finalement des raisons de simplicité, de convenance, qui dictent la décision.

► *L'évolution de la mécanique*, Paris, Joanin, 1903. – *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris, Chevalier & Rivière, 1906. – *Études sur Léonard de Vinci*, Paris, Hermann, 3 vol., 1906-1913. – *Sauver les phénomènes*, Paris, Hermann, 1908. – *Le système du monde, histoire des doctrines*

cosmologiques de Platon à Copernic, Paris, Hermann, 10 vol., 1913-1959.

► BRENNER A., *Duhem : science, réalité et apparence*, Paris, Vrin, 1990 ; *Duhem : Science, réalité et apparence : la relation entre philosophie et histoire dans l'œuvre de Pierre Duhem*, Paris, Hermann, 1997 ; *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, Paris, PUF, 2003. – Numéro spécial des *Études philosophiques*, n° 4, 1967, sur « L'épistémologie de Pierre Duhem ».

Dominique LECOURT

→ Continuité ; Conventionalisme ; Crise de la physique moderne ; Découverte ; Énergétisme ; Expérience ; Expérience cruciale ; Fait ; Preuve ; Quine ; Réalisme ; Réfutabilité ; Test ; Théorie ; Virtuel.

DUMMETT Michael, né en 1925

Philosophe et logicien anglais, M. Dummett a fait ses études à Oxford entre 1947 et 1950 et a occupé à partir de 1960 la chaire de philosophie des mathématiques à Oxford. Il a consacré de nombreux ouvrages à G. Frege, adoptant tour à tour une lecture purement analytique dans *Frege philosophy of language* (Duckworth, UK, 1973), et dans *The interpretation of Frege's philosophy* (Duckworth, UK, 1981), puis une lecture historique dans *Frege and other philosophers* (Clarendon Press, Oxford, 1991). Son travail sur Frege ne lui fait pas pour autant adopter les thèses frégréennes : Dummett est un antiréaliste pour qui la signification ne saurait transcender l'usage qu'en font les locuteurs compétents ; il refuse le critère réaliste de Frege et de Russell selon lequel la signification d'une proposition est déterminée par ses conditions de vérité et substitue à un tel critère une conception où la vérité est dépendante de l'assertabilité. Cette thèse le pousse à refuser, comme le font les intuitionnistes, les lois logiques classiques comme le principe du tiers-exclu ($P \vee \text{non-}P$). Pour toute proposition, la preuve doit être construite et ne peut par conséquent reposer sur des lois logiques générales. Dummett rejette cependant les critiques que Brouwer adresse au langage ainsi que le solipsisme du géomètre hollandais ; il pense plutôt comme Wittgenstein que les mathématiques sont une entreprise qui suppose l'usage public du langage. Il s'écarte cependant de Wittgenstein, en considérant le bien-fondé d'une philosophie des mathématiques. S'étant engagé durablement dans la lutte contre le racisme, il ne partage cependant pas l'avis de ceux pour qui l'œuvre d'un philosophe doit être couronnée par une éthique.

► Travaux principaux (en dehors de ceux mentionnés dans le texte) : *Les origines de la philosophie analytique*, trad. fr., Paris, Gallimard, 1991. – *Philosophie de la logique*, trad. fr., Paris, Minuit, 1991. – *Truth and other enigmas*, Londres, Duckworth, 1978. – *The Logical basis of metaphysics*, Londres, Duckworth, 1991. – *Frege, Philosophy of Mathematics*, Londres, Duckworth, 1991.

Ali BENMAKHOULF

→ Frege ; Vérité ; Wittgenstein.

E

ÉCOLOGIE

À la suite des grands voyages d'exploration des XVII^e et XVIII^e s., le nombre d'espèces végétales et animales connues augmente considérablement. Le nombre d'espèces végétales recensées est plus que doublé au cours du XVIII^e s. pour atteindre 40 000 dans les années 1820. Cet accroissement pose des problèmes de classification et soulève des questions liées aux paysages végétaux : les toundras des hautes latitudes présentent partout la même physionomie, qu'on les observe en Amérique du Nord ou en Sibérie ; et les forêts tropicales humides revêtent le même aspect en Amazonie, en Afrique centrale ou à Bornéo. Pourtant, les compositions spécifiques de ces grands ensembles végétaux sont très différentes selon les lieux géographiques. Au commencement du XIX^e s., de telles parentés physiologiques apparaissent encore comme paradoxales ; il s'agit donc de les expliquer. Elles seront bientôt interprétées comme les résultantes de convergences adaptatives des plantes individuelles sous la pression de conditions environnementales identiques. De nombreux travaux sont engagés dans cette direction après la publication, par le savant prussien Alexander von Humboldt (1769-1859), de l'ouvrage fondateur de cette perspective de recherche : *l'Essai sur la géographie des plantes* (Paris, Schoell, 1807).

Le mot « écologie » (du grec *oikos*, habitat, maison, et *logos*, discours) est inventé en 1866 par le biologiste allemand Ernst Heinrich Haeckel (1834-1919), afin de désigner par un vocable unique les travaux très divers effectués dans le cadre de cette problématique : « [...] l'*oekologie* [...] science de l'économie, du mode de vie, des rapports vitaux externes mutuels des organismes, etc. » (*Générale Morphologie der Organismen* [1866], vol. I, Berlin). Dans le second volume du même ouvrage, Haeckel propose la définition devenue classique : « Par *oekologie*, nous entendons la totalité de la science des relations de l'organisme avec l'environnement, comprenant, au sens large, toutes les conditions d'existence. »

En 1868, le concept linnéen d'« économie de la nature » est introduit dans la définition : « *L'oecologie ou distribution géographique des organismes* [...] la science de l'ensemble des rapports des organismes avec le monde extérieur ambiant, avec les conditions organiques et anorganiques de l'existence ; ce qu'on a

appelé l'*économie de la nature*, les mutuelles relations de tous les organismes vivants en un seul et même lieu, leur adaptation au milieu qui les environne, leur transformation par la lutte pour vivre, surtout les phénomènes du parasitisme, etc. » (*Histoire de la Création*, 1874, Paris ; 1^{re} éd. : *Natürliche Schöpfungsgeschichte*, 1868, Berlin).

Des origines géobotaniques

Il est donc légitime de se pencher sur la pensée réputée « écologique » de Carl Linné (1707-1778). Celle-ci serait à son sommet dans certaines dissertations d'étudiants qui lui sont traditionnellement attribuées. De nombreux mécanismes à l'œuvre dans les communautés d'animaux et de végétaux et aujourd'hui étudiés par les écologues y sont décrits. Ainsi : « La *Structure* même des plantes concourt souvent [...] selon les dispositions divines, à leur conservation et à celle des autres plantes. » (C. Limoges dir., Carl Linné, *L'équilibre de la nature*, Paris, Vrin, 1972). Ce providentialisme ne fait pas obstacle au constat de proportion entre les espèces, mais attribue au phénomène une source divine, ce qui ne favorise pas la mise en évidence des mécanismes qui y président. La même remarque s'applique d'ailleurs à Aristote (384-322) dont l'œuvre naturaliste est marquée en profondeur par le finalisme. Le fossé épistémologique qui sépare ces causalités fléchées et la causalité aveugle de l'écologie scientifique permet donc difficilement d'installer une filiation entre les problématiques d'Aristote ou de Linné, et celles de la partie de l'écologie consacrée à l'étude des communautés d'organismes vivants. Enfin, et quoiqu'il ait été jusqu'à adopter des positions antifinalistes, Georges Louis Leclerc de Buffon (1707-1788) n'en a pas moins manifesté avec constance un anthropomorphisme sans ambiguïté : l'Homme est considéré dans toute son œuvre comme « vassal du ciel » et « roi de la terre » (*Histoire Naturelle*, 1849, t. XII), et son action sur la Nature est tenue pour expression de la sagesse divine. Dès lors, Buffon ne peut être considéré comme un « précurseur », même lointain, de l'écologie scientifique, bien qu'il ait fréquemment choisi de décrire des faunes géographiques, ce qui établissait ainsi certaines relations entre les êtres vivants et leur environnement.

Humboldt eut une grande influence sur les géobotanistes du XIX^e s., et plus généralement sur les naturalistes

à qui il ouvrait de nouvelles perspectives de recherche (ainsi, sont esquissés, dès 1805, les contours programmatiques d'une « géographie des animaux »). Il fut influencé par la « Naturphilosophie » et le mouvement romantique, et se lia d'amitié avec Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832), à qui il dédia l'édition allemande de l'*Essai sur la géographie des plantes*. À l'instar du poète de Weimar, Humboldt refusait l'analyse « meurtrière » et les découpages excessifs de la science classique ; il s'agissait de penser la nature tout entière. À sa suite, les biogéographes s'attacheront à considérer des ensembles : des « groupements » ou même des « communautés » – démarche totalisante qui sous-tend ainsi la pensée écologique dès ses lointaines origines.

L'ensemble des facteurs définissant les divers climats était désormais saisi comme présidant à la répartition des vivants sur la Terre. Dans ce cadre général, le botaniste genevois Augustin-Pyramide de Candolle (1778-1841) prit en compte des facteurs jusqu'alors assez peu étudiés, comme la lumière ou les types de terrains, et établit une distinction importante entre la « station » – définie par les « circonstances » dans lesquelles une espèce se plaît, et l'« habitat » – la zone géographique dans laquelle on peut la rencontrer. Son fils, Alphonse de Candolle (1806-1893), prolongea de manière critique cette orientation de recherche, dans sa monumentale *Géographie botanique raisonnée* (1855). Rencontrant les limites explicatives des considérations climatiques, il mit en évidence l'importance des végétations anciennes dans l'explication des végétations actuelles. Il accepta également dans cet ouvrage la thèse du botaniste suisse Jules Thurmann (1804-1855) qui venait d'affirmer, à propos de la répartition des végétaux, la prépondérance de la structure physique des sols (c'est-à-dire leur capacité à plus ou moins retenir l'humidité) sur leur composition chimique.

Cependant, les différentes approches phytogéographiques demeuraient conceptuellement dispersées. Afin de rendre possible leur unification, le botaniste de Göttingen August Heinrich Grisebach (1813-1879) se pencha dès 1838 sur la typologie des paysages végétaux et proposa le concept de « formation végétale » comme unité phytionomique fondée sur des groupements de plantes adaptées – les « formes de croissance » : « Je nommerais formation phytogéographique un groupe de plantes présentant un caractère phytionomique défini, comme une prairie, une forêt, etc. » (« Über den Einfluss des Klimas auf die Begränzung der Natürlichen Floren », *Linnaea*, 12).

Pendant les années 1840, l'agrochimie est intégrée au domaine de recherche qui va devenir l'écologie. Le baron Justus von Liebig (1803-1873) énonce la fameuse « loi du minimum » selon laquelle la croissance d'une plante dépend de l'élément nutritif dont elle dispose en quantité minimum. En 1905, cette loi sera étendue par Frederick Frost Blackman (1866-1947) au maximum également (« loi des facteurs limitants »). Entre-temps, le chimiste et ingénieur

des mines Jean-Baptiste Boussingault (1802-1887) aura étudié la nutrition des plantes, l'absorption de l'azote – notamment par les légumineuses – et la question des rotations culturales.

Ainsi, la maîtrise des facteurs de l'environnement s'affirme considérablement dans la seconde partie du siècle. Le botaniste Gaston Bonnier (1853-1922), auteur de la flore qui porte son nom, et le botaniste-forestier Charles Flahault (1852-1935) se sont penchés au cours de leurs voyages dans les Alpes et en Scandinavie sur les variations des végétaux en fonction de divers gradients environnementaux. Gaston Bonnier a l'idée de faire varier artificiellement ces facteurs plutôt que d'étudier les effets de ces variations sur le terrain. Il est ainsi à l'origine d'une ligne expérimentale en écologie.

Naissance de l'écologie

Au cours de la même période, Karl August Möbius, spécialiste de biologie marine à l'université de Kiel, étudiant les causes de l'épuisement des bancs d'huîtres du Schlesvig-Holstein, est conduit à considérer les interrelations entre tous les organismes marins concernés. Il invente alors le mot « biocoenose » (du grec *bios*, vie, et *koïnos*, en commun) : « La science ne possédait pas, jusqu'à présent, de mot par lequel [...] une communauté d'êtres vivants pût être désignée [...] je propose le mot Biocoenose pour une telle communauté » (*Die Auster und die Austernwirtschaft*, 1877, Berlin).

Les origines de l'écologie sont donc pluridisciplinaires : dans la seconde partie du XIX^e s., l'ensemble des travaux dont il vient d'être question dessine un corpus en perpétuelle transformation dans lequel l'accent est mis de plus en plus fortement sur les modes de vie des vivants plutôt que sur leur répartition géographique. En 1895, le botaniste danois Eugenius Warming (1841-1924) publie à Copenhague un ouvrage qui marque le point culminant de ce processus : *Plantesamfund (Communautés végétales)*. Ce livre est immédiatement traduit en langue allemande (*Lehrbuch der ökologischen Pflanzengeographie*, Berlin, 1896). Warming y montre « [...] comment les plantes et les communautés végétales ajustent leurs formes et leurs comportements aux facteurs [...] tels que la quantité de chaleur, de lumière, de nourriture et d'eau qui se trouvent disponibles ».

Ainsi, la manière dont les plantes adaptées sont structurellement marquées par leur environnement, puis l'étude des interrelations des communautés végétales définies sur la base de leurs modes de vie, représentent le contenu central de l'ouvrage. Le botaniste strasbourgeois Andreas Franz Wilhelm Schimper (1856-1901) publie trois ans plus tard un ouvrage assez comparable dans son objet mais focalisé sur les rapports entre les structures fines des plantes et les facteurs de leurs environnements (*Pflanzengeographie auf physiologischer Grundlage*, Jena, G. Fischer, 1898). Cette recherche inspira de nombreux travaux d'écologie et de

physiologie végétale, notamment aux États-Unis. Les scientifiques et les historiens des sciences s'accordent à voir dans les œuvres de Warming et Schimper la naissance d'une écologie scientifique à part entière.

Le darwinisme, entendu comme théorie « écologique » de l'adaptation, a souvent été présenté – dans l'histoire anglo-saxonne des sciences notamment – comme le creuset historique de l'écologie scientifique. Ce rapport, logique, est installé de manière récurrente donc historiquement contestable. En effet, il convient d'observer que les problématiques transformiste et écologique sont à l'origine radicalement différentes : l'écologue saisit les adaptations comme des données statiques, non comme des processus adaptatifs. C'est vraisemblablement pourquoi les travaux de Darwin (1809-1882) ont été si peu utilisés dans la littérature écologique du XIX^e s. Le fait que le mot « oekologie » ait été inventé par Ernst Haeckel, ardent zélateur du darwinisme, ne contredit pas ce point de vue : la tradition de l'étude des rapports entre les vivants et leur environnement remonte au moins à Aristote ; il eût été surprenant qu'elle n'ait pas été baptisée au cours du processus de restructuration de la biologie consécutive à la révolution darwinienne. Il convient également de noter que la plupart des pré-écologues puis des écologues jusqu'à la Seconde Guerre mondiale défendent sans état d'âme la théorie lamarckienne de l'adaptation directe puisqu'elle est également présente chez Darwin. Ce fut le cas de Gaston Bonnier, d'Eugenius Warming et de l'un des écologues les plus importants du siècle, le Nord-Américain Frederic Edward Clements (1874-1945), qui se déclarait encore lamarckien en 1939.

L'écologie des successions végétales

Si la constitution de l'écologie fut une affaire européenne, son développement fut marqué par les travaux américains. L'essor des pratiques millénaires de « lutte biologique » – qui consistent à utiliser un vivant contre un autre vivant jugé nuisible – contribua à dessiner l'image de biocénoses structurées en réseaux de relations proies-prédateurs. En cette matière, la figure dominante au XIX^e s. est celle de Charles Valentine Riley (1843-1895) – déjà vainqueur, avec le botaniste montpelliérain Jules-Émile Planchon (1823-1888), du *Phylloxera* de la vigne au cours des années 1870. Riley jeta les bases scientifiques de la lutte biologique en triomphant notamment – en 1890 – de la cochenille australienne *Icerya purchasi* accidentellement introduite en Californie.

Le pionnier de l'écologie américaine est Henry Chandler Cowles (1869-1939). Jusqu'alors, les écologues « photographiaient » des situations. Cowles choisit d'étudier les dunes du lac Michigan et leur végétation. Comme ces formes topographiques et leur végétation sont instables, Cowles est amené à étudier les mouvements « successionnels » de la végétation. Son regard est devenu « cinématographique » : « L'écologie [...] étudie des dynamiques » (*The Ecological Relations*

of the Sand Dunes of Lake Michigan, Univ. of Chicago Press, 1899). Cette problématique novatrice caractérise l'écologie américaine jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. Charles Chase Adams (1873-1955), ancien étudiant de Cowles, décrit le va-et-vient successional des communautés biotiques nord-américaines lors des dernières glaciations et étudia les rapports entre le phénomène de l'érosion, la transformation des habitats et les successions de faunes.

C'est cependant Frederic Edward Clements (1874-1945), de l'université du Nebraska, puis du Minnesota et de la Carnegie Institution of Washington, qui illustra l'école américaine avec le plus d'éclat. Il est l'auteur de nombreux travaux sur les successions végétales et la théorie du *climax* – selon laquelle les successions culminent à un stade d'équilibre dynamique nommé « climax » (du grec *klimaktērikos*, « qui va par échelons ») et, toutes choses demeurant égales, tendent à y perdurer. Partant des problèmes rencontrés par les pionniers, Clements se pencha également sur les plantes indicatrices des qualités d'un sol pour l'agriculture. Ce souci pratique était déjà présent dans un manuel d'écologie qu'il publia en 1905 (*Research methods in ecology*, Nebraska, Lincoln) et dans lequel, rendant au passage hommage à Gaston Bonnier pour ses expérimentations sur le terrain, il décrivait un grand nombre d'instruments inventés pour mieux définir les facteurs de l'environnement. Il fut l'initiateur très controversé (cf. *infra*) de la pensée « organiciste » en écologie, selon laquelle les communautés végétales sont des organismes.

Structuration et taxinomie des communautés

Les mécanismes des fluctuations populationnelles dans le monde animal étaient encore très mal connus au commencement du XX^e s., même si ces questions avaient depuis toujours retenu l'attention des naturalistes. Leur élucidation et leur mathématisation marqua profondément l'écologie scientifique et fut décisive dans la constitution de la théorie des écosystèmes. Dès 1880, l'entomologiste de l'Illinois Stephen Alfred Forbes (1844-1930) avait évoqué l'idée de mécanismes d'équilibrage populationnels dans des communautés structurées par des chaînes alimentaires. L'idée de la structure pyramidale des populations d'une biocénose est vraisemblablement due au zoologiste Carl Gottfried Semper (1832-1893) : schématiquement, la base est constituée par les herbivores, les carnivores occupent les niveaux intermédiaires et le super-prédateur figure au sommet. Cette théorie apparaît pour la première fois en 1880 dans *Die natürlichen Existenzbedingungen der Thiere* (Leipzig). Elle fut approfondie et quantifiée par le zoologiste anglais Charles Sutherland Elton (1900-1991) dans son *Animal Ecology* (Londres, Sidgwick & Jackson, 1927) ; cet ouvrage contenait aussi une définition fonctionnelle de la « niche écologique » d'une population : le concept de « niche » – pris dans son sens architectural – renvoyait désormais

à un créneau de survie (la « profession » d'une espèce) et non plus à un habitat (l'« adresse » de cette espèce).

La croissance des populations avait été étudiée par le mathématicien bruxellois Pierre-François Verhulst (1804-1849). En 1838, il avait conçu une courbe en « S », tendant vers une limite supérieure puisque la croissance théoriquement exponentielle d'une population animale est graduellement ralentie par saturation de l'environnement. Partant des travaux de Verhulst, le physicien américain Alfred James Lotka (1880-1949) proposa en 1925 un système d'équations différentielles pour rendre compte des fluctuations périodiques de deux espèces dont l'une est prédatrice de l'autre. Ces travaux furent ultérieurement développés par le mathématicien italien Vito Volterra (1860-1940). Ils suscitérent de nombreuses vérifications expérimentales, qui furent principalement effectuées par le biologiste soviétique Georgii Frantsevitch Gause (1910-1986). L'ensemble contribua à l'approfondissement du savoir concernant la structuration trophique des biocénoses.

Parallèlement au développement des travaux qui viennent d'être évoqués, le problème de la nomenclature des communautés végétales s'est posé avec de plus en plus d'acuité au cours du XIX^e s. L'idée de définir des ensembles végétaux sur la base de leur composition floristique et non en fonction des facteurs de l'environnement fut à la base de l'édification de la « phytosociologie », l'étude taxinomique des communautés végétales. La méthode sociologique permet notamment de découvrir des adaptations fines que la méthode traditionnelle ne permettrait pas de déceler. Deux écoles s'affrontèrent en Europe : celle d'Uppsala et celle de « Zurich-Montpellier », plus appropriée à la végétation non scandinave. La phytosociologie zuricho-montpelliéraine, élaborée par deux botanistes suisses, Ernst Furrer et Josias Braun-Blanquet (1883-1980) qui travaillaient alors à Montpellier, s'imposa finalement. Les recherches en sociologie végétale contribuèrent à la constitution des conceptions actuelles des communautés, aujourd'hui pensées comme systèmes discrets et structurés, et qui supplantèrent les conceptions organicistes encore dominantes dans les années 1920.

De l'idéologie organiciste à la théorie des écosystèmes

L'idéologie organiciste, introduite en écologie par F.E. Clements, posa d'importants problèmes dès les origines : il apparut rapidement que les communautés « biotiques » (végétales et animales) ne sauraient être considérées à strictement parler comme des organismes. Depuis 1905, le botaniste anglais Arthur Georges Tansley (1871-1955) défendait l'idée selon laquelle ce n'est pas parce qu'il peut être fécond de tenir les communautés pour des organismes qu'il s'ensuit qu'elles sont des organismes. Il proposa donc en 1935 le concept d'« écosystème » pour destituer l'organicisme tout en conservant son intérêt heuris-

tique. L'écosystème est donc défini par l'ensemble structuré formé par la biocénose sur son biotope (« The use and abuse of vegetational concepts and terms », *Ecology*, 16, 3).

Il restait à comprendre comment fonctionnent les écosystèmes, et notamment pourquoi, toutes conditions demeurant égales, les écosystèmes oscillent en équilibre dynamique autour du climat. Le limnologue américain Chancey Juday (1871-1944) venait de mettre en évidence le rôle fondamental de l'apport d'énergie solaire dans la production primaire végétale d'un lac (« Annual energy budget of an inland lake », *Ecology*, 21, 4, 1940), lorsqu'un étudiant nommé Raymond Laurel Lindeman (1916-1942) publia un article aujourd'hui considéré comme fondateur de la théorie moderne des écosystèmes. Lindeman montrait dans cet article historique que, pour tout écosystème, « le processus fondamental de la dynamique des relations trophiques est le transfert d'énergie d'une partie de l'écosystème à une autre » (« The trophic-dynamic aspect of ecology », *Ecology*, 23, 4).

Lindeman avait été l'étudiant de George Evelyn Hutchinson (1903-1991), lequel avait conçu l'idée profonde selon laquelle les écosystèmes se comportent comme des organismes vivants sur le plan thermodynamique. Hutchinson était zoologiste de formation. Il se tourna vers la biogéochimie, dans la problématique du savant soviétique Vladimir Vernadsky (1863-1945) dont le nom est associé au concept de « biosphère », et étudia les effets des activités humaines sur les cycles du carbone et du phosphore. Il proposa une formalisation mathématique de la théorie des niches écologiques et travailla sur les aspects théoriques de la biodiversité. Il joua aussi un rôle important dans la diffusion de la pensée de Lindeman, prématurément disparu l'année de la publication de son article fondamental et dont les travaux ne s'imposèrent pas immédiatement à la communauté scientifique : en 1951 encore, Warder Clyde Allee (1885-1955) et K.P. Schmidt avaient réédité leur *Ecological animal geography* (New York, John Wiley & Sons, Inc.) sans que les concepts d'« écosystème » ou d'« autotrophie » ne figurent dans l'index. Ce sont d'ailleurs deux anciens étudiants d'Hutchinson, Eugen Pleasants Odum et Howard Tresor Odum qui imposèrent la pensée de Lindeman, en focalisant leur manuel universitaire *Fundamentals of ecology* (W.B. Saunders Co, 1953, 1959, 1971) sur le concept d'écosystème.

Les frères Odum marquèrent profondément l'écologie scientifique en décrivant le fonctionnement des écosystèmes en termes de flux d'énergie et de matière. Ils effectuèrent également des recherches en radioécologie sur l'atoll d'Eniwetok – site des expériences thermonucléaires américaines – et au laboratoire national d'Oak Ridge (Tennessee). Leur pensée sonna le glas de l'organicisme et de son vitalisme larvé en écologie. Elle contribua, dans la tradition épistémologique de la mécanisation du vivant, au succès de l'usage du langage de la physique en biologie.

L'histoire récente

Toutefois, dans les années 1950, de nombreuses zones d'ombre subsistaient en biocénotique, notamment au plan des causes réelles des fluctuations populationnelles et des mécanismes d'occupation des niches. Dans l'après-guerre, l'écologie des populations fut d'abord illustrée par l'ornithologue anglais David Lambert Lack (1910-1973) qui avança la thèse d'une possible autorégulation des populations liée à leur densité. Puis Robert Helmer MacArthur (1930-1972) – ancien étudiant d'Hutchinson, mathématicien, professeur de biologie à l'université de Princeton – et l'entomologiste Edward O. Wilson présentèrent en 1967 leur *Théorie de la biogéographie insulaire* (*The Theory of Insular Biogeography*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1967). Cette synthèse tenait compte du fait que le taux réel de fécondité d'une population est toujours inférieur à son taux théorique, ainsi que l'avait montré David Lack. La biogéographie insulaire de MacArthur-Wilson éclaircit les rapports entre la superficie des îles, leur position par rapport au continent, et leur diversité biologique. Elle modifia en profondeur le regard des écologues en universalisant la notion d'île : un ruisseau, une caverne, une forêt galerie, une mare intertidale, etc., présentent un caractère insulaire au sens écologique du terme.

L'une des orientations récentes des recherches en écologie, inspirée par les travaux du physicien-théoricien Robert May, est l'étude des phénomènes chaotiques, dans lesquels on constate que le désordre observé dans les fluctuations populationnelles – comme des effets apparemment disproportionnés par rapport aux causes – est en vérité inhérent aux systèmes considérés.

L'aube du XXI^e s. voit le développement d'une écologie scientifique « globale », dans la tradition des recherches sur les cycles biogéochimiques de la biosphère effectuées au cours des années 1920 par Vladimir Vernadsky puis, à partir des années 1940, par G.E. Hutchinson. Les activités humaines sont causes de changements globaux dans les équilibres écosystémiques de la planète : dysfonctionnement de l'« effet de serre », accroissement des pollutions, déficit saisonnier de la couche d'ozone, accroissement des auroles de désertification, recul des forêts ombrophiles, diminution de la biodiversité, etc. Ce sombre tableau est le plus souvent mis en relation avec les dégradations actuellement liées aux activités productrices dans les pays dits « avancés » mais aussi au naufrage économique, social, culturel – donc écologique – de nombreux pays dits « en voie de développement » ; et l'écologie scientifique, désormais située à la confluence tumultueuse de la nature et des sociétés humaines, continue de se chercher entre histoire naturelle, théorie des écosystèmes, mathématiques du chaos, et dégradation des rapports sociaux à l'échelle de la planète.

► ACOT P. dir., *European Origins of Scientific Ecology (1800-1901)*, CDROM, Amsterdam, Gordon & Breach, Éditions des Archives Contemporaines, 2 vol., 1998 ; « L'écologie et l'écologie », *Raison présente*, 106, 27-36, 1993 ; *Histoire de l'écologie*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1994. – BOWLER P.J., *The Fontana History of The Environmental Sciences*, Londres, Fontana Press, 1992. – CITTADINO E., *Nature as the Laboratory : Darwinian Plant Ecology in the German Empire, 1880-1900*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1990. – DELÉAGE J.-P., *Histoire de l'écologie, une science de l'homme et de la nature*, Paris, La Découverte, 1991. – DROUIN J.-M., *Réinventer la nature, l'écologie et son histoire*, préface M. Serres, Paris, Desclée de Brouwer, 1991 ; « Histoire et écologie végétale : les origines du concept de succession », *Écologie*, 25, 1994, 3 : 147-155. – GHILAROV A.M., « Vernadsky's Biosphere Concept : An Historical Perspective », *The Quarterly Review of Biology*, 70, 1995, 2 : 193-203. – GOULEY F.B., *A History of the Ecosystem Concept in Ecology*, Newhaven/Londres, Yale Univ. Press, 1993. – KINGSLAND S.E., *Modeling Nature, Episodes in the History of Population Ecology*, Chicago/Londres, Univ. of Chicago Press, 1985. – MATAGNE P., *Les mécanismes de diffusion de l'écologie en France de la Révolution française à la Première Guerre mondiale*, Villeneuve d'Ascq, Presses Univ. du Septentrion, 1997. – MCINTOSH R.P., *The Background of Ecology*, Cambridge/New York/Londres, Cambridge Univ. Press, 1985. – MITMAN G., *The State of Nature, Ecology, Community and American Social Thought, 1900-1950*, Chicago/Londres, Univ. of Chicago Press, 1992. – POLUNIN N. & GRINEVALD J., « Vernadsky and Biospherical Ecology », *Environmental Conservation*, 15, 1988. – REAL L.A. & BROWN J.H. dir., *Foundations of Ecology : Classic Papers with Commentaries*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1991. – VORZIMMER P., « Darwin's ecology and its influence upon his theory », *Isis*, 56, 1965, 2 : 148-155.

Pascal ACOT

→ Biogéographie ; Classification [BOTANIQUE] ; Darwinisme ; Environnement ; Précaution ; Taxinomie ; Vivant (Théorie du).

ÉCOLOGIE COMPORTEMENTALE

Les sciences humaines ne sont pas seules à conforter leurs grands programmes théoriques en proposant des aménagements épistémologiques du paysage disciplinaire environnant. Le biologiste Ernst Haeckel, prosélyte enthousiaste du darwinisme et théoricien éminent du « darwinisme social », avait ainsi inventé la chorologie et « l'oecologie » pour soutenir sa vision d'ensemble de l'évolution des organismes. Dans une perspective similaire, la « nouvelle synthèse » sociobiologique (E.O. Wilson, *Sociobiology : the New Synthesis*, Cambridge [Mass.], Belknap Press of Harvard Univ. Press, 1975) commençait par prophétiser une simplification des rapports interdisciplinaires à l'horizon de l'an 2000. L'éthologie, selon Edward O. Wilson, devait être « cannibalisée » à court terme par l'essor de deux champs scientifiques : d'un côté, par la neurophysiologie et la physiologie sensorielle (elles-mêmes sous-tendues par la biologie cellulaire), et, de l'autre côté, grâce à l'influence croissante de la biologie des populations, par la sociobiologie accompagnée de l'écologie comportementale (*behavioral*

ecology). Cette prévision n'est certes pas passée inaperçue, mais elle a soulevé d'autant moins d'objections que les éthologistes (dont Wilson feignait de craindre un sentiment d'offense) ont été les premiers à l'applaudir. Dans les années qui suivirent, l'écologie comportementale fut ainsi présentée comme un domaine voisin de la sociobiologie (la naissance, peu de temps après la sortie du livre de Wilson, de la revue *Behavioral Ecology and Sociobiology* en témoigne). Mieux encore, elle conquiert l'image d'un programme de recherches à la fois plus prometteur à longue échéance et plus « sage » (idéologiquement parlant) que la sociobiologie, comme si elle était destinée à dévorer à son tour cette dernière.

De fait, alors que la nature de la sociobiologie – « théorie ou discipline ? » – a été âprement discutée, l'existence de l'écologie comportementale a été soutenue sans coup férir. Or, quand on y regarde de plus près, cette vision pédagogique était surprenante à plus d'un titre. D'abord, la notion de sociobiologie fut utilisée bien avant 1975 pour désigner l'étude des comportements sociaux : s'il s'agissait d'une discipline authentique, il y aurait donc quelque abus à décréter que Wilson en serait le créateur, comme le font certains porte-parole français (P. Jaisson, *La Fourmi et le Sociobiologiste*, Paris, O. Jacob, 1993, p. 17). À moins que cette oblitération de l'éthologie classique (K. Lorenz, N. Tinbergen, P.-P. Grassé, etc.) n'émane d'un désir de cacher que celle-ci est victime d'un cannibalisme perpétré par... l'un de ses sous-ensembles.

Mais le plus étrange est ailleurs : si Wilson n'a pas inventé la sociobiologie, on voit mal qui d'autre que lui-même peut revendiquer la paternité de l'écologie comportementale. Dans le schéma qu'il propose au chapitre 1, le lecteur découvre que ce territoire grandit en compagnie de la sociobiologie depuis le milieu du siècle. Sauf qu'aucun chercheur n'a classé son activité sous cette étiquette avant la publication de « la nouvelle synthèse » et que les index thématiques des ouvrages d'écologie ne mentionnent jamais l'expression. Aujourd'hui encore, celle-ci ne figure que dans des écrits explicitement liés à la sociobiologie et non dans des textes d'écologie générale.

Bref, Wilson a non seulement inventé l'extériorité de la sociobiologie par rapport à l'éthologie mais il a, tout aussi arbitrairement, proclamé l'inclusion de la mystérieuse écologie comportementale dans la science des relations entre les organismes et leur environnement, jadis pressentie par Haeckel. Ce dernier avait au moins le mérite de proclamer ses néologismes et de ne pas dissimuler ses positions épistémologiques sous la forme de constats fantasmatiques. Pour le reste, le maître allemand du « darwinisme social » et son émule anglo-saxon partagent manifestement la conviction que l'utilisation du darwinisme à des fins sociologiques appelle une préparation minutieuse des champs disciplinaires concernés, quitte à « déduire » la nécessité de certains districts intermédiaires. L'activité n'est pas intrinsèquement condamnable : « l'écologie » a indubitablement montré que sa raison d'être dépassait le

service d'un quelconque évolutionnisme. Et, par-delà le caractère frauduleux de l'énoncé descriptif, l'intuition de Wilson n'a rien d'incongru ni de superficiel : elle éclaire parfaitement la stratégie réelle de la sociobiologie, avec les raisons de son efficacité institutionnelle.

La zoologie moderne a progressivement dessiné un triangle thématique qui constitue sa table d'orientation méthodologique : l'écologie, la génétique et l'éthologie en sont les sommets. Cependant, à l'encontre des deux premières disciplines qui ont grandi dès le début du xx^e s. sous l'autorité directe du néodarwinisme et qui ont établi entre elles une connexion durable (ne serait-ce qu'en participant à l'élaboration de la théorie synthétique), l'éthologie (qui se développe à partir des années 1930 comme une « psychologie comparée ») est demeurée assez indépendante de ce paradigme : hors d'une approbation de principe, l'école objectiviste de Lorenz et Tinbergen a entretenu avec lui des relations diffuses. Toutefois, cette observation vaut surtout pour l'éthologie des vertébrés. En entomologie, la communication interdisciplinaire a progressé selon un autre rythme, impliquant plus fermement l'analyse des comportements dans les problématiques de l'écologie et de la génétique, donc dans les visées darwinistes. Les théoriciens majeurs de la sociobiologie contemporaine, Wilson en tête, ont souvent fait leurs premières armes sur les insectes. D'une certaine manière, le coup de force épistémologique de cet auteur exprime ainsi une volonté qu'il partage avec de nombreux spécialistes des arthropodes, et qui sera ensuite approuvée par toute la zoologie : la programmation des recherches éthologiques dans le cadre des questions privilégiées par le néodarwinisme.

Ceci étant, la voie choisie est immédiatement inféodée à une inspiration théorique très particulière, voire étriquée : les conjectures génétiques sur la diffusion de « l'altruisme ». Écologie comportementale et sociobiologie tendent à insister sur les relations entre individus appartenant à la même espèce, les séparant d'emblée des autres aspects de l'écologie. Or, même si l'entomologie est un carrefour interdisciplinaire incomparable, l'éthologie est investie par divers projets néodarwiniens durant les décennies 60 et 70 qui n'établissent pas forcément une coupure aussi tranchée entre l'intraspécifique et l'interspécifique. Ces promesses ont été stoppées net : la socio-écologie animale et l'écoéthologie désignaient des réseaux de recherche largement reconnus. À cet égard, il faut donc tenir compte du fait que le succès de l'entreprise de Wilson n'a pas seulement engendré les territoires dont il a inventé ou déformé l'existence : il a également ruiné des territoires plus amples dont l'unique inconvénient était de ne pas se placer d'emblée sous l'autorité de la génétique des populations. Aujourd'hui comme hier, le « darwinisme social » détourne le darwinisme en tronquant discrètement ses champs d'investigation pour imposer son point de vue comme une évidence inexorable.

► GAUTIER J.-Y., LEFEUVRE J.-C., RICHARD G. & TREHEN P., *Ecoéthologie*, Paris, Masson, 1978. – JAISON P., *La Fourmi et le Sociobiologiste*, Paris, O. Jacob, 1993. – WILSON E.O., *Sociobiology: the New Synthesis*, Cambridge (MA), Belknap Press of Harvard Univ. Press, 1975.

Georges GUILLE-ESCURÉ

→ Darwinisme ; Sociobiologie.

ÉCONOMIE THÉORIQUE

Répandus dans les affaires et l'administration, où ils sont depuis longtemps investis des plus hautes charges, sollicités par la presse, bien établis désormais dans l'enseignement général, les économistes ne laissent pas leur époque indifférente. Leurs pronostics régulièrement démentis et leurs aigres dissensions ne plaident pas en faveur du sérieux de leur discipline, et cependant, les témoins les plus ironiques de leurs dérives continuent de les consulter, au point de préférer souvent leurs diagnostics et leurs conseils à ceux des juristes, sociologues ou philosophes. D'où vient cette curiosité maintenue malgré des résultats pratiques décevants ? On peut chercher une explication – d'autres seraient concevables – dans une particularité de leur travail : il repose sur une infrastructure *théorique* sans équivalent dans les autres sciences sociales. Aux *doctrines* des juristes, aux *conceptions* des sociologues, aux *systèmes* des philosophes, il manque les caractères qu'on associe d'ordinaire aux théories scientifiques : la compression des concepts et des principes directeurs, formulés au niveau d'abstraction le plus élevé ; l'organisation hiérarchique, idéalement déductive, des énoncés généraux ; un appareil mathématique élaboré, suffisamment autonome pour qu'il entretienne son propre développement ; des applications perçues comme telles et réparties sur des domaines variés.

Tous ces traits se rencontrent dans la partie de la discipline que les Anglo-Saxons nomment *economic theory* et la rapprochent, du moins formellement, des théories physiques sur lesquelles s'appuie le travail des ingénieurs. La flatteuse analogie explique pour partie les attentes et les déceptions renouvelées du public ; les économistes ne se privent pas d'en tirer parti lorsqu'ils défendent leurs projets de réforme sociale et même d'obscur intérêt de carrière. Ne serait-ce que pour ces raisons, l'économie doit solliciter la vigilance critique de l'épistémologue. Mais il faut savoir aussi renverser la perspective et mettre la philosophie des sciences au défi de l'objet qu'elle se donne. Ne découvre alors que les travaux des économistes résistent à ses catégorisations préalables du *scientifique* et du *non-scientifique*, et que ses divisions convenues, comme celles des lois et des autres généralités ou des différents modèles d'explication, ne lui conviennent pas mieux. Granger, Rosenberg, Hausman, ou l'auteur même de cette notice, qui envisagent constructivement le projet théorique de l'économie, ont dû réexaminer, le plus souvent

pour les mettre en cause, les bases néo-positivistes et poppériennes de la philosophie des sciences contemporaine. Après ce débroussaillage, ils ont entrepris de conceptualiser directement leur objet. Bien que ces travaux restent partiels et parfois trop exclusivement descriptifs, ils semblent plus convaincants déjà que la projection d'idées toutes faites sur la science, pour exalter ou dénoncer les économistes, ce qui reste le procédé commun de la spécialité qu'on appelle « méthodologie économique ».

La naissance d'une économie politique autonome n'aura pas coïncidé avec l'apparition de la première théorie économique digne de ce nom. Si l'on circonscrit la notion de théorie comme on l'a fait plus haut, Smith, et même Quesnay, ne s'y conforment pas, et il faut patienter jusqu'au Ricardo des *Principles of Political Economy* (1817). Encore l'ouvrage vérifie-t-il imparfaitement les conditions posées, et il ignore même carrément celle de la formalisation mathématique : Ricardo se contente de calculer numériquement des exemples illustratifs, à la manière du comptable qu'il était tout d'abord. Il reste que la structure logique de ses raisonnements est admirablement claire et qu'on a pu les formaliser aisément par la suite. Comme celle de Marx, son analyse de la valeur-travail se prête à l'algèbre matricielle, et ses lois dynamiques de la répartition se décrivent par des équations différentielles – avec Sraffa et ses élèves, un courant néoricardien s'est d'ailleurs emparé de l'une et des autres en plein xx^e s. Il paraîtra surprenant que cet échantillon de théorie, unique et rudimentaire encore, ait aussitôt nourri le commentaire épistémologique. Or dès la première moitié du xix^e s., Senior et Mill proclamèrent l'avènement d'une science nouvelle dotée d'un objet fixe – la richesse, considérée dans ses lois de production, de circulation et de répartition – ainsi que d'une méthode définitive – avec des nuances, celle que suivaient spontanément les *Principes*. L'économie politique s'appuierait sur trois prémisses fondamentales : la *loi de la population croissante*, venue de Malthus, la *loi des rendements agricoles décroissants*, qui est une adjonction décisive de Ricardo, enfin, plus vaguement formulée, mais logiquement nécessaire, la loi voulant que *les entrepreneurs fassent preuve d'égoïsme rationnel*. Augmentées, s'il le faut, d'hypothèses factuelles particulières, les trois propositions engendreraient déductivement la science de la richesse dans sa totalité. Pour vérifier cette thèse, les ricardiens s'attachèrent à redémontrer pas à pas les tendances dynamiques de la répartition telles que les *Principes* les avaient formulées : rendues en valeur-travail, la part des travailleurs augmenterait et celle des fermiers baisserait, tandis que celle des propriétaires fonciers augmenterait massivement ; rendues en blé, la part des travailleurs stagnerait, celle des fermiers baisserait, et celle des propriétaires augmenterait encore. En l'espèce, une déduction correcte ne demande pas beaucoup plus que les trois affirmations précédentes. Mais d'autres résultats notables, comme la loi des avantages comparatifs, que les *Principes* démontrent au chapitre

de commerce extérieur, imposent d'élargir le stock des postulats généraux, et non pas seulement particulières ; or les épistémologues ricardiens, sinon Ricardo lui-même, étaient réticents à franchir ce pas.

S'ils prétendaient se satisfaire d'une base aussi étroite, c'est qu'ils prêtaient aux trois lois des qualités remarquables dont les hypothèses supplémentaires n'auraient pas bénéficié. Elles leur semblaient décrire des vérités universelles, soit de la technologie productive (loi des rendements), soit de la physiologie et de la psychologie humaines (lois de la population et de l'égoïsme rationnel), vérités que tout observateur réfléchi devrait inmanquablement reconnaître comme telles. Pour certains ricardiens, les lois s'éprouvaient dans l'éblouissement de la certitude immédiate ; pour d'autres, elles demandaient un effort préalable d'induction ; mais tous les désignaient comme premières dans l'ordre spécial de la connaissance économique. (Une telle affirmation s'avère en effet compatible avec la thèse voulant que la loi des rendements décroissants trouve sa base inductive en agronomie : les économistes tiraient profit d'une découverte réalisée dans une autre partie du savoir.) Universalité, vérité, certitude, caractère objectivement premier — on retrouve la plupart des traits qu'Aristote avait rassemblés autour de l'idée des « principes de la démonstration » (*Seconds Analytiques*, I, 1-10). Que les principes des anglais relèvent d'une interprétation empirique exclusivement, cela reste compatible avec la thèse que l'on défend — une conception passéiste de la science a régné sur les premières théories économiques. L'interprétation rationaliste forme l'autre voie possible de la même influence : elle apparaîtra plus tard chez les autrichiens, qui la mettront au service de théories nouvelles.

On a souvent décrit, sans parvenir à se l'expliquer tout à fait, l'effacement que les idées ricardiennes ont subi dès le courant du XIX^e s. La cause immédiate de l'échec est en tout cas facile à repérer : elle tient à la loi malthusienne de la population, que les classiques regardaient déjà comme plus délicate que les deux autres, et que leurs successeurs finirent par rejeter sans appel. La loi tombait sous une alternative redoutable : empiriquement fautive dès qu'elle recevait une expression précise, inadmissible aussi longtemps qu'elle n'en recevait pas. Le principe de l'égoïsme rationnel nous paraît aujourd'hui à peine moins embrouillé, et la même alternative aurait pu lui être fatale ; mais les économistes du XIX^e et du XX^e s. surent le ramener graduellement à un principe abstrait d'optimisation, et il s'est transmis sous cette forme à la théorie contemporaine. Quant à la loi des rendements décroissants, qui constituait l'énoncé le plus univoque de l'économie classique, elle dessinait par avance le modèle théorique de son abandon, finalement consommé par la « révolution marginaliste ».

L'historiographie traditionnelle décrit la naissance du marginalisme comme un cas de découverte simultanée, d'autant plus saisissante qu'elle affecte les trois principaux foyers scientifiques de l'époque. L'accord spontané de Jevons (*Theory of Political Economy*,

1871), Menger (*Grundsätze der Volkswirtschaftslehre*, 1871) et Walras (*Éléments d'économie politique pure*, 1874) témoignerait pour leurs théories, de même que les dissensions parmi les disciples de Malthus avaient parlé contre la sienne. Les historiens ont fini par nier non seulement la simultanéité des découvertes, mais leur authenticité même. L'évolution marginaliste, comme il faudrait dire, passe assurément par les fondateurs, mais les précède et les inspire, et elle n'aboutit pas non plus chez eux : ni Jevons, ni Menger, ni même Walras, ne poussèrent bien loin leurs idées. On peut en dire autant de leurs successeurs immédiats, Edgeworth (1881), Marshall (1890), Fisher (1892) et Pareto (1909), et il faut attendre l'économie néo-classique contemporaine pour que le marginalisme soit proprement systématisé : l'effort collectif n'aura pas réclamé moins d'un siècle, ce qui surprend les historiens des sciences, accoutumés qu'ils sont au rythme plus vigoureux de la physique. Que l'on songe à la mécanique quantique et la théorie de la relativité, qui ont trouvé leur assiette au bout de quelques décennies seulement.

On peut isoler dans le marginalisme quatre idées directrices, dont les trois premières, mais non la quatrième, mobilisent le concept technique de *marge* (qui signifie la dernière unité produite, consommée ou distribuée). La première de ces idées, que Marshall illustre le mieux, traduit la continuité des théories économiques à travers le temps : le marginalisme transforme la loi classique des rendements décroissants, d'une part en la faisant porter sur la dernière unité plutôt que sur la moyenne, d'autre part et surtout, en l'étendant du contexte agricole initial à toute espèce de production. En regard de la loi des rendements marginaux décroissants, l'école installe, cette fois construite de toutes pièces, une loi des utilités marginales décroissantes. Par là, elle explique la demande, dont les économistes précédents, et même Cournot, n'avaient presque rien dit — c'est le deuxième apport du marginalisme. Après avoir établi l'équation des échanges — le rapport d'échange entre deux marchandises est égal au rapport des satisfactions marginales fournies par les quantités échangées —, Jevons résout le fameux « paradoxe de la valeur », dans lequel les classiques et Marx s'étaient embarrassés. Comment le diamant qui ne présente pas d'utilité apparente peut-il valoir plus que l'eau, qui est nécessaire à la vie ? L'équation des échanges, combinée à la propriété des utilités marginales décroissantes, fournit une réponse : c'est la faible quantité de diamants par rapport à la quantité d'eau disponible qui explique la différence de leurs prix. D'où il résulte que l'utilité, au sens vulgaire du mot, ne fait pas le tout de la valeur économique : il faut compter avec ce que Walras nomme la *rareté*. Suivant la troisième idée directrice, les quantités distribuées, tout comme les quantités vendues ou achetées, s'expliqueraient par le raisonnement à la marge. Walras substitue le concept de *facteur de production* aux catégories descriptives des classiques — travail, capital et terre — mais il faut attendre des auteurs plus tardifs, Wicksteed et Clark, pour que la théorie marginaliste de la répartition prenne son essor.

Elle repose sur une affirmation qui décalque l'équation des échanges : la rémunération marginale des facteurs est égale à leur productivité marginale. Au demeurant, le marginalisme ne s'imposera jamais en matière de répartition comme il s'était imposé en matière de demande et de production. Le principe de la rémunération à la marge reste une pomme de discorde parmi les économistes du XX^e s., quand bien même ils s'accommoderaient des deux idées précédentes, que les modèles optimisateurs ont raffinées mathématiquement. *Last but not least*, les concepts de marge ne faisaient pas le tout du marginalisme : celui d'équilibre n'importe pas moins à Walras, Marshall et Pareto. Les trois économistes imposent l'égalité globale des offres et des demandes aux agents multiples et indépendants qui formulent ces offres et ces demandes. Par un geste théorique digne de l'œuf de Colomb, ils instaurent la première représentation systémique des économies de marché. Les classiques possédaient le concept d'équilibre. S'ils n'en avaient rien tiré d'important, c'est qu'ils n'insistaient pas sur la dissimilarité des individus qu'ils ne parvenaient pas à décrire les demandes aussi précisément que les offres. Le même concept donne l'équilibre général chez Walras et Pareto, et l'équilibre partiel chez Marshall, suivant qu'il s'applique à l'économie entière ou à l'un de ses marchés particuliers, abstraction faite de ses relations avec les autres.

En poursuivant ces quatre idées directrices, les marginalistes construisirent des théories qui se conforment à l'objectif déjà fixé par les classiques : multiplier les déductions en s'aidant d'un lot restreint de prémisses générales. Le maintien du canon s'accompagne de perceptibles différences dans l'exécution. La réduction des prémisses apparaît finalement moindre que dans l'économie ricardienne. L'organisation hiérarchique des énoncés généraux ressort mieux, du moins chez Walras et Marshall, qui, pour la première fois, déduisent la loi de la demande (les quantités demandées diminuent quand les prix augmentent) au lieu de la prendre comme une donnée. Cette loi constitue le modèle, bientôt reproduit plus subtilement, des régularités que les économistes placent au niveau intermédiaire : elle sert d'explication commune tout en étant elle-même expliquée (à ce stade, par l'équation des échanges). Enfin, si l'on excepte Menger et les Autrichiens, l'appareil mathématique des économistes se développe. Il comporte désormais le calcul des dérivées, qui formalisent une notion de marge continue, et les opérations élémentaires sur les systèmes d'équations algébriques, par quoi se retraduit la notion complémentaire d'équilibre.

Si l'on reprend les quatre idées directrices, il apparaît que deux d'entre elles se cristallisent dans des énoncés, les deux lois marginalistes, mais qu'une autre se donne sous la forme d'une recommandation métathéorique : les énoncés qui emploient le concept d'équilibre ne sont pas fixés au départ. Comme l'analyse marginaliste de la répartition ne délimite pas tous ses moyens à l'avance, l'idée restante flotte entre les

deux genres. Le concept archaïque de principe s'applique encore aux deux lois marginalistes : on les prétend vraies, reconnues comme telles, quoique d'une évidence non immédiate, premières enfin dans l'ordre objectif du savoir. L'ordre en question est toujours défini par référence à la richesse et sa triple modalité — production, consommation, répartition. Mais le découpage matériel de l'objet cessera bientôt de satisfaire les économistes, et de même, ils prendront des libertés avec les lois marginalistes, par exemple en admettant que certaines firmes produisent avec des rendements croissants. Ils concevront finalement le marginalisme — et la théorie néo-classique à sa suite — comme un jeu d'inventions, qui, tout en respectant des règles, ne procède plus d'une liste de propositions premières. Il en est ainsi, déjà, chez J. Robinson (1933), qui traite les égalités marginales comme des « outils » ou des « recettes », et chez Robbins (1935), qui redéfinit la discipline entière par un principe purement méthodologique d'optimisation sous contraintes. L'idéal déductif va subsister jusqu'à nous, mais entre temps, la notion d'hypothèse aura chassé celle de principe ; les transitions décisives s'effectuent avec Hicks, Samuelson, Friedman et Koopmans. Au terme du processus, on ne saura plus très bien si les hypothèses sont factuelles, voire testables, ou si elles servent uniquement de point de départ conventionnel au raisonnement.

La branche autrichienne du marginalisme s'est singularisée par un attachement persistant à l'épistémologie antérieure. La théorie de Menger mobilise un concept assez flottant d'essence (*Wesen*), qui signifie à la fois l'identité stable des choses, la cause de leur existence, la source de leur intelligibilité. C'est en remontant à la nature ultime de l'échange, de la production et de la monnaie que l'Autrichien prétend découvrir les lois qui les règlent. Il obtient des « lois exactes » que les données empiriques ne confirment ni n'infirment ; car les phénomènes observables résultent aussi d'accidents, et la comparaison de ces phénomènes avec les lois servirait uniquement à manifester en quoi ils s'éloignent des essences. Menger incarne la branche rationaliste, précédemment annoncée, de la conception aristotélicienne de la « démonstration ». L'un de ses successeurs, von Mises (1933), abandonnera les « lois exactes » censément inscrites dans la nature des choses ; il parlera de « propositions a priori » qui s'imposeraient avec l'évidence des vérités logico-mathématiques. Von Mises déporte l'origine de la certitude vers le sujet, et sa perspective est indiscutablement plus moderne que celle de Menger ; elle continue d'ailleurs à solliciter les commentateurs d'aujourd'hui. Il reste qu'à un certain niveau de généralité, l'école autrichienne s'unifie. D'une part, elle continue à raisonner en termes de propositions premières ; d'autre part, ces propositions, elle les fonde sur les pouvoirs de la raison, et non pas sur les leçons de l'expérience. À l'opposé de ce courant, les marginalistes britanniques, Jevons, Edgeworth, Marshall, perdaient le point de vue rigoureusement empiriste des ricardiens. Ils se réclamaient de l'épistémologie de

Mill tout en rejetant son économie politique, jugée dépassée. C'est dans cette autre famille intellectuelle que la conception récente, tournée vers l'heuristique et ses préceptes, s'imposera par transformations progressives.

Décidément séduits par les images de rupture, les historiens évoquent volontiers la « révolution keynésienne » qui aurait suivi la parution, en 1936, de *The General Theory of Employment, Money and Interest*. Des convictions politiques et historiques animent l'œuvre de Keynes, comme, autrefois, celles de Ricardo, Marx, Walras et Pareto. L'économie de marché laissée à elle-même tend à maintenir au chômage une partie des travailleurs disponibles ; seule une intervention de l'État, par des canaux monétaires et, de préférence, budgétaires, peut réussir à la mener au plein-emploi des ressources ; ainsi, la Grande Dépression ne se résorbera ni par un surcroît de libéralisme, comme le recommandent les doctrinaires, ni par l'abandon au cycle naturel, comme le croient les fatalistes. En dépit de ce qu'on a pu dire, les positions de Keynes étaient répandues chez d'autres observateurs de l'époque. Son talent est d'avoir su les transmuier en affirmations théoriques ; il évoque en cela Ricardo, qui, seul parmi les défenseurs du libre-échange, parvint à relier ses convictions intimes à la dynamique abstraite du capitalisme. C'est grâce au concept nouveau d'équilibre de sous-emploi que l'interventionnisme trouve à se fonder dans l'économie savante.

Les raisonnements dont s'autorisent les libéraux prévoient qu'un choc extérieur subi par l'économie – par exemple un déplacement brutal de la demande comme à l'époque de la Grande Crise – sera finalement suivi d'un retour à l'équilibre sur l'ensemble des marchés. Ils supposent que les prix puissent varier à la hausse ou à la baisse d'une manière qui signale les raretés ; alors, sous un effet d'incitation, les ressources se déplacent d'un marché à l'autre jusqu'à s'employer pleinement. Quand on les précise tant soit peu, ces raisonnements ont besoin d'hypothèses discutables sur le sens et la vitesse des ajustements. On trouve donc aisément des raisons de rejeter la conclusion libérale, mais il semble que le rejet doive se produire en bloc, alors que Keynes adopte une attitude intermédiaire : il admet que les marchés se réajustent à l'exception de celui du travail. Voilà pourquoi la *Théorie générale* a séduit les économistes tout en les jetant dans l'embarras. Avec des références marshalliennes et non pas walrassiennes, sans recourir jamais aux mathématiques, le livre met en place un schéma de l'économie nationale fermée, dont devrait se déduire, si les objectifs étaient tenus, la possibilité du chômage à l'équilibre. En exploitant le mécanisme du multiplicateur, Keynes se libère de l'idée que l'investissement et l'épargne s'équilibrent comme les deux côtés d'un marché : leur égalité est en fait toujours réalisée à la fin de la période ; l'investissement crée l'épargne qui le finance après coup. Keynes introduit la monnaie dans son modèle en faisant, cette fois, comme s'il en existait un marché : l'offre est fixée par la Banque centrale, la demande

dépend, parmi d'autres variables, du revenu national. Les travaux de la « synthèse néo-classique » – par Hicks, Modigliani, Patinkin – ont établi que ce modèle keynésien n'engendrait le chômage que si les salaires étaient rigidelement fixés. Une fois l'hypothèse explicitée, la théorie keynésienne devient banale et ses implications politiques changent : si l'on veut lutter contre le chômage, il faut agir sur le coût du travail, au lieu d'augmenter la dépense publique ou la quantité de monnaie. D'autres économistes ont repris le flambeau keynésien ; ils ont montré comment les déséquilibres, au sens concret des écarts constatés entre l'offre et la demande, pouvaient se renforcer d'un marché à l'autre et former une configuration stationnaire, donc un équilibre dans un sens plus abstrait de ce terme. De pareils travaux préservent les intentions, sinon la lettre, de la *Théorie générale*.

Plutôt qu'au mystérieux concept d'équilibre de sous-emploi, l'importance de Keynes tient au genre de théorisation que lui-même et ses successeurs néo-classiques ont instaurée. C'est à juste titre qu'on leur attribue la naissance de la macro-économie comme sous-discipline distincte. Dans l'après-guerre, l'habitude s'est prise de la distinguer par les particularités suivantes. Elle s'occupe exclusivement d'agrégats : revenu national, emploi, investissement, épargne, consommation, dépense publique, masse monétaire, etc. Pour étudier les agrégats, elle tient compte des identités comptables qui les relient – par exemple, celle du revenu national avec le produit total – ainsi que de relations de comportement qu'elle définit spécialement – par exemple, l'offre de travail, les fonctions d'investissement ou de consommation. Ces relations, qui présupposent qu'on ait regroupé les agents et les quantités de manière cohérente, donnent lieu à des marchés fictifs – typiquement, ceux des biens, de la monnaie, du travail et des titres – dont la macro-économie analyse les interactions ; elle s'aide pour cela de différents concepts d'équilibre. Enfin, elle instaure une catégorie spéciale d'agents, représentant l'État ou ses administrations, et l'un des buts derniers de son travail consiste à mesurer l'influence de ces agents sur les agrégats, sachant qu'elle transitera par le jeu des marchés interdépendants. Toujours valable aujourd'hui, ce schéma général a dominé non seulement l'école keynésienne, mais les écoles monétaristes qui sont entrées en conflit avec elle, sous l'autorité de Friedman dans les années 1950 et 1960, puis de Lucas à partir des années 1970. Le schéma dirige d'autres constructions, en théorie de la croissance par exemple, qui échappent à la dichotomie du keynésianisme et du monétarisme.

Suivant la distinction routinière, la micro-économie s'oppose à la macro-économie parce qu'elle s'occupe d'agents et de quantités économiques individualisés, et comme elle s'interroge sur l'allocation de ces quantités entre ces agents, elle fait monter au premier plan les prix relatifs, que la définition des agrégats force à négliger. La théorie micro-économique par excellence est celle de l'équilibre général, héritée de Walras et de Pareto, mais développée plus systématiquement que la

leur en s'aidant d'outils mathématiques dont ils ne disposaient pas, comme l'analyse convexe et la topologie. L'un des premiers résultats de la théorie est, suivant Debreu (*Theory of Value*, 1957), qu'elle « explique les prix de toutes les marchandises et les comportements de tous les agents », c'est-à-dire leurs offres et leurs demandes ; les préférences des consommateurs et les ensembles de production jouent le rôle de concepts explicatifs. Le résultat prend la forme technique d'un *théorème d'existence* : sous des conditions qui évoquent les lois marginalistes anciennes, il existe un équilibre général de l'économie, c'est-à-dire un système de prix et d'allocations qui réalise la maximisation simultanée des objectifs individuels (préférences pour les consommateurs, profits pour les producteurs) et qui égalise les offres et les demandes sur chaque marché. Par lui-même, un théorème d'existence ne fait qu'établir la possibilité matérielle de l'équilibre général ; pour conclure à sa réalisation, il faudrait disposer de théorèmes d'unicité et de stabilité que la théorie n'est pas parvenue à établir. Si, donc, la démonstration procure une *explication*, ainsi que Debreu le prétend, ce ne peut être au sens ordinairement conféré à ce terme par la philosophie des sciences. Deux résultats supplémentaires, à certains égards plus frappants, permettent d'apprécier l'allocation qu'effectue l'équilibre général. On démontre qu'elle est optimale, en ce sens que nul agent ne pourrait voir s'accroître la réalisation de son objectif sans que diminue celle d'un autre agent, et l'on démontre, encore plus remarquablement, que toute allocation qui est optimale au dernier sens peut s'obtenir comme un équilibre général de l'économie (moyennant une redistribution adaptée des ressources initiales). Ces deux *théorèmes d'optimalité* manifestent la composante évaluative de la théorie, qu'un autre de ses représentants, Arrow, choisit de mettre en valeur comme Debreu l'a fait pour sa composante explicative. Si la théorie s'apparente finalement à une science, ce ne peut être que suivant un concept qui fasse droit à l'idée – problématique – de ce que Husserl et d'autres philosophes nomment la « science normative ». Les analogies seront à chercher du côté de l'éthique et de la logique formelles, et non plus de la physique.

En tirant dans le sens marshallien de l'équilibre partiel, la micro-économie a produit des constructions moins abstraites que celles de l'équilibre général, mais qui restent toujours fermement situées dans l'ordre théorique. Reprise de fond en comble par Hicks (1939) et Samuelson (1947), la théorie du consommateur qu'on enseigne aujourd'hui comporte une loi de la demande modifiée, qui tient compte de certaines inversions paradoxales (la demande croissant quelquefois avec le prix). La loi figure dans un groupe de propriétés qui ont l'intérêt décisif d'être observables en principe, parce qu'elles portent uniquement sur les prix, les revenus et les quantités physiques demandées. Non seulement ces propriétés se déduisent de la maximisation des préférences sous la contrainte de budget, mais prises ensemble, elles s'avèrent équivalentes à cette hypothèse. En démontrant une équivalence

mathématique nullement triviale et, d'ailleurs, longuement recherchée, les économistes pensent avoir atteint l'un des résultats importants de leur discipline. Il leur importait de circonscrire le contenu observable de la théorie du consommateur parce qu'ils sauraient ainsi comment la tester et, peut-être, la confirmer. Pour éclaircir un tel raisonnement métathéorique, il faudrait examiner leurs conceptions particulières du testable dans sa liaison avec l'observable, et de la confirmation dans sa liaison avec le test. L'examen révélerait un écart significatif avec les vulgates néo-positiviste et poppérienne, sur lesquelles on a d'abord tenté de rabattre les orientations des micro-économistes. La théorie de l'entreprise, que les traités présentent après celle du consommateur avant de les englober toutes deux dans le grand édifice de l'équilibre général, est encore plus décalée des indications courantes sur le test ; et l'on peut en dire autant des recherches, pour l'instant moins bien fixées, qui se poursuivent depuis trente ans sous l'intitulé de la « micro-économie de l'information ».

Les travaux lancés par Hicks et Samuelson dans les années 1930 et 1940, qui ont permis les synthèses d'aujourd'hui – micro-économiques aussi bien que macro-économiques – ne se réclamaient plus du marginalisme, mais du *néo-classicisme*. Ce glissement recèle plusieurs significations éclairantes. Il fait tout d'abord sentir que les égalités marginales ont changé de statut au sein de l'économie théorique. De fait, elles ont disparu au profit des *programmes d'optimisation sous contraintes*, dont elles forment seulement les conditions du premier ordre. Celles du second ordre, que les marginalistes tenaient confusément pour acquises en s'appuyant sur les lois de décroissance, demandent à être vérifiées non moins que les autres. Encore cette réinterprétation des égalités marginales, vues comme une réponse partielle à un problème abstrait d'optimisation, suppose-t-elle que la fonction-objectif de l'agent soit différenciable ; or les économistes s'affranchissent de plus en plus souvent de cette restriction mathématique insatisfaisante. Les théories néo-classiques débordent le marginalisme également par leur analyse de l'équilibre. L'égalité des offres et des demandes apparaît désormais comme la conséquence occasionnelle, suivant la représentation choisie du marché, d'une idée plus abstraite de *point stationnaire* : une fois réalisée, la configuration d'équilibre se répète à l'identique. On a signalé plus haut la dissociation conceptuelle sous son angle macro-économique et keynésien. Ainsi doté d'une extension qui le rapproche et l'éloigne à la fois des concepts homonymes pratiqués en physique, l'équilibre s'est enrichi de variations subtiles ; certaines font intervenir la validation des croyances, ou, si le temps s'introduit, des anticipations ; d'autres intègrent le point de vue stratégique des agents, c'est-à-dire, techniquement, les apports de la théorie des jeux. Mais le glissement de « marginaliste » à « néo-classique » ne se comprend pas seulement par des considérations négatives ; il traduit positivement le fait que le point de vue classique a

retrouvé une place dans l'économie contemporaine. De fait, celle-ci reprend certaines préoccupations des ricardiens, que les marginalistes avaient fini par occulter : la croissance et les cycles, en liaison avec les mouvements du progrès technique et de la population ; la répartition du revenu entre les catégories sociales et son interaction avec la dynamique capitaliste ; les avantages et les inconvénients du commerce extérieur ; l'union du politique et l'économie sous la bannière des groupes d'intérêt ou des mouvements de réforme.

► BÉRAUD A. & FACCARELLO G. (dir.), *Nouvelle histoire de la pensée économique*, La Découverte, t. 1, 1992, t. 2 et 3, 2000.
 - COLLISON A. D., BLACK R. D., COATS A. W. & GOODWIN C. D. W. (dir.), *The Marginal Revolution in Economics*, Duke University Press, 1973. - GRANGER G., *Méthodologie économique*, PUF, 1955. - HAUSMAN D., *The Inexact and Separate Science of Economics and Essays on Philosophy and Economic Methodology*, Cambridge Univ. Press, 1992.
 - JORLAND G., *Les paradoxes du capital*, Odile Jacob, 1995.
 - MARCHI N. DE (dir.), *The Popperian Legacy in Economics*, Cambridge Univ. Press, 1988. - MONGIN P., *Épistémologie économique*, PUF, à paraître. - O'BRIEN D. P., *The Classical Political Economists*, Oxford Univ. Press, 1975. - ROSENBERG A., *Microeconomic Laws*, Univ. of Pittsburgh Press, 1975 ; *Economics - Mathematical Politics or Science of Diminishing Returns ?*, Univ. of Chicago Press, 1992. - SCREPANTI E. & ZAMAGNI S., *An Outline of the History of the Economic Thought*, Clarendon, 1993. - VROEY M. DE, *Involuntary Unemployment*, Routledge, 2004.

Philippe MONGIN

→ Evolutionnisme ; Travail.

EINSTEIN Albert, 1879-1955

« Ce qui du point de vue physique est réel... est constitué de coïncidences spatio-temporelles. Et rien d'autre » (lettre à Ehrenfest du 26 décembre 1915). Cette citation d'Einstein, si elle n'est pas la plus connue, est en tout cas celle qui résume le mieux sa vie scientifique marquée par la recherche de ce qui est objectif, donc indépendant de l'observateur.

On sait qu'Einstein s'est fait connaître en publiant en 1905 (à 26 ans) cinq articles qui tous ont bouleversé la physique. Les plus importants sont : le premier, sur la quantification du rayonnement, qui est à l'origine de la théorie quantique ; l'article fondateur de la relativité restreinte qui unifie, sous la bannière du principe de relativité, la mécanique et l'électromagnétisme de Maxwell, article suivi d'un post-scriptum où est démontrée l'équivalence de la masse et de l'énergie ($E = mc^2$). Au fondement de ces trois articles se trouve l'idée de l'unification des lois de la physique qui sont toutes soumises au principe de relativité (stipulant qu'il existe des points de vue équivalents sur le monde, donc une description objective de la réalité). C'est en poursuivant et élargissant cette idée (relativité générale) qu'Einstein en est venu à la conclusion que seules sont réelles, indépendantes de l'observateur, les coïncidences dans un espace à quatre dimensions (espace et

temps). C'est cette idée de l'objectivité qui l'a conduit à refuser catégoriquement la théorie quantique probabiliste.

● *The Collected Papers*, Princeton Univ. Press (USA), en cours. - Œuvres choisies traduites en français, Paris, Le Seuil/CNRS, 1989.

► PAIS A., *Subtle is the Lord*, Oxford Univ. Press (USA), 1982.

Françoise BALIBAR

→ Big bang ; Champ ; Complémentarité ; Constantes physiques ; Controverse Bohr-Einstein ; Corps noir ; Corpuscule ; Déterminisme ; Élémentarité ; Equivalence (Principe d') ; Espace : la critique de Mach ; Espace-temps ; Éther ; Expansion de l'univers ; Gravitation ; Indiscernabilité ; Lumière ; Masse ; Matière (PHYSIQUE) ; Maxwell ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Michelson ; Mouvement ; Objectivité ; Principe anthropique ; Quantique ; Relativité ; Temps ; Thématas ; Trou noir ; Univers ; Virtuel.

ÉLECTROCHIMIE

Comment expliquer que les atomes soient liés entre eux ? Au début du XVIII^e s., la plupart des hommes de science convenaient que la matière est composée d'atomes, corpuscules ou particules dont il fallait bien admettre qu'ils s'accrochaient les uns aux autres. Newton ne partageait pas cette façon de voir qui pour lui ne réglait en rien le problème. Persuadé que des forces d'attraction puissantes s'exerçaient au niveau atomique, il estimait que la science devait s'attacher à les analyser. Mais alors que ses successeurs espéraient qu'un Newton de la chimie sortirait de leurs rangs, Lavoisier délaissa cette question qui à ses yeux relevait de la métaphysique.

Avec Benjamin Franklin, la physique expérimentale trouva dans l'électricité un de ses objets de prédilection et il devint à la mode d'envoyer des décharges électriques dans les corps, vivants ou morts. En 1791, Luigi Galvani publia à Bologne le compte rendu des expériences auxquelles il s'était livré sur les pattes de grenouille et qui l'amenaient à inférer la présence, chez les animaux, d'un déséquilibre électrique entre nerfs et muscles. Alessandro Volta, lui, restait convaincu que la matière animale réagissait simplement à la présence d'électricité produite par contact entre métaux différents ; en 1800, il adressa à la Royal Society de Londres un article en français où il décrivait la pile qu'il avait confectionnée en superposant des disques d'argent et de zinc séparés les uns des autres par du carton imbibé d'eau. Ce dispositif générait de l'électricité de façon continue.

En reprenant ses expériences et en les intégrant à leurs procédures de validation, William Nicholson et Anthony Carlisle découvrirent que lorsqu'ils fixaient un fil métallique à chaque extrémité de la pile et le plongeaient dans de l'eau ils obtenaient de l'hydrogène à un bout et de l'oxygène à l'autre, dans un rapport de deux pour un par volume. Répétée un peu partout en Europe, l'expérience convainquit la majorité

des chimistes que la présence d'électricité dans la pile était due à une réaction chimique et pas au seul contact entre les métaux, théorie dérangeante puisqu'elle postulait que quelque chose pût être produit à partir de rien.

Au demeurant, les effets de cette réaction étaient manifestement complexes puisqu'on observait des acides et des bases aux deux pôles. En 1806, Humphry Davy, membre de l'Institut royal des sciences, trouva enfin le temps de se pencher sur le problème. Persuadé que l'affinité chimique était simplement de nature électrique, il conduisit ses expériences jusqu'à obtenir le résultat qu'il souhaitait. La pile fabriquée sur ses instructions en agathe, en argent et en or lui permit d'abord de démontrer que les acides et les sels sont le produit de réactions secondaires avec de l'azote dissous, l'eau étant en fait décomposée par le courant électrique. L'année suivante, il utilisa un gigantesque accumulateur pour analyser de la potasse fondue dont il arriva à extraire l'extraordinaire substance du potassium qu'il comparait à l'eau régale, le solvant des alchimistes, puisque comme elle il flottait sur l'eau et s'enflammait brusquement en se décomposant ; Davy ne doutait cependant pas d'avoir affaire à un métal. La poursuite de ses travaux exigeant un accumulateur plus puissant, il lança un appel patriotique afin de réunir la somme nécessaire et continua à isoler d'autres métaux. Le prix de l'Académie des sciences de Paris vint récompenser ses travaux et, en 1813, il se rendit en France en compagnie de son assistant, Michael Faraday.

Davy privilégiait l'analyse qualitative et il laissa à Faraday (qui lui succéda à sa mort, en 1829) le soin de quantifier les lois de l'électrolyse ; notamment en établissant, en 1834, que le poids des différents métaux déposés par une même quantité d'électricité est proportionnel à leurs « équivalents électrochimiques ». Mais étant donné les incertitudes qui jusqu'en 1860 entourèrent la notion de poids (ou masse) atomique, cette précision n'apporta pas les résultats escomptés et Faraday se tourna vers l'électromagnétisme ; l'électrolyse servit néanmoins à extraire des métaux réfractaires, tel l'aluminium. Faraday apporta par ailleurs la preuve irréfutable que le courant galvanique d'une pile était en tout point identique à l'électricité produite par une machine à frottements, car l'intensité était plus forte et la différence de potentiel moindre.

Jacob Berzelius, qui travaillait en Suède indépendamment de Davy, aboutit en même temps que lui à une théorie et des expérimentations du même ordre. Mais c'était un chercheur beaucoup plus systématique, et un analyste patient : sa théorie sur le dualisme des combinaisons chimiques devait avoir une portée considérable. Elle pose que chaque élément se caractérise par un état électrique défini et que les combinaisons chimiques correspondent à la réunion de particules ou de groupes de particules de charge opposée. Berzelius distribuait les éléments selon un ordre linéaire de façon à constituer des séries électrochimiques : du potassium, le plus fortement positif, à l'oxygène. Il écrivait

ses formules en deux parties, positive et négative ; et considérait que seuls les atomes de charge identique pouvaient se substituer les uns aux autres lors des réactions. Les atomes ou groupe d'atomes dotés d'une charge élevée (positive ou négative) déplaçaient ceux dont la charge était moindre. En 1834, toutefois, J.-B. Dumas démontra que le chlore (négatif) pouvait se substituer à l'hydrogène (positif) sans altération notable des propriétés ; cette découverte et l'essor de la chimie organique finirent par avoir raison du dualisme de Berzelius, qui fut abandonné après des polémiques mémorables. En 1875, Antoine Becquerel, le premier représentant d'une célèbre dynastie, n'en publia pas moins une importante étude sur les forces électrochimiques où il résumait ses travaux en les rattachant de façon privilégiée à la minéralogie.

Pour tenter de décrire l'électrolyse, Theodor Grothius la comparait, en 1805, à un mécanisme en chaîne un peu semblable à une danse dans laquelle les atomes changeraient de partenaires, de telle sorte qu'au final les atomes d'hydrogène se retrouvent à un bout et les atomes d'oxygène à l'autre. Après avoir pris l'avis d'un érudit, William Whewell, Faraday choisit d'appeler « ions » les éléments électriquement chargés des molécules ; dans les années 1850, J.W. Hittorf substitua à la description de Grothius un modèle où les ions se déplaçaient à différentes vitesses et, en 1874, il démontra que le degré de conductivité des solutions diluées correspondait à la somme des valeurs des deux types d'ions. Ce point qui à l'époque parut sans doute secondaire à bien des chimistes a pourtant permis à la chimie physique de se constituer en champ disciplinaire à part entière. Il faudrait à cet égard évoquer l'intérêt de Lavoisier pour la chimie expérimentale, ou celui de Davy et d'un certain nombre de ses contemporains et successeurs pour les forces et ce que nous regroupons aujourd'hui sous le nom d'énergie ; c'est bien de chimie physique qu'ils s'occupaient, mais cette branche de la science n'avait alors ni spécialistes ni revues. En somme, la théorie électrochimique trouvait des applications en chimie minérale mais semblait inappropriée à la chimie organique, qui porte sur l'étude du carbone et de ses composés. En 1860, le congrès de Karlsruhe permit d'arriver à un accord sur les poids atomiques et l'écriture des formules ; l'existence des atomes chimiques n'était à peu près plus contestée, si ce n'est par le grand chimiste français que fut Marcellin Berthelot. Quant à savoir ce qui les liait entre eux (et comment ils se dissociaient), le problème restait entier.

J.H. Van't Hoff, un des fondateurs de la chimie physique, étudia très classiquement le phénomène de la diffusion d'un solvant passant d'une solution très concentrée à une solution plus diluée au travers d'une membrane ; ce processus est très important chez les organismes vivants. Une fois ses mesures effectuées, Van't Hoff s'aperçut que les substances polaires, le sel ordinaire par exemple, donnaient des résultats aberrants. En reprenant ces expériences, Svante Arrhenius

avança en 1887 que les électrolytes puissants comme le sel ordinaire se dissociaient complètement en ions Na^+ et Cl^- dans une solution diluée. L'hypothèse, à l'époque, ne semblait guère crédible : comment une molécule de charge neutre – ce qu'était censé être le chlorure de sodium (NaCl) – aurait-elle pu se scinder en solution sans absorber une énergie considérable ? Le dualisme de Berzelius n'était peut-être pas si mal fondé, après tout, même si s'agissant de la chimie organique sa théorie de la polarité ne paraissait tout simplement pas plausible.

En 1897, J.-J. Thomson découvrit que les rayons cathodiques se composaient de minuscules particules à charge négative qu'il choisit dans un premier temps de nommer corpuscules : apparemment présents dans toute la matière, ils furent bientôt reconnus comme les électrons, les éléments constitutifs de l'électricité. Présentant à la fois les caractéristiques des ondes et des particules, ils devaient se révéler plus difficiles à comprendre que ne le supposait Thomson ; mais c'est essentiellement grâce aux chimistes que nous savons aujourd'hui que les atomes sont en fait des combinaisons de particules fondamentales, les électrons, les protons et les neutrons. La charge électrique est d'une importance capitale pour la matière. Sans doute la chimie du XIX^e s. n'a-t-elle pas eu son Newton, mais il est désormais admis que l'électricité est au principe de l'affinité chimique.

La découverte de l'électron fut rapidement suivie par l'avènement de la mécanique quantique, qui modifia substantiellement la conception de l'énergie : au lieu de la considérer comme une quantité continue, on admit qu'elle se propageait par unités distinctes. En 1916, G.N. Lewis publia ses travaux sur la covalence des électrons, processus à la base des liaisons entre atomes. Il y distingue deux types de liaisons : les liaisons polaires, où un atome cède un ou plusieurs électrons à un autre atome et où, les électrons possédant une charge négative, le donneur devient positif, comme dans le cas $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$; et les liaisons covalentes, caractéristiques de la chimie organique, où il y a mise en commun des électrons. Quelque peu remaniée par la suite lorsqu'on s'aperçut que les molécules, à l'instar des atomes, étaient entourées par un nuage d'électrons, cette explication a servi à fonder les théories chimiques du XX^e s. Des différences de charge observées dans les molécules covalentes dépendent en fait l'interprétation et la prédiction des réactions. Ceux des éléments échangés qui sont dotés d'une faible charge négative vont se retrouver dans des parties de la molécule à nette charge positive. Le modèle dont se sont servis Davy et Berzelius était sans doute un peu rudimentaire, mais il a eu des prolongements que les critiques comme Dumas n'auraient jamais imaginés ; et leur conviction de l'importance de l'électricité pour la chimie se voit aujourd'hui confirmée par le fait que l'électrochimie est bien plus qu'une branche de la chimie : c'est en définitive sur elle que repose toute cette science.

► BECQUEREL A.C. *Des forces physico-chimiques*, Paris, Firmin-Didot, 1875. – BENSUADE-VINCENT B. & STENGERS I., *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte, 1993. – BROCK W.H., *Fontana History of Chemistry*, Londres, Fontana, 1992. – MELHADO E.M. & FRÅNGSMYR T., *Enlightenment Science in the Romantic Era : The Chemistry of Berzelius and Its Cultural Setting*, Cambridge, Univ. Press, 1992. – NYE M.J., *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry*, Berkeley, Univ. of California Press, 1993. – PERA M., *La rana ambigua*, Turin, Einaudi, 1986.

David KNIGHT
(trad. O. Bonis)

→ Affinité ; Arrhenius ; Chimie physique ; Électron ; Liaison.

ÉLECTRON

Plusieurs concepts de particule élémentaire d'électricité furent développés à la fin du XIX^e s., notamment par Larmor et Lorentz. Mais quand et comment l'existence d'une telle particule fut-elle établie et reconnue ? On retient généralement les expériences menées par J.-J. Thomson en 1897 sur les rayons cathodiques, connues aujourd'hui sous le nom de « découverte de l'électron ». Mais cette appellation n'est guère heureuse. L'électron, en effet, ne résulta pas d'une *eurêka* bref, individuel et définitif, mais plutôt d'une longue série de controverses.

En 1858, Plucker établit que la cathode d'un tube à gaz raréfié émet des rayons invisibles. Par la suite, la nature de ces rayons cathodiques divisa les physiciens. Pour la plupart des Anglais, dont Crookes et Schuster – et pour les Allemands Plucker, Giese, G. Wiedemann et Helmholtz – les rayons étaient des particules en mouvement. Les Allemands Goldstein, Hertz, E. Wiedemann et Lenard les représentaient plutôt comme des ondes au sein de l'éther. Les rayons étaient déviés par un champ magnétique et véhiculaient une charge électrique, ce qui soutenait la « théorie de l'émission ». Mais Hertz avait montré qu'ils n'étaient pas déviés par un champ électrique, et Lenard qu'ils pouvaient traverser une paroi métallique, ce qui était en faveur de la conception ondulatoire.

En 1897, J.-J. Thomson, alors directeur du Cavendish Laboratory de Cambridge, expérimenta à nouveau sur les rayons cathodiques. Il remit en évidence leur charge électrique en reprenant un dispositif de Perrin. Il parvint à les dévier électrostatiquement, déconstruisant ainsi l'expérience de Hertz. Mesurant le rapport de la charge à la masse e/m des particules, il obtint des valeurs mille fois supérieures à celles de l'atome d'hydrogène, et indépendantes du gaz et du métal des électrodes. Il affirma donc que les rayons étaient des « corpuscules », c'est-à-dire des particules chargées négativement, mille fois moins massives que l'atome d'hydrogène, et entrant dans la composition de tous les atomes, quelle que soit leur identité chimique.

En 1897 et 1898, en Allemagne, des mesures de e/m s'accordant avec celles de Thomson furent obtenues indépendamment par Wiechert et Kaufmann, et plus

tard par Lenard et par Kaufmann et Aschkinass. La conception ondulatoire fut rapidement abandonnée. En revanche, le caractère subatomique des corpuscules fut loin d'emporter l'adhésion. Nombre des Anglais l'ignorèrent, comme Campbell Swinton, qui écrivit en 1898 que le problème était maintenant de savoir « si ces particules matérielles sont des atomes isolés, des molécules isolées, ou de plus grands agrégats de matière ».

Le théoricien Fitzgerald s'en prit de façon plus explicite à l'interprétation de Thomson. En 1897, il suggéra que les particules cathodiques étaient non pas des « corpuscules », mais des « électrons » : « C'est presque l'hypothèse du Professeur J.-J. Thomson, à la différence qu'elle ne fait pas de l'électron une partie constitutive de l'atome, ni que nous dissocions les atomes, ni que nous sommes sur les traces des alchimistes. » Pour Fitzgerald, si les atomes sont de simples assemblages de corpuscules, et s'ils peuvent se dissocier, alors leur identité chimique peut varier, ce qui apparaissait comme une régression vers l'alchimie et la transmutation des éléments. L'électron, au contraire, permettrait de conserver un atome insécable.

Ces « électrons » résultaient d'une récente collaboration entre Fitzgerald et Larmor. Poursuivant l'œuvre de Maxwell, ceux-ci s'efforçaient de rendre compte de certains phénomènes encore mal ou pas expliqués par la théorie électromagnétique, comme la dispersion optique, l'électrolyse, ou les courants microscopiques. En 1894, ils convinrent que l'éther ne suffirait pas à cette tâche, et décidèrent d'y introduire des singularités, que Fitzgerald suggéra d'appeler « électrons », reprenant par là un terme employé auparavant par Stoney. L'intérêt de l'expérience de Thomson, pour Fitzgerald et Larmor, était qu'elle leur permettait d'ajouter une deuxième confirmation expérimentale à leur théorie, la première étant constituée par l'effet Zeeman. Cette innovation conceptuelle fut immédiatement acceptée par les théoriciens anglais proches de Fitzgerald et Larmor, comme Heaviside.

Le théoricien néerlandais Lorentz était aussi attaché à l'élaboration d'une théorie unifiée des phénomènes électromagnétiques. Dans ce but, notamment afin d'expliquer la dispersion anormale, il avait introduit des charges élémentaires en mouvement, dénommées « ions » dans l'article théorique qu'il publia en 1892. En 1897, il considéra lui aussi que les expériences de Thomson confirmaient sa propre théorie. En 1899, dans une nouvelle publication de Lorentz, les particules élémentaires servant de fondement à la théorie étaient conceptuellement analogues à celles de 1892, mais elles étaient désignées par le mot « électron ».

Thomson lui-même s'est farouchement opposé à l'identification de la particule cathodique avec l'électron de Fitzgerald et Larmor. En 1899, il publia une critique sévère de la « electron view ». Cette conception, disait-il, permettait certes de conserver un atome insécable. Mais, son propre « corpuscule » était supérieur par sa simplicité et sa fécondité explicative. Thomson reprochait également à l'électron d'être une charge

électrique indépendante de la matière. Cette critique peut s'expliquer par sa fidélité à Maxwell. Pour Maxwell, en effet, la charge électrique était un effet de bord, qui survenait à la surface de séparation entre la matière et l'éther. Dans les années 1880, cette conception était devenue une spécificité fondamentale de la tradition anglaise en électromagnétisme. De ce point de vue, l'électron de Larmor et Fitzgerald marquait une rupture avec la charge au sens de Maxwell. Ses auteurs se présentaient néanmoins comme ses véritables continuateurs, et revendiquaient pour eux-mêmes le nom de « Maxwelliens ». Thomson utilisa durablement le mot « corpuscule » pour désigner la particule cathodique, et refusa malgré des critiques répétées d'employer à la place le mot « électron ». En 1906, quand Thomson reçut le prix Nobel, il fut notamment félicité pour avoir mis au point la première méthode de détection de l'électron. Dans la réponse lue au cours de la cérémonie, Thomson n'employa que le mot « corpuscule », et pas une seule fois le mot « électron ». Il maintint cette attitude au moins jusqu'en 1913.

À Cambridge, Thomson et ses élèves du Cavendish Laboratory s'efforcèrent de mesurer e/m pour les particules émises par les métaux incandescents (le futur « effet thermionique ») et par les métaux frappés par des rayons ultraviolets (ce qu'on appelait alors le « phénomène de Hertz », le futur « effet photoélectrique »). Ils publièrent des valeurs proches du e/m des rayons cathodiques, et écrivirent que les métaux émettaient donc eux aussi des « corpuscules » dans des circonstances expérimentales très variées. À Cambridge, on le voit, e/m était en quelque sorte devenu la « signature » du corpuscule : c'est la valeur de cette quantité qui permettait d'affirmer que la particule émise par le métal était la même que celle présente dans les rayons cathodiques. Ces travaux étaient une réponse aux critiques niant que la particule cathodique puisse être un constituant de l'atome. Étant donné ces polémiques, l'effet photoélectrique prit une importance considérable. En 1899, Thomson parvint à y mesurer à la fois e et e/m . Cela lui permit de calculer la masse m du corpuscule, qui s'avéra être de l'ordre du millième de celle de l'atome d'hydrogène. S'appuyant sur ces résultats, Thomson affirma à nouveau que le corpuscule était une particule considérablement plus petite que l'atome, et qu'il était même un produit de dissociation de l'atome.

Néanmoins, le caractère universel et subatomique des particules cathodiques ne fut accepté que plusieurs années après les expériences de Thomson, et à la faveur de deux autres développements. Le premier était le concept de masse électromagnétique. L'idée que toute l'inertie soit d'origine électromagnétique s'avéra être d'une extrême fécondité explicative. La perspective de rendre compte de l'intégralité des phénomènes physiques en un même cadre théorique conduisait à reconnaître les fondements ontologiques de ces théories. À savoir le champ électromagnétique et les électrons. Le deuxième était l'étude de la radioactivité. Celle-ci fournissait une assise empirique croissante aux théories précitées. Par ailleurs, la valeur de e/m pour les rayons

bêta était voisine de celle des rayons cathodiques, ce qui accréditait leur généralité. Ces rayons devinrent alors le phénomène privilégié permettant l'étude expérimentale des électrons : c'est par des mesures de e/m sur les rayons cathodiques et sur les rayons de l'uranium que des expérimentateurs comme Kaufmann et son élève Simon essayèrent de départager les principales formules théoriques proposées pour la masse de l'électron (celle de Lorentz et Einstein, celle d'Abraham, et celle de Bucherer et Langevin).

Décrire plus précisément ce processus impose de différencier selon les milieux et les groupes de physiciens. Les anciens élèves de J.-J. Thomson sont un premier exemple. Dans leurs publications scientifiques, ceux-ci évitèrent tout d'abord d'employer le mot « électron » et lui préférèrent le « corpuscule » de Thomson. Par exemple, dans la thèse qu'il soutint en 1902, Langevin écrivait : « Nous conserverons pour ces particules cathodiques le nom de *corpuscule* proposé par le Professeur J.-J. Thomson. Celui d'*électron*, également usité, est souvent employé dans un sens un peu différent. » Le nom d'électron, disait Langevin, était associé à la charge électrique elle-même, alors que celui de corpuscule désignait la particule de matière véhiculant cette charge. Cette forme d'allégeance se retrouve chez les autres expérimentateurs formés au Cavendish, comme Rutherford, Townsend ou Zeleny. Néanmoins, ces physiciens s'étaient imprégnés des valeurs de la microphysique et du réductionnisme pendant leur séjour à Cambridge. Le pouvoir de synthèse des nouvelles théories électroniques éveilla leur intérêt et bientôt leur enthousiasme. Un des moments de cette évolution fut la préparation par Langevin et Rutherford du Congrès international de Saint-Louis en 1904. Rutherford proposa d'écrire lui-même un rapport sur la radioactivité, et confia Langevin à préparer un exposé sur les « Elektrons ». Le texte de Langevin défendait ardemment la nouvelle physique des électrons, la présentant comme « une Amérique nouvelle, où l'on respire à l'aise, qui sollicite toutes les activités et qui peut enseigner beaucoup de choses au Vieux Monde ». Cette nouvelle attitude se généralisa chez les anciens étudiants de Thomson. En 1915, Townsend publia un traité sur les rayonnements et sur les gaz ionisés. Ce livre se présentait comme une mise à jour de la somme de J.-J. Thomson, *Conduction of Electricity through Gases*, dont la dernière et deuxième édition remontait à 1906. Le mot « corpuscule » n'y était pas employé. Le terme « électron » y désignait indifféremment l'ion négatif dans les gaz très raréfiés, les particules émises par les métaux dans les effets photoélectrique et thermioniques, les particules composant les rayons cathodiques et les rayons bêta, les particules théoriques de la dynamique électromagnétique, et les particules subatomiques élémentaires de charge négative. Ce nouvel ouvrage de référence prenait acte de la disparition des « corpuscules » au profit des « électrons ».

Les spécialistes français des rayons cathodiques constituent un deuxième exemple notablement différent

du précédent. Dans les années 1900-1910, plusieurs Français expérimentèrent sur les rayons cathodiques, notamment Deslandres, Gouy, Pellat, et Villard. Leurs travaux portaient sur les propriétés empiriquement observables des rayons. Mais, assez typiques en cela de l'aversion française envers l'atomisme, ils n'essayaient pas de les interpréter en termes de particules microscopiques. La plupart ignorèrent purement et simplement les expériences anglaises et allemandes. En 1900, au congrès international de physique de Paris, Villard décrivit les recherches de Thomson avec un certain détail, mais en éliminant toute référence aux atomes. Un trait marquant de cette lecture non atomiste est que Villard n'employa jamais le mot « corpuscule », lui préférant celui de « particule » ou de « projectile cathodique ». Villard rapporta la valeur de e/m , mais n'en dégagea aucune implication concernant le caractère subatomique de la particule. Au contraire, il s'appropriait et traduisit les résultats de Thomson pour soutenir sa propre conception, publiée en 1898, selon laquelle les rayons cathodiques étaient des particules d'hydrogène en mouvement.

Ces Français se convertirent assez brusquement à l'approche microphysique, notamment Pellat en 1904 et Villard en 1906. Ce dernier affirma que « la théorie électromagnétique des phénomènes cathodiques constitue un progrès considérable, le plus grand qui ait été réalisé dans cette branche de la physique depuis les travaux de Sir W. Crookes ». Ces déclarations s'accompagnaient de changements dans les pratiques scientifiques, dans le vocabulaire (le terme « corpuscule » devenant couramment employé), dans la conceptualisation (Villard proposa une théorie électronique de l'aurore boréale), dans la rédaction des articles (écrits sur le mode hypothético-déductif et non plus inductif) et dans le regard porté sur les travaux antérieurs (Pellat réinterprétait toutes ses recherches passées comme portant sur les « corpuscules »). Sans nier la sincérité de ces conversions, on ne peut que constater qu'elles restaurèrent une visibilité et une crédibilité sérieusement amoindries sur le plan international.

Un consensus ne se forma autour de l'électron – et de sa présence au sein des rayons cathodiques – qu'une dizaine d'années après les expériences de Thomson. Comprendre ce processus nécessite l'abandon d'un modèle simpliste de type diffusionniste, selon lequel la vérité serait découverte en 1897 à Cambridge et se propagerait ensuite en ayant peu à peu raison des préjugés et des pesanteurs locales. Ce qui se dégage au contraire de l'analyse, c'est une longue série de conflits et de négociations, d'appropriations et de réinterprétations, où l'électron finalement stabilisé diffère en plusieurs points de chacune des particules initialement proposées par les protagonistes. C'est à la clôture de ce mouvement, et pas avant, que les expériences de 1897 furent rétrospectivement considérées comme la « découverte de l'électron ». Le moment fort de cette reconstruction collective fut l'attribution du prix Nobel à Thomson en 1906. La paternité de la découverte ne s'imposait

d'ailleurs pas, et les noms de Wiechert, Kaufmann et Perrin furent proposés en concurrence avec celui de Thomson. Les deux congrès Solvay de 1911 et 1913 marquent le complet achèvement de ce processus. Dorénavant, l'investigation portait sur la structure atomique et sur les propriétés de l'électron, et non plus sur sa détection et son existence.

► BUCHWALD J.Z., « The abandonment of Maxwellian electrodynamics : Joseph Larmor's theory of the electron », *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, 31, 1981, 135-180, 373-438. – DARRIGOL O., « The electron theories of Larmor and Lorentz : A comparative study », *Historical Studies in the Physical Sciences*, XXIV/2, 1994, 265-336. – FALCONER I., « Corpuscles, electrons, and cathode rays : J.-J. Thomson and the "Discovery of the electron" », *British Journal for the History of Science*, XX, 1987, 241-276. – FEFFER S.M., « Arthur Schuster, J.-J. Thomson and the discovery of the electron », *Historical Studies in the Physical Sciences*, XX/1, 1989, 33-61. – LELONG B., « Paul Villard, J.-J. Thomson, et la composition des rayons cathodiques », à paraître dans la *Revue d'Histoire des Sciences*. – ROBERTI N., « J.J. Thomson at the Cavendish Laboratory : the history of an Electric Charge Measurement », *Annals of Science*, LII/3, 1995, 265-284.

Benoît LELONG

→ Acide et base ; Antimatière ; Electrochimie ; Élémentarité ; Liaison ; Pauli ; Quantique ; Schrödinger ; Sommerfeld.

ÉLÉMENT

CHIMIE

Familière, indispensable à tout discours, la notion d'élément semble le type même de ces notions primitives qui se passent de toute définition. Aussi vieille que notre culture, sans qu'on puisse lui assigner un inventeur, elle traverse les siècles depuis l'aube grecque de la science occidentale jusqu'aux livres modernes. L'élément semble sans histoire. Ne serait-ce pas plutôt un concept qui n'a guère attiré l'attention des historiens ? Les études historiques sur la philosophie de la matière ou sur la découverte des éléments chimiques admettent généralement que le concept métaphysique antique fait place au concept scientifique moderne au XVII^e ou au XVIII^e s. Or ce schéma stéréotypé occulte l'évolution fine d'un concept trop souvent mal distingué de ses voisins.

Principe ou élément

Le terme élément, d'origine latine, est relativement récent par rapport à l'ancienneté de la notion. Une étymologie contestable – contestée par les spécialistes – fait dériver ce terme de la séquence alphabétique : l, m, n aurait donné *elementum*, un peu comme l'alphabet lui-même dérive d'alpha, beta. En fait, cette origine littérale rappelle la métaphore favorite des premiers atomistes grecs qui comparaient les éléments premiers à des lettres dont l'arrangement peut produire une variété indéfinie d'énoncés.

Ce que nous appelons élément fut d'abord pensé en langue grecque. La notion d'un principe primitif, *archè*, répondait à la question cosmogonique qu'affrontèrent les premiers physiciens grecs. L'eau-principe de Thalès de Milet est une sorte d'océan primitif à partir duquel s'engendrent toutes les substances qui composent l'univers par des processus de raréfaction ou de condensation. La nature de l'élément ne dépendrait-elle pas de la quantité d'éléments que l'on admet ? Empédocle d'Agrigente (490-435 av. J.-C.) suppose le monde fait de quatre éléments qui sont les racines de toutes choses (*rhizomata*). La terre, l'air, l'eau et le feu s'unissent sous l'empire de l'Amour et se séparent sous le régime de la Haine. La principale fonction de ces éléments, impérissables, éternels, est de garantir la permanence sous le changement et l'unité dans la variété. Le monde résulte de leur mélange en proportions diverses, comme les tableaux les plus variés du peintre sont créés par les divers mélanges sur sa palette des quatre couleurs fondamentales (Empédocle, *De la Nature*, fig. 23). De un à quatre éléments, la mutation est si profonde qu'Auguste Comte y voit « la véritable origine de la science chimique ». L'élément devient, à ses yeux, une notion positive car relative. Du singulier au pluriel on quitte l'absolu, condition essentielle pour penser les phénomènes de composition et de décomposition. Comte juge cette « révolution », qu'il situe chez Aristote, beaucoup plus importante que le passage ultérieur « par une exploration graduellement perfectionnée, des quatre éléments d'Aristote aux cinquante-six corps simples de la chimie actuelle » (A. Comte, *Cours de Philosophie positive*, 36^e leçon, Paris, Hermann, t. I, p. 592). Contrairement aux historiens qui situent l'avènement de la notion moderne d'élément chez Boyle ou chez Lavoisier, Comte n'hésite pas à remonter jusqu'à Aristote. Cette conception a le mérite de souligner le changement de fonction du concept d'élément lorsqu'il cesse d'être l'origine absolue de toute chose pour devenir un être relationnel. Elle est cependant historiquement trompeuse. Non seulement elle méconnaît la priorité d'Empédocle, auteur de la théorie des quatre éléments, mais surtout elle fausse l'interprétation d'Aristote en faisant de lui le premier chimiste. La théorie d'Aristote trouve son sens plein dans un contexte philosophique étranger à la science chimique, qui d'ailleurs n'existait pas comme telle.

Sur les éléments, Aristote tient plusieurs discours. Les éléments sont avant tout des unités de composition. « Élément se dit du premier composant immanent d'un être et spécifiquement indivisible en d'autres espèces » (*Métaphysique*, IV, 3, 1014a 26). Parties composantes d'un mot, d'un corps ou encore des propositions mathématiques, l'élément « ne peut plus se diviser en d'autres espèces différentes ». Par sa fonction de composant immanent au mixte, l'élément *stoicheion* (terme primitivement employé pour désigner des objets rangés en série, comme les lettres de l'alphabet) se distingue du principe (*archè*) qui est plutôt la source antérieure d'où l'être dérive. La

matière et la forme font fonction de causes universelles ou de principes, non de composants des mixtes. Caractérisé par sa fonction de constituant ultime, indivisible, l'élément pourrait être un atome, au sens de Démocrite. Mais Aristote s'oppose aux atomistes quant au mode d'existence des éléments dans le mixte. Le mixte vrai n'est pas un agrégat d'éléments homogènes. Il est distinct des éléments qui le composent car, en engendrant le mixte, les éléments cessent d'exister en acte et subsistent en puissance. Ils ne se peuvent donc retrouver qu'en détruisant le mixte (*De La génération et de la Corruption*, I, 10). De plus, contrairement aux atomistes, Aristote conçoit les éléments comme des unités fortement individualisées. Enfin ils ne sont pas premiers puisqu'ils résultent de la combinaison de deux qualités contraires. Dans *De La génération et de la Corruption* (II 4 et 5, 331a 6-333a 15) Aristote expose la formation des quatre éléments à partir de deux couples de qualités tangibles – dont l'un est actif (le chaud et le froid) et l'autre passif (le sec et l'humide). Le feu est ainsi chaud et sec ; l'air chaud et humide ; la terre froide et sèche, l'eau froide et humide. Ces propriétés déterminent les qualités intrinsèques des éléments. Le feu et l'air ayant tendance à monter, l'eau et la terre à descendre, Aristote spatialise sa théorie des éléments en assignant à chacun d'eux une zone spécifique de haut en bas du monde sublunaire (*Les météorologiques*, I, 2, 339a 15). Malgré leur individualité et l'esquisse d'une distribution géographique, les éléments aristotéliens peuvent se changer l'un dans l'autre par variation sur l'une des qualités. Un élément matériel, c'est-à-dire uni au substrat indifférencié de la matière, n'est, en effet, jamais pur : chaque qualité actualisée contient en puissance son contraire. Le froid en acte contient le chaud en puissance.

Critiques et controverses

L'importance que Comte accorde à Aristote s'explique en partie par la référence permanente à sa théorie des éléments, souvent discutée et contestée dans les traditions alchimique et chimique occidentales. Sans renier les quatre éléments, Paracelse leur préfère trois principes. Les *tria prima*, soufre, sel et mercure, ne sont ni les substances concrètes du même nom ni des constituants matériels des mixtes, ni des espèces chimiques stables, isolables, mais plutôt des agents de réaction. Le soufre est responsable des combustions, le mercure est le principe actif, et le sel le principe passif de solidité.

Éléments et principes sont sévèrement critiqués au XVII^e s. Août 1624, des placards affichent à proximité de la Sorbonne quatorze thèses contre les dogmes d'Aristote, de Paracelse et des « cabbalistes ». Leur auteur, Étienne de Claves, fut rapidement condamné et interdit d'enseignement. Cela ne l'empêcha pas de publier sa propre théorie qui conteste toute différence ontologique entre élément et principe. Il redéfinit les éléments comme « corps simples qui entrent dans la mixtion des corps composés et auxquels ils se peuvent

finaleme nt résoudre ». Se fondant sur l'expérience de distillation du bois de Gaillac, il identifie cinq éléments : eau, terre, sel, soufre (ou huile) et mercure. En 1661, dans *The Sceptical chymist*, Robert Boyle étend le doute à toutes les théories, qu'elles comptent trois, quatre ou cinq éléments, et suggère plutôt une explication corpusculaire, mieux en harmonie avec la science mécanique.

Élément et corps simple

Le refus de distinguer élément et principe est le signe d'un changement profond. L'élément devient relatif par rapport à nos connaissances. Cette idée domine dans le *Cours de chimie* de Nicolas Lémery, publié en 1675 et constamment réédité jusqu'au milieu du XVIII^e s. « Le nom de "principe" en chimie ne doit pas être pris tout à fait dans une signification exacte ; car les substances à qui l'on a donné ce nom ne sont principes qu'à notre égard et qu'en tant que nous ne pouvons pas aller plus avant dans la division des corps, mais on comprend bien que ces principes sont encore divisibles en une infinité de parties, qui pourraient à plus juste titre être appelées principes » (cité par P. Duhem, p. 26). La simplicité toute relative des principes autorise le triomphe en plein XVIII^e s. de la théorie des quatre éléments, avec le phlogistique à la place du feu dans certains cas. Mais les quatre éléments enseignés ne sont plus ceux d'Aristote. Ils ne sont plus constituants universels et ultimes de la matière mais derniers termes de l'analyse chimique. Sont-ils pour autant des réalités concrètes isolables ? Non, dans le cas du phlogistique. Les éléments ne sont pas nécessairement mis au jour dans les opérations chimiques mais ils sont toujours mis en œuvre. Ce qui caractérise, en effet, la chimie des Lumières est l'identification entre éléments comme constituants et comme instruments. À la suite de Hermann Boerhaave, le cours de chimie de Gabriel-François Rouelle, fréquenté par Rousseau, Diderot, Turgot, Lavoisier et bien d'autres, présente les quatre éléments comme les « instruments naturels » du chimiste, au côté des « instruments artificiels » que sont les menstrues (ou solvants) et les appareils de laboratoire.

On voit donc que la redéfinition de l'élément au profit d'une notion toute relative de corps simple et opératoire d'instrument à disposition des chimistes n'a pas renversé les quatre éléments. Si Lavoisier a porté un coup fatal à cette antique doctrine, il n'a pas pour autant inventé la notion moderne d'élément. C'est de l'existence de feu ou phlogistique que Lavoisier a douté en premier mais, pour avancer une nouvelle interprétation de la combustion, il a dû admettre ensuite que l'air atmosphérique n'était pas un élément et prouver enfin que l'eau était composée. Alors seulement, à la faveur d'une réforme de la nomenclature des chimistes en 1787, Lavoisier fut en mesure de réorganiser toute la chimie autour des notions de corps simple et de composé. Le *Traité élémentaire de chimie* (1789) consacre la redéfinition, amorcée depuis un siècle, de

l'élément comme corps simple : « Si [...] nous attachons au nom d'éléments ou de principes des corps l'idée du dernier terme auquel parvient l'analyse, toutes les substances que nous n'avons pu décomposer par aucun moyen, sont pour nous des éléments ; non pas que nous puissions assurer que ces corps, que nous regardons comme simples, ne soient eux-mêmes composés d'un plus grand nombre de principes, mais puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière de corps simples » (Lavoisier, *Œuvres*, t. I, p. 7).

Cette définition n'innove que parce que Lavoisier réorganise la chimie autour d'un programme d'analyse. La chimie, écrit-il, « marche vers son but et vers sa perfection en divisant, subdivisant et resubdivisant encore » (*ibid.*, p. 173). C'est ainsi qu'aux quatre éléments il substitue une table de trente-trois corps simples en soulignant que ce nombre, tout relatif, est indéfini.

Le pluralisme indéfini n'impose pas pour autant une rupture franche avec l'ancienne notion d'élément-principe. L'oxygène, qui est au centre de la théorie lavoisienne, assume les fonctions d'un véritable principe de combustion et d'acidité (d'où son nom : oxy-gène = générateur d'acide). Tout en dénonçant le phlogistique comme être imaginaire, Lavoisier admet l'existence du calorique ou substance de la chaleur, dont la présence détermine l'état physique – liquide ou gazeux – des substances. Il conçoit certes un instrument (le calorimètre) pour en mesurer la quantité mais il reste que seuls certains corps simples « qui appartiennent aux trois règnes » peuvent être nommés « éléments des corps ».

Éléments et atomes

Loin d'être évincée par le triomphe de la chimie analytique et du corps simple au XIX^e s., l'antique notion de principe primitif semble revivifiée. Des techniques plus puissantes telles que l'électrolyse puis l'analyse spectrale allongent rapidement la table des éléments-corps-simples. D'une trentaine en 1789 on passe à une soixantaine au milieu du XIX^e s. Plus grandit le nombre des corps simples, plus ardente est la quête d'un élément unique, primordial, d'où dériverait cette multiplicité indéfinie. L'hypothèse que l'hydrogène serait cet élément primitif, formulée par William Prout vers 1810, connaît un vif succès tout au long du XIX^e s. Fortement encouragée par le système atomique de Dalton qui attribue la valeur 1 au poids atomique de l'hydrogène, révisée quand d'importantes décimales interviennent dans les poids atomiques, elle stimule les efforts de classification. Plusieurs tableaux sont ainsi esquissés qui tentent de dégager les liens de parenté des éléments à partir des relations numériques entre poids atomiques.

Pour construire son tableau périodique, Mendeleev suit un tout autre voie. Adversaire résolu de l'hypothèse de Prout, il proclame l'individualité des éléments

et distingue soigneusement ce concept de celui de corps simple. Sa distinction est fondée sur une autre distinction, héritée d'Avogadro, entre atome et molécule : « Un corps simple est quelque chose de matériel, métal ou métalloïde, doué de propriétés physiques et chimiques. À l'expression de corps simple correspond l'idée de molécule [...]. Il faut réserver, au contraire, le nom d'éléments pour caractériser les particules matérielles qui forment les corps simples et composés et qui déterminent la manière dont ils se comportent au point de vue physique et chimique. Le mot élément appelle l'idée d'atome. (Mendeleev, « La loi périodique des éléments chimiques », 1871, trad. fr., *Le Moniteur scientifique*, 1879, 21, p. 693).

La distinction entre élément et corps simple correspond à une réorganisation de la chimie. À l'analyse, au va-et-vient entre simple et composé, Mendeleev substitue l'étude des rapports entre les propriétés observables et mesurables des corps simples ou composés et les qualités intrinsèques des éléments qui les composent. Le but est donc d'articuler le comportement phénoménologique des corps à la réalité abstraite mais néanmoins matérielle des éléments, identifiés par leur poids atomique. La foi de Mendeleev dans l'individualité des éléments chimiques est renforcée par la construction du tableau périodique qui, en assignant une place unique à chaque élément, permet de repenser l'individu-élément comme unité de relations, ou maille d'un réseau d'échanges matériels. La découverte des gaz inertes puis celle des transmutations radioactives à la fin du XIX^e s. ont cependant ébranlé l'élément mendélévien.

Ce concept est-il périmé après la radioactivité et la décomposition de l'atome ? La course aux particules ultimes qui constituent la matière est répartie de plus belle dans la physique nucléaire. Mais la quête de l'élémentaire, affaire de quelques physiciens, n'enlève pas sa pertinence à l'élément individu des chimistes. L'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) le redéfinit en 1923 comme « un ensemble d'atomes de même numéro atomique (nombre de protons dans le noyau) ». Cette réactualisation renforce la distinction entre élément et corps simple qu'illustrent notamment les isotopes – manifestations différentes d'un même élément en fonction du nombre de neutrons dans le noyau.

Cette histoire ne révèle en rien la marche triomphale d'un concept qui sortirait bien formé d'une révolution, solidement ancré dans l'expérience, oublié de son passé métaphysique. Assumant tour à tour les fonctions d'origine primordiale, de conservation des qualités, d'instrument, de limite à la décomposition, d'unité de combinaison, l'élément a plusieurs histoires, inscrites dans des contextes intellectuels et des pratiques instrumentales très différents.

► BACHELARD G., *Le Pluralisme cohérent de la chimie moderne*, Paris, Vrin, 1930. – BENSUADE-VINCENT B., *Les pièges de l'élémentaire. Contribution à l'histoire de l'élément chimique*, Paris I, 1981 (thèse doct.). – BENSUADE-VINCENT B.,

PACAUT A. *et al.*, « Le langage chimique à la recherche de l'élément ». *L'Actualité chimique*, juil.-août 1994, p. 51-70.
 — DIELS H., *Elementum. Eine Vorarbeit Zum Griechischen un Lateinischen Thesaurus*. Leipzig, 1899. — DUHEM P., *Le mixte et la combinaison chimique*. Paris, 1902, rééd. Paris, Fayard « Corpus », 1985. — URBAIN G., *Les notions fondamentales d'élément chimique et d'atome*, Paris, 1925.

Bernadette BENSUADE-VINCENT

→ Alchimie ; Aristote : Chimie physique ; Loi de la nature ; Matière ; Paracelse.

ÉLÉMENTARITÉ

PHYSIQUE

L'idée d'élémentarité est sous-jacente à la conception atomique qui avait été développée par les philosophes de la Grèce antique. D'après cette conception, toute la variété des structures de la matière peut être engendrée par la combinatoire des atomes, constituants élémentaires, insécables, immuables, d'un petit nombre de types différents. Il aura fallu plus de vingt siècles pour que cette conception, initialement purement philosophique, se transforme en l'hypothèse scientifique fondatrice de la chimie moderne et de la thermodynamique statistique, puis s'impose comme le principe directeur et unificateur de presque toute la science contemporaine. Peut-on aujourd'hui imaginer une seule des sciences de la nature, une seule des technologies qui s'en déduisent, qui ne soit redevable, à un degré ou un autre, de cette conception ? On ne peut qu'être confondu devant la clairvoyance des initiateurs de cette conception qui, tout compte fait, s'est trouvée vérifiée : d'après l'état actuel de nos connaissances en effet, toute la matière, dans tout l'univers, est faite à partir de trois constituants élémentaires, le quark « up », le quark « down » et l'électron, puisque tous les atomes comportent un noyau constitué de protons et de neutrons, eux-mêmes composites de quarks up et de quarks down, autour duquel orbitent des électrons. Certes la physique moderne de l'élémentarité a mis en évidence d'autres constituants élémentaires de la matière comme le *muon* ou le *taupon*, ou comme les quarks « étrange », « charmé », « beau » ou « top ». Mais ces particules, très instables, ne se trouvent pas dans la matière ordinaire, elles ne sont produites que dans des conditions très particulières, au cœur des étoiles, ou, en laboratoire auprès des accélérateurs, tant et si bien qu'avec trois « atomes », le programme des atomistes de l'Antiquité est à peu près complètement accompli !

L'histoire du long cheminement et des phases d'intenses bouillonnements qui ont conduit à la conception actuelle de l'élémentarité mériterait de longs développements. Mais au cours des trente dernières années, la physique de l'élémentarité a connu une brusque accélération qui l'a menée à un stade de plein épanouissement : sa théorie de référence, le modèle standard, permet de rendre compte de manière

satisfaisante de l'ensemble des données expérimentales actuellement disponibles et d'orienter efficacement les recherches qui restent nécessaires. C'est essentiellement à décrire le cadre et le contenu de ce modèle standard, à identifier les problèmes sur lesquels il bute et à évoquer les perspectives de son dépassement qu'est consacré le présent article.

Le cadre théorique et expérimental

Les recherches concernant l'élémentarité portent sur deux domaines indissociables : les constituants irréductibles de la matière d'une part, et les interactions qualifiées de fondamentales dans lesquelles ces constituants sont impliqués d'autre part. L'élémentarité n'est pas un concept absolu ; des particules sont élémentaires dans ou par rapport à telle ou telle interaction. Toutes les particules ne participent pas de la même façon à toutes les interactions. Le cadre général de cette physique est la théorie des champs quantiques qui réalise le mariage de la mécanique quantique et de la relativité restreinte. Les constituants de la matière aussi bien que les interactions fondamentales sont décrits à l'aide de champs quantiques. À la limite classique (c'est-à-dire lorsqu'il est possible de négliger le quantum d'action), les champs quantiques redonnent les descriptions classiques : un champ quantique d'interaction redonne la notion de champ de force, correspondant à la donnée en chaque point de l'espace-temps d'une force exercée sur une particule test, et un champ quantique de matière redonne la description classique de la matière comme mécanique rationnelle d'un ensemble de points matériels. Mais en toute généralité, un champ quantique correspond à la donnée, en chaque point de l'espace-temps, d'un opérateur de création ou d'annihilation d'une particule élémentaire. C'est pourquoi le champ quantique marque une rupture nette avec la physique classique et permet de rendre compte d'effets ou de phénomènes qui lui sont totalement étrangers, comme des phénomènes ondulatoires associés à la matière (par exemple la diffraction des électrons) ou des effets corpusculaires associés à la lumière (par exemple l'effet photoélectrique ou l'effet Compton).

Les particules élémentaires sont des quanta de champs quantiques. Les quanta des champs de matière sont des *fermions*, des particules de spin demi-entier obéissant au principe d'exclusion de Pauli : deux fermions identiques ne peuvent coexister dans le même état quantique, ce qui permet de rendre compte de la propriété classique, intuitive, d'impenétrabilité des corpuscules de matière. Les quanta des champs d'interaction sont des *bosons*, des particules de spin nul ou entier. Des bosons identiques peuvent et même tendent à s'agréger tous dans le même état quantique, ce qui permet de rendre compte de la propriété classique d'additivité des champs de force.

D'après la mécanique quantique, pour observer une structure microscopique à haute résolution temporelle et spatiale, il est nécessaire de lui transférer une énergie-impulsion d'autant plus élevée que la résolution

souhaitée est élevée. D'après la théorie de la relativité, ce transfert d'énergie-impulsion peut provoquer l'apparition de particules qui n'étaient pas présentes dans l'état initial. Le monde de l'infiniment petit est donc un monde ouvert : les particules peuvent disparaître ou être produites, elles peuvent aussi bien être des objets d'études que des sondes.

Les expériences de physique des particules consistent en l'observation de réactions particulières, qui peuvent être provoquées à l'aide d'accélérateurs (ou de collisionneurs) et analysées à l'aide de détecteurs ou bien produites naturellement par le rayonnement cosmique. Des accélérateurs de particules de plus en plus puissants, associés à des détecteurs de plus en plus performants, ont permis d'explorer la matière de plus en plus profondément. Les énergies atteintes aujourd'hui permettent de sonder la structure de la matière jusqu'à une dimension de 10^{-18} mètre.

Particules élémentaires et interactions fondamentales

Le modèle standard de la physique des particules est la théorie de référence qui décrit les constituants élémentaires de la matière et les interactions fondamentales (électromagnétique, gravitationnelle, forte et faible) auxquelles ils participent.

Les constituants élémentaires de la matière se partagent en deux grandes catégories déterminées par la participation aux interactions fondamentales, les six *leptons* d'une part, qui ne participent pas à l'interaction forte, et les six *quarks* (« down », « up », « étrange », « charmé », « beau », « top ») d'autre part, qui participent à toutes les interactions. Dans la catégorie des leptons, les leptons chargés (électron, muon, tauon) participent à l'interaction électromagnétique et à l'interaction faible, et les leptons neutres ou *neutrinos* (neutrino d'électron, neutrino de muon, neutrino de tauon) ne participent qu'à l'interaction faible. La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques conservés, ou charges d'interaction. À chaque constituant de la matière est associée son antiparticule, une particule de même masse et de charges opposées.

Les constituants élémentaires de la matière peuvent aussi être classés, indépendamment de la participation aux interactions, en trois répliques, ou générations, de particules qui ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark u et le quark d, qui appartiennent à la première génération, sont les particules massives les plus légères et elles sont stables ; elles sont les constituants exclusifs de la matière ordinaire. À l'exception des neutrinos, les particules des deux autres générations sont plus lourdes et instables ; elles ne peuvent être observées ou détectées que dans les expériences auprès des accélérateurs ou dans le rayonnement cosmique. Cette structuration en générations des constituants de la matière n'est pas expliquée par le modèle standard ; elle reste l'un des problèmes les plus intrigants de la physique contemporaine.

Le boson de l'interaction électromagnétique (c'est-à-dire le quantum du champ quantique d'interaction électromagnétique) est le photon. En physique des particules, l'interaction électromagnétique est un outil plutôt qu'un objet de recherche, parce qu'elle est si bien décrite par la théorie de l'électrodynamique quantique que cette théorie sert de modèle de référence à l'ensemble de la théorie des champs quantiques. D'autre part l'interaction électromagnétique est à la base de toutes les technologies de l'instrumentation nécessaire à la physique des particules.

L'interaction gravitationnelle quant à elle, est sensible à l'échelle macroscopique et dominante dans le monde de l'infiniment grand, mais elle est tellement faible, à l'échelle des particules élémentaires, qu'il est possible de l'y négliger. Certes il y a de bonnes raisons de penser qu'à ultra-haute énergie (10^{19} GeV : GeV pour Giga-électron-Volt, soit 10^9 électron-Volt) l'interaction gravitationnelle puisse avoir une intensité comparable à celle de l'interaction forte et qu'il devienne impossible d'y négliger les effets quantiques qui mettraient en jeu son boson, l'hypothétique *graviton*. Mais cette perspective ne pose de problèmes qu'à la spéculation purement théorique, et l'approximation qui consiste à négliger l'interaction gravitationnelle en physique des particules se révèle tout à fait satisfaisante. Le vrai domaine de l'interaction gravitationnelle est celui de la cosmologie, car c'est elle qui gouverne l'évolution de l'univers à grande échelle. Sa théorie moderne, la relativité générale d'Einstein est d'ailleurs le fondement théorique du modèle du big bang, le modèle standard de la cosmologie.

L'interaction forte est aujourd'hui traitée comme une interaction effective, résidu de basse énergie de la chromodynamique quantique, l'interaction fondamentale à laquelle les quarks sont les seuls fermions à participer. Les bosons de la chromodynamique quantique sont les *gluons*. La chromodynamique quantique rend bien compte des interactions des quarks à grand transfert d'énergie, mais elle n'a pas encore permis d'expliquer la propriété du confinement des quarks à l'intérieur des *hadrons*, les particules composites dont ils sont les constituants qui, à l'instar du proton et du neutron participent à toutes les interactions fondamentales. Le fait que des constituants élémentaires de la matière comme les quarks ne puissent pas être isolés à l'état libre est une difficulté certaine pour les investigations expérimentales (on ne dispose pas de faisceaux de quarks d'énergie bien déterminée), mais il semble possible de contourner cette difficulté.

L'interaction faible est à l'origine de la radioactivité bêta (désintégration de certains noyaux avec émission d'un électron et d'un antineutrino) et de certaines des réactions de fusion thermonucléaire qui, au cœur des étoiles et du Soleil, transforment l'hydrogène en hélium. Pendant de nombreuses années, la faiblesse de cette interaction fondamentale a rendu difficile son étude expérimentale et a excité la curiosité des théoriciens. Les bosons de l'interaction faible sont les bosons intermédiaires, W^+ , W^- et Z^0 . Dans le cadre du modèle

standard, l'interaction faible est maintenant décrite à l'aide d'une théorie prédictive mais c'est à son propos que se posent les problèmes dont la résolution dépendra des résultats des grands programmes de recherche expérimentale du siècle prochain.

Le modèle standard

Le modèle standard consiste en un ensemble d'algorithmes, appelé développement perturbatif, permettant de calculer, par approximations successives, à l'aide d'un nombre fini et fixé de paramètres déterminés expérimentalement, les probabilités des réactions des leptons et des quarks, du photon et des bosons intermédiaires en interactions électromagnétique et faible (théorie électrofaible), et les probabilités des réactions des quarks et des gluons en interaction forte à grand transfert d'énergie-impulsion (chromodynamique quantique).

Le modèle standard a passé avec succès tous les tests expérimentaux auxquels il a été soumis. Il a permis d'anticiper de très nombreuses découvertes expérimentales décisives : les réactions d'interaction faible à courants neutres en 1973 ; le quark charmé en 1975 ; le gluon en 1979 ; les bosons intermédiaires de l'interaction faible W^+ , W^- et Z^0 en 1983 ; le quark top en 1995.

Toutes les prédictions du modèle standard ont été confirmées par l'expérience, à l'exception d'une seule, l'existence du boson de Higgs, une particule que l'on espère bien découvrir dans les quelques années qui viennent.

Le modèle standard a été rendu possible par la mise en évidence expérimentale et phénoménologique d'un nouveau niveau d'élémentarité, celui des quarks, qui a permis de mettre de côté toute la complexité des interactions fortes des hadrons. Ses lignes de force théoriques peuvent être rassemblées en quatre rubriques : 1) un principe unificateur, l'invariance de jauge, selon lequel toutes les interactions fondamentales découlent de l'invariance dans des opérations de symétrie qui dépendent du point d'espace-temps où elles sont appliquées ; 2) un critère de fiabilité, la renormalisabilité, qui permet d'éliminer les infinis qui pourraient compromettre le développement perturbatif, et de discerner, à chaque échelle d'énergie, les degrés de liberté et les paramètres pertinents ; 3) un mécanisme efficace de brisure de symétrie, le mécanisme de Higgs, à l'origine de la différenciation des masses des particules élémentaires, qui permet l'unification, sans les confondre, des interactions électromagnétique et faible au sein de la théorie électrofaible ; 4) une perspective cosmogonique, sur laquelle il débouche en se rapprochant du modèle du big bang, le modèle standard de la cosmologie.

Le modèle standard comporte cependant des points faibles qui nécessitent des recherches théoriques et expérimentales, et qui font penser qu'il doit être considéré comme une théorie effective, susceptible d'être améliorée, approfondie, voire remise en cause :

certaines des paramètres dont il dépend, comme les masses des fermions, sont en très grand nombre, leurs valeurs sont très éparpillées et toutes n'ont même pas encore été déterminées ; il laisse complètement ouvert le problème de la masse des neutrinos ; il ne fournit pas d'explication à la classification des fermions en trois générations de particules, alors que c'est précisément l'existence de ces trois générations qui permet de rendre compte de la violation de l'invariance CP qui est vraisemblablement à l'origine du déséquilibre matière/antimatière dans l'univers primordial ; il est en échec face au traitement quantique de la gravitation ; il ne fournit pas, dans le cadre du développement perturbatif de la chromodynamique quantique, d'explication à la propriété fondamentale du confinement qui interdit aux quarks de se propager à l'état libre hors des hadrons, les particules dont ils sont les constituants ; le mécanisme de Higgs, qui en est la clé de voûte, n'a pas encore été testé expérimentalement et il apparaît comme trop « ad hoc » pour pouvoir être généralisé à l'unification de toutes les interactions fondamentales, car il impliquerait des ajustements fins de paramètres qui le rendraient peu crédible.

C'est justement à propos de ce mécanisme de Higgs et de la particule qui lui est associée, le boson de Higgs, que se concentre l'essentiel des efforts théoriques et expérimentaux.

Les recherches théoriques en vue du dépassement du modèle standard empruntent principalement deux grandes voies : 1) la voie de la supersymétrie qui, en corrigeant certaines des insuffisances du mécanisme de Higgs permettrait, tout en conservant tous les acquis du modèle standard, de relancer les tentatives de grande unification, et fournirait peut-être des clés pour la quantification de la gravitation ; dans le modèle standard supersymétrique minimal (MSSM), il y aurait plusieurs bosons de Higgs ; la supersymétrie associerait à chaque particule (boson ou fermion) du modèle standard un partenaire de l'autre statistique (fermion ou boson) ; le partenaire supersymétrique de plus petite masse serait une particule massive n'interagissant que très faiblement, qui pourrait permettre de résoudre le problème de la masse cachée de l'univers. 2) La voie de la sous-structure selon laquelle il existerait un nouveau niveau d'élémentarité sous-jacent aux particules du modèle standard (ou à certaines d'entre elles), et qui déboucherait sur toute une floraison de nouvelles particules composites, analogues aux hadrons, mais à des masses deux à trois mille fois plus élevées.

Mais seule l'expérience permettra de trancher entre ces deux options théoriques, ou de mettre en évidence une nouvelle voie. Telle est la perspective dans laquelle se prépare le programme du LHC (le grand collisionneur à protons actuellement en construction au CERN à Genève). Grâce au modèle standard qui permet d'optimiser les détecteurs pour les expériences futures, grâce aux résultats expérimentaux que vont continuer à fournir les installations existantes comme les collisionneurs LEP au CERN, HERA à Hambourg et TEVATRON aux

États-Unis, ce programme du LHC semble doté d'un très haut potentiel de découverte.

► ATLAN H., *Entre le cristal et la fumée. Essai sur l'organisation du vivant*, Paris, Le Seuil, 1979. — BERGE P., POMEAU Y. & VIDAL C., *L'ordre dans le chaos. Vers une approche déterministe de la turbulence*, Paris, Hermann, 1984. — BERTHELOT M., *Science et Morale*, Paris, Calmann-Lévy, 1952. — BRILLOUIN L., *La Science et la théorie de l'information*, Paris, Masson, 1959 ; *Science and Information Theory* (2^e éd.), New York, Academic Press, 1962. — BROGLIE L. DE, « Sur la complémentarité des idées d'individu et de système Neuchâtel », *Dialectica*, 1948, n° 7, p. 325. — COHEN-TANNOUDI G. & SPIRO M., *La Matière, Espace, Temps. La logique des particules élémentaires*, Paris, Fayard, 1986. — CROZON M., *La Matière première. La recherche des particules fondamentales et de leurs interactions*, Paris, Le Seuil, 1987. — DAVIES P., *Superforces. Recherche pour une théorie unifiée de l'univers*, Paris, Payot, 1987. — D'ESPAGNAT B., *À la recherche du réel, le regard d'un physicien*, Paris, Gauthier-Villars, 1979. — FEYNMAN R., *Lumière et Matière : une étrange histoire*, Paris, InterÉditions, 1987 ; *Vous voulez rire Monsieur Feynman*, Paris, InterÉditions, 1985. — GONSETH F., « Remarque sur l'idée de complémentarité », *Neuchâtel, Dialectica*, 1948, n° 7, p. 414. — HAWKING S., *Brève Histoire du Temps. Du big-bang aux trous noirs*, Paris, Flammarion, 1989. — HÉRACLITE, *Les Présocratiques*, Paris, Gallimard « Pléiade », 1988. — JACOB F., *La Logique du Vivant. Une histoire de l'hérédité*, Paris, Gallimard, 1970. — KASTLER A., *Cette étrange matière*, Paris, Stock, 1976. — LANDAU L. & LIFCHITZ E., *Cours de Physique statistique*, vol. 5 de la *Physique théorique*, Moscou, MIR, 1984. — LAVOISIER A.L., *Traité Élémentaire de Chimie*, Paris, Gauthier-Villars, 1937. — LÉVY-LEBLOND J.M. & BALIBAR F., *Quantique. Rudiments*, Paris, CNRS-InterÉditions, 1984. — NARLIKAR V., *Une Gravitation sans gravité*, Paris, Payot, 1986. — NOVELLO M., *Cosmos et contexte*, Paris, Flammarion, 1948. — POINCARÉ H., *La Science et l'Hypothèse*, Paris, Flammarion, 1986. — PRIGOGINE I. & STENGERS I., *La Nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard, 1986 ; *Entre le Temps et l'Éternité*, Paris, Fayard, 1988. — TRINH X' THUAN, *La Mélodie Secrète : et l'homme créa l'Univers*, Paris, Fayard, 1988. — WEISSKOPF V., *La Révolution des Quanta*, Paris, Hachette, 1989.

Gilles COHEN-TANNOUDI

→ Champ ; Électron ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Quantique.

EMBRYOGENÈSE

L'embryologie scientifique

L'histoire du regard que l'homme a porté sur l'embryon se résout à trois grandes étapes ayant chacune ses caractéristiques. Le savant a commencé par s'intéresser aux contours de l'embryon, il l'observe, le décrit succinctement et le dessine : cette première étape de l'embryologie se consacre à la représentation de l'embryon dans les différentes phases de son anatomie externe qui l'habillent au cours de son développement. Marcello Malpighi (1628-1694), auteur de *De formatione pulli in ovo* (1672), est un des représentants de cette époque dont les dates extrêmes, si nous prenons en compte les quelques observations d'Aristote sur différents embryons, vont de l'Antiquité à 1817.

Les savants de cette époque de l'embryologie ont formulé de nombreuses théories concernant la « génération » (fécondation, développement de l'embryon, hérédité). Ces théories particulières appartiennent à trois groupes théoriques principaux : l'épigénèse, la préformation et la préexistence des germes, ce dernier groupe, dont le fond répond principalement à une théologie dogmatique, restant limité dans le temps entre les années 1670-1820 (voir « Génération », *Dictionnaire européen des Lumières*, Paris, PUF, 1998). La deuxième période est celle où l'embryologiste pose d'une manière intensive son regard sur l'évolution de l'embryon pour étudier le développement des structures organiques dans des perspectives morphologiques et histologiques. Le contenu scientifique du terme embryogénèse correspond à la troisième période où la science de l'embryon devient expérimentale, dans les années 1880, après être passée par une phase descriptive et comparée exprimée dans les vocables d'embryogénie, d'ontogénie ou de morphogénie. L'embryologie, qui s'intéresse aux aspects théoriques et scientifiques du développement de l'embryon depuis la fécondation jusqu'à la naissance, devient une science à part entière dans les années 1820.

1) Avec les premiers travaux en 1817 de Christian Pander (1794-1865) qui découvre un « nouveau monde » par une étude fine des ébauches embryonnaires du poulet pendant les cinq premiers jours de sa formation et en déduira en 1817-1818 la première théorie des feuillettes embryonnaires dans lesquels sont « déterminés » les futurs organes. Ces feuillettes qui sont à la base de l'embryologie scientifique feront l'objet de nombreuses investigations en particulier de la part de Karl von Baer (1792-1876) en 1835 et sa notion de « feuillettes organes », Robert Remark (1815-1865) en 1850-1855, et Thomas Henri Huxley (1825-1895) en 1849-1869 ; ce dernier les nommant ectoderme, mésoderme et endoderme (entoderme), confirme une partie des observations de Remark qui ne cessent de se préciser : l'ectoderme fournit le système nerveux et la peau, le mésoderme les structures musculaires, osseuses et circulatoires, et l'endoderme l'appareil digestif et respiratoire. Cette histoire du développement (*Entwicklungsgeschichte*, 1817) correspond à l'embryologie scientifique et tient ses origines dans ces années 1820, constituant une première école autour de von Baer, Heinrich Rathke (1793-1860) et Johannes Müller (1801-1858).

2) Avec la découverte par Jean-Louis Prévost (1790-1850) et Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) en 1824 que les « animalcules spermatiques » fécondent les « œufs ». Ces deux premiers éléments de l'embryogénèse (ovule et spermatozoïde) seront, dans le contexte de la théorie cellulaire (1838), définis comme des cellules. Le mécanisme de la fécondation conduira les embryologistes vers les études cytologiques de ces débuts de l'embryogénèse, et la parthénogénèse expérimentale sera le modèle d'une première théorie de la fécondation (1900-1910).

3) Avec en 1827 la publication de la « Lettre sur la

formation de l'œuf dans l'espèce humaine et dans les mammifères » (*De ovi mammalium et hominis genese*, Leipzig, 1827) de von Baer qui découvre l'ovule chez les mammifères. Albert Kölliker (1817-1908), élève de J. Müller, qui reconnut à la suite de ses études sur les céphalopodes (1844) que les différents organes de l'embryon ont pour origine l'unique division de la cellule œuf, donna cette définition de l'ontogénie : « La science du développement des individus (ontogénie) a pour but d'exposer la formation graduelle, non seulement de chaque organisme composé dans son ensemble, mais encore celle de tous ses systèmes et organes jusqu'aux plus simples éléments, depuis leur première apparition jusqu'à leur entier achèvement, dans la somme de leurs rapports morphologiques, et d'établir les lois qui président à l'apparition des diverses unités morphologiques (lois histogéniques, organogéniques, ontogéniques) (A. Kölliker, *Embryologie ou traité complet du développement de l'homme et des animaux supérieurs*, trad. A. Schneider, Paris, C. Reinwald, 1882, 1^{re} éd., 1861, 2^e éd., 1878).

L'embryogénie aura sa grande période avec l'avènement du darwinisme (1859) à tel point que Maurice Caullery (1868-1958) considère en 1939 que l'essor de l'embryologie n'a eu lieu qu'après 1859 comme une conséquence de « l'impulsion donnée par la théorie de l'Évolution ». À la suite de cette symbiose disciplinaire entre l'ontogénie (histoire du développement des individus) et la phylogénie (histoire du développement des groupes), Ernst Haeckel (1834-1895) formule sa loi dite de « biogénétique fondamentale » résumée dans cette phrase lapidaire « *L'ontogénie est une courte récapitulation de la phylogénie* » (1866-1874). Les recherches des embryologistes descriptifs et comparatistes avaient conduit à la reconnaissance de structures similaires aux premiers stades du développement chez des embryons de groupes plus ou moins éloignés ; homologie des feuillettes embryonnaires de l'éponge à l'homme (« les mêmes organes fondamentaux se développent aux dépens de ces feuillettes » écrit Haeckel) ; déroulement des premiers mouvements cellulaires conduisant l'embryogénèse, dont celui de la gastrulation. T.H. Huxley (1858) avait montré que les méduses sont constituées dans leur forme adulte par les deux premiers feuillettes embryonnaires : les celentérés représenteraient un état embryonnaire par lequel passent obligatoirement tous les embryons des vertébrés. En 1865, Alexandre Kovalevski (1840-1901) démontre dans sa thèse que ce « prototype » des vertébrés, l'amphioxus (céphalocordé), a une ontogénèse comparable à celle des invertébrés et, en 1866-1867, il met en évidence que le développement des ascidies (urocordés) est identique à celui de l'amphioxus qui devenait le lien entre invertébrés et vertébrés : de ces découvertes, Constantin Dawydoff (auteur du premier grand *Traité d'embryologie comparée des invertébrés*, Paris, Masson, 1928) pensait que « depuis Darwin, rien de plus fondamental n'avait paru fortifier l'idée d'évolution ». C'est dans ce cadre conceptuel, en se fondant sur les bases de l'embryologie et de l'anatomie

comparée, que Haeckel forgea sa théorie de la « gastréa » (1874) dans laquelle il soutient la valeur de la gastrula comme unité embryologique et phylogénique.

Anton Dohrn (1840-1904), fondateur de la Station zoologique de Naples, institution qui joua un rôle important dans l'avancement de l'embryologie, travailla sur la généalogie invertébrés/vertébrés. Les deux ouvrages fondamentaux concernant cette période et la relation embryologie et évolution sont ceux de E. Haeckel *Anthropogénie ou histoire de l'évolution humaine* (1874, trad. C. Letourneau, 1877) et *Fir Darwin* (1864) de Fritz Müller (1821-1897) puis, plus tard, la « sourde révolte » de Sir Gavin-Rylands de Beer (né en 1899 ; *Embryologie et évolution*, 1829, trad. J. Rostand, 1932) ; pour De Beer et avant lui Walter Garstang et Thomas-Hunt Morgan (1866-1945) il n'y a pas dans l'ontogénèse récapitulation (Haeckel) mais répétition : les fentes branchiales de l'embryon humain ne récapitulent pas les fentes branchiales des poissons, mais reproduisent celles de « l'ancêtre », et dans le contexte de l'origine néoténique de l'homme (1926) de Lodewijk Bolk (né en 1866), ce n'est pas le fœtus humain qui rappelle celui du singe (Haeckel) mais c'est le fœtus du singe qui rappelle celui de l'homme. Toutefois, le concept haeckélien de la « gastréa » et la conception d'une embryologie évolutive seront développés entre autres par Auguste Prenant (1821-1927) dans ses *Éléments d'embryologie de l'homme et des vertébrés* (1891) marquant cet intérêt pour une embryogénie et une organogénie déjà évaluées dans l'ouvrage de Kölliker (*loc. cit.*), le *Traité d'embryologie et d'organogénie comparées* (1883) de Francis M. Balfour (1851-1882 ; trad. H.A. Robin & F. Mocquard, 1883-1885) et le *Précis d'embryologie* (1886) d'Oscar Hertwig (1849-1922, trad. L. Mercier, 1906). Wilhelm Preyer ouvre l'embryologie à la physiologie avec sa *Physiologie spéciale de l'embryon, recherches sur les phénomènes de la vie avant la naissance* (1884, trad. Dr Wiet, 1887) ; pour lui « la connaissance de la chimie biologique et de la physiologie de l'embryon est nécessaire pour la compréhension des fonctions de l'homme et des animaux après leur naissance » ; et c'est dans ce contexte initié par W. Preyer qu'Emmanuel Fauré-Frémiet (1883-1971) institue *La cinétique du développement* (1925) dont les objectifs étaient d'aborder « les problèmes de la forme spécifique et de l'hérédité » et que Jean Brachet développera son *Embryologie chimique* (1944). Cette embryologie des premiers temps, descriptive, voir cinématique (M. Caullery, 1939) quand Walther Vogt (né en 1888) suit les mouvements gastruléens grâce à des colorants vitaux déposés sur l'œuf (1925-1929), devient « dynamique » quand l'embryologiste est passé de la simple observation (morphologique, histologique, chimique) à l'expérimentation.

L'embryologie expérimentale

L'embryologie expérimentale n'a pris vraiment son essor qu'à partir de l'instant où une somme de

connaissances issue de l'embryologie descriptive pouvait servir de base aux problèmes posés et à l'interprétation des résultats expérimentaux. Nécessité aussi d'une connaissance de l'embryologie normale du matériel qui va servir aux expériences, car l'embryologie expérimentale va produire de l'anormal, du tératologique, mais ces monstres seront, pour les embryologistes, interprétés pour comprendre une « mécanique » du développement et non une tératologie ; l'anormal va permettre de comprendre le normal non seulement dans son dynamisme mais aussi dans son « hérédité ». C'est au sein de l'embryologie expérimentale que le débat théorique entre épigénèse et préformation prend toute son importance. Concernant le XIX^e s., l'idée de faire des expériences sur des œufs dans un programme scientifique remonte incontestablement à Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1772-1844) quand il désirait prouver que les monstres ne préexistent pas dans l'œuf mais qu'ils résultent de modifications du milieu ambiant qui trouble leur développement normal (1820-1826). Toutefois É. Geoffroy Saint-Hilaire restait dans le contexte d'une embryologie spéculative (l'embryon se développe à la suite d'actions centripètes et centrifuges) et ses résultats expérimentaux sont peu fiables. Camille Dareste (1822-1899) s'est inspiré du concept expérimental de Geoffroy et réussit à obtenir de nombreuses monstruosité ; il fondait une « tératogénie expérimentale » (1855-1895). Par cette méthode il met pour la première fois en évidence chez l'embryon de poulet que l'origine embryonnaire du cœur est double (1865-1866), après avoir observé des embryons à « deux cœurs » ; c'est le premier exemple expérimental expliquant le normal par l'anormal ; mais l'idée que poursuivait Dareste était de faire du transformisme expérimental (J.L. Fischer, 1994).

Ce sont deux biologistes suisses, Hermann Fol (1845-1892), déjà connu pour ses travaux sur la fécondation (1876), et Stanislas Warynski qui inaugurent une nouvelle méthode expérimentale, la « méthode directe » (1883-1885), différente de la « méthode indirecte » de Geoffroy et Dareste : ces derniers faisaient agir un facteur physique sur l'œuf entier de poule perturbant l'embryogénèse (asphyxie partielle de l'embryon en recouvrant la coquille par de la baudruche ou du vernis, refroidissement total de l'œuf) ; alors que dans la méthode directe l'expérimentateur agit directement sur une partie de l'embryon à l'aide d'un instrument (aiguille chauffée). Il y a une coupure conceptuelle entre les méthodes et les buts : pour Dareste le but consiste à répondre à la question touchant « l'origine des formes innombrables sous lesquelles la vie se manifeste à la surface de notre planète » ; alors que Fol et Warynski, se maintenant sur le terrain de « l'embryogénie expérimentale et analytique », désirent « apprendre à connaître certains facteurs organogénétiques, en les isolant par une expérimentation soignée ». Si c'est dans le champ conceptuel du mutationnisme que l'œuvre de Dareste peut servir de jalon, c'est bien dans celui de l'embryologie expérimentale que s'ouvrent les expérimentations

des biologistes suisses : 1) par la précision et l'inauguration d'un geste direct sur l'embryon visant à perturber son développement ; 2) par la répétition du geste expérimental et une prévision des résultats permettant une possible analyse et interprétation des phénomènes observés. Aussi pouvons-nous dater la naissance de l'embryologie expérimentale pendant les années 1883, 1885 et 1887 : 1883 correspondant aux premiers travaux de Fol et Warynski ; 1885, avec le manifeste de Wilhelm Roux (1850-1924) « *Beitrag zur Entwicklungsmechanik des Embryo* », fondant la « mécanique du développement » (*Entwicklungsmechanik*), Roux emprunte le concept de « mécanique » à la philosophie de Kant ; et 1887, date de la publication de la thèse de Laurent Chabry (1855-1893) « *Embryologie normale et tératologique des Ascidies simples* ». La thèse de L. Chabry a joué un rôle important dans le développement de la nouvelle embryologie en raison de sa méthode expérimentale et des extrapolations théoriques qu'elle a provoquées dans la communauté embryologique. W. Roux en 1885 propose sa théorie de la « mosaïque » qu'il définit ainsi : « Le but de la segmentation est de séparer les matériaux qualitativement différents contenus dans le noyau » ; c'est une théorie inspirée du « principe de la région organogène du germe » (1874-1875) de Wilhelm His (1831-1904). C'est le noyau que Roux considère comme une mosaïque dans la mesure où ses expériences de 1885 lui avaient montré que l'on peut soustraire de l'œuf de grenouille 1/5 à 1/4 de son cytoplasme sans que le développement de l'embryon soit altéré. Mais aucune expérience décisive n'avait apporté une preuve à cette théorie de la mosaïque.

C'est Chabry qui découvre un premier modèle expérimental démontrant que l'œuf d'ascidie se comporte comme un système mosaïque (1887). L'intérêt que l'on portait dans ces années 1880 à l'étude de la destinée des blastomères dans l'ontogénèse avait conduit Chabry à effectuer des recherches sur ce thème sous la direction de Georges Pouchet (1833-1894). La finalité de ces recherches était de reconstituer l'arbre généalogique des cellules embryonnaires : c'est la conception de la « Phylogénie cellulaire » de G. Pouchet (1875) et des « Lignées cellulaires » de L. Bard (1886). L'observation d'œufs anormaux et de larves d'ascidies tératologiques, par Chabry, le conduisit à vouloir reproduire ces défauts embryologiques par des expériences. Il invente un « micromanipulateur » muni d'une aiguille de verre extrêmement fine (il invente le principe de la microforge pour fabriquer ses aiguilles placée sous un microscope (objectif $\times 300$) pour tuer par piqûre un des deux ou quatre premiers blastomères de l'œuf d'ascidie (160 μ de diamètre). Suivant les blastomères détruits, Chabry note l'absence de structures chez les larves indiquant une prédétermination organique dès que l'œuf entame sa première division. La mort d'un blastomère au stade II conduisit le blastomère restant à donner une demi-larve. Chabry apportait la preuve expérimentale de l'anisotropie de l'œuf mais « la méthode du traumatisme cellulaire ne doit pas, en effet,

conduire toujours aux mêmes résultats et tandis que plusieurs personnes pourraient voir dans mes expériences la preuve décisive que l'animal est préformé dans l'œuf et chaque partie de l'animal préformée dans une partie de l'œuf, je tiens à éloigner cette conclusion trop absolue. C'est en raison de son idéologie politique que Chabry apporte des réserves à un système biologique contraignant et s'opposant à la liberté de l'individu. Toutefois, il conclut : « Toutes les expériences, toutes les mutilations qu'on fait subir à un œuf normal, contribuent, en effet, à dévoiler sa structure, et c'est certainement là une des plus belles recherches que le naturaliste puisse proposer. »

Dès 1888, W. Roux s'applique, à l'aide d'une aiguille chauffée, à tuer un des deux premiers blastomères de l'œuf de grenouille : il obtient des embryons moitié moindres que les embryons normaux mais parfaitement constitués. Ce résultat s'opposant à la théorie de la mosaïque, Roux invente pour le rendre plausible le concept de la « postgénération » : la moitié manquante de l'embryon s'est régénérée par un processus histogénétique particulier. C'est Hans Driesch (1867-1941) qui en 1892-1893 apporte la preuve expérimentale que l'œuf d'oursin est isotrope : aux stades II ou IV, un blastomère isolé produit une larve (plutéus) normale. Les résultats expérimentaux de ces années 1887-1893 ont sollicité les embryologistes à mettre en place un débat théorique de la plus haute importance entre les théories de l'épigénèse et de la préformation désignées parfois par néo-épigénèse et néo-préformation. Aussi dès 1894 Oscar Herwig (1849-1922) posait-il la question : « Problème biologique d'actualité : Préformation ou Épigénèse ? » Dans ce champ conceptuel, les expériences de Chabry seront interprétées de trois façons différentes : 1) dans le cadre de l'épigénèse et de l'isotropie de l'œuf (régulation) (H. Driesch et O. Hertwig, 1894) ; 2) dans le cadre de la préformation et de l'anisotropie de l'œuf (mosaïque) (Chabry, 1887, et D. Barfurth, 1893) ; 3) dans celui de la mosaïque et de la postgénération (W. Roux, 1892).

Ces interprétations opposées d'un même résultat montrent que le choix théorique dépassera le simple fait scientifique pour faire appel à des conceptions idéologiques, philosophiques et politiques. Également appelée « physiologie du développement » (H. Driesch, 1894), « biomécanique » (Y. Delage, 1895), « embryologie causale » (A. Brachet, 1917), expressions visant à remplacer celle de W. Roux (1885) de « mécanique du développement », l'embryologie expérimentale embrasse dès ses débuts les problèmes d'une biologie du développement et ceux d'une hérédité ; ces derniers feront plus généralement l'objet d'une science qui sera fondée en 1906 et nommée la génétique (W. Bateson). Avec la découverte du phénomène de « régulation » chez l'oursin, Driesch formule que la « valeur présomptive » des ébauches (*prospektive Bedeutung*, potentialité réelle de A. Brachet, 1927) se transforme en une autre faculté (*prospektive Potenz*, potentialité totale de A. Brachet, 1927) dans le cas où les expériences démontrent que l'œuf répare les dommages produits par

l'expérimentateur ; et Albert Dalcq (1893-1973) va « liquider » la « déplorable illusion de la mosaïque » après avoir démontré (1932) par la technique de la mérogonie de Delage (1899), consistant à féconder un fragment du cytoplasme ovulaire dépourvu du noyau, que l'œuf d'ascidie, tenu pour l'un des exemples types de l'œuf anisotrope, régle. A. Dalcq insistera sur la complémentarité de l'épigénèse et de la préformation : « Tout en soulignant l'importance de l'épigénèse, elle souligne la nécessité d'un minimum de préformation » (1935), conception farouchement critiquée par le néolamarckien Paul Wintrebert dans *Le développement du vivant par lui-même* (Paris, Masson, 1963).

La régulation, « un des traits originaux et troublants, présentés par les êtres vivants », fera l'objet de nombreux travaux qui vont définir une régulation des déficiences (réparation lors de l'ontogenèse des perturbations provoquées par l'expérimentateur sur l'œuf) et une régulation des excédents (assimilation d'un matériel excédentaire greffé sur l'œuf) ; parmi d'autres, les écoles de Sven Hörstadius en Suède des années 1928 à 1953 et celle d'Étienne Wolff en France entre 1936 et 1970 en fournissant de nombreux exemples. É. Wolff (1904-1996) fut à l'origine d'une école qui se consacra à l'étude et aux recherches expérimentales sur l'embryon d'oiseau. Pour lui, « l'œuf contient en puissance tout le passé, tout l'avenir de l'individu, tout l'avenir de l'espèce et peut-être toute l'évolution future du groupe auquel il appartient. Il est un comprimé de virtualité » (Leçon inaugurale de la chaire d'embryologie expérimentale du Collège de France, 6 déc. 1955). Il a marqué l'embryogenèse dans trois aspects concernant le développement de l'embryon : 1) il a été l'un des premiers, avec A. Ginglinger, à montrer le rôle morphogène des hormones sexuelles sur le système génital de l'embryon de poulet en 1935 (obtention d'embryons intersexués et transformation statistique de mâles en femelles après traitement des embryons à la folliculine) ; la même année, l'équipe américaine composée de D.H. Willier, T.F. Gallagher et F.C. Koch arrivait à des résultats identiques ainsi que V. Dantchakoff en Lituanie. Ces recherches furent poursuivies chez les amphibiens par E. Padoa (1936-1940) en Italie, L. Gallien (1937-1950) en France, R.K. Burns (1938-1939) et E. Witschi (1939) aux États-Unis ; et chez les mammifères pour la première fois par V. Dantchakoff (1936) (Lituanie), A. Raynaud (1939-1941) (France) et par R.K. Burns (1939-1950) (États-Unis). Les travaux de ces embryologistes apportaient une preuve expérimentale au dualisme sexuel de l'embryon des vertébrés et soulevaient le problème entre l'interaction génétique, l'action de substances protéiques et l'action d'une substance chimique (les hormones sexuelles stéroïdes) sur la différenciation sexuelle. Wolff défendait la théorie suivante : le sexe est génétiquement déterminé dès la fécondation et sa différenciation primaire mâle ou femelle a lieu précocement par l'action des hormones sexuelles qui poursuivent après la naissance leur action dans le développement des caractères sexuels secondaires

(barbe chez l'homme, crinière chez le lion, seins chez la femme, mamelles chez la lionne). Emil Witschi, l'un des pionniers de l'embryogenèse sexuelle, à la suite de ses expériences de parabiose chez les amphibiens (1921-1931), soutenait la théorie des substances protéiques inhibant ou favorisant la différenciation et le développement des structures primaires du sexe (cortéxine + et - ou médullarine + et -), les hormones sexuelles n'intervenant que dans l'expression des caractères sexuels secondaire. Des recherches ont montré la valeur de la théorie de Wolff par la mise en évidence d'une synthèse précoce d'hormones stéroïdes chez l'embryon d'oiseau (A. Guichard, K. Haffen, D. Scheib). 2) Dans sa thèse *Les bases de la tératogénèse expérimentale des vertébrés amniotes d'après les résultats de méthodes directes* (1936) É. Wolff apportait un modèle expérimental riche dans l'étude de l'embryogenèse quand, supprimant une ébauche organique à l'embryon, on étudie ensuite son développement. 3) Mettant au point en 1951 avec K. Haffen la culture organotypique sur milieu solide il élaborait un second modèle permettant d'étudier le développement de structures embryonnaires isolées de l'embryon. Ces dernières recherches l'ont conduit avec son équipe à l'étude de culture de tumeurs cancéreuses humaines à partir de 1958, reliant ainsi des problèmes fondamentaux de l'embryologie (croissance et organisation cellulaires) avec ceux de la cancérologie.

Parmi les intérêts portés par les embryologistes à l'embryogenèse il y a celui des migrations cellulaires qui sont à l'origine de processus morphogénétiques et histogénétiques ; dans ce domaine, Nicole Le Douarin, de l'école d'É. Wolff, est à l'origine d'une dynamique internationale de recherche depuis la découverte et la mise au point en 1969 du « marquage biologique » fourni par les cellules de cailles dont la particularité de leur noyau interphasique offre la possibilité de les distinguer des cellules de l'hôte quand elles sont greffées (greffe de crête neurale) sur l'embryon de poulet : « La possibilité de reconnaître les cellules greffées de celles de l'hôte permet de suivre la migration des cellules de la crête neurale au cours de l'ontogenèse et de découvrir à quelle structure elles donnent naissance chez l'adulte » (N. Le Douarin, « Les migrations cellulaires dans le développement du système nerveux périphérique », *Le courrier du CNRS*, n° 55-56, avril-juin, 1984, p. 25-33). La réalisation par les embryologistes de chimères embryologiques de structures spécifiques incompatibles dans l'ordre naturel (par ex. caille/poulet) a posé la question de la réalisation et de l'expression du soi (N. Le Douarin et A. Maclaren 1984).

Pour Weismann le développement embryonnaire se faisait par une spécialisation nucléaire due à la répartition pendant les divisions cellulaires du matériel contenu dans le premier noyau issu de la fécondation. Au contraire Y. Delage, qui croyait à une « totipotence », notait en 1903 : « Tout noyau, au moins au début de l'ontogenèse, est un noyau de cellule sexuelle, et si l'on pouvait, sans rien altérer, substituer au noyau

de l'œuf celui d'une cellule embryonnaire quelconque, on verrait sans doute cet œuf se développer sans changement » (*L'hérédité et les grands problèmes de la biologie générale*, Paris, Schleicher, 2^e éd., 1903, p. 798). Cette expérience de transplantation nucléaire ne sera réalisée qu'en 1952 par deux biologistes américains, Robert Briggs et Thomas J. King. Ces recherches d'une grande portée pour l'étude de la différenciation cellulaire ouvraient la voie vers la création et l'étude des clones dont le dernier avatar a été la « fabrication » de la brebis « Dolly » ; mais les implications de cet exploit de la biotechnologie dépassent les seules sphères des recherches embryologiques (« Le dossier scientifique de Dolly », *La Recherche*, n° 297, avril 1997, p. 50-63).

Les études touchant au concept de régulation ont conduit aux notions de champs morphogénétiques et de gradients (T. Boveri, 1901-1910 ; C.M. Child, 1929). Le concept de « potentiel morphogénétique » de Dalcq et Pasteels (1937) reprend ces notions dans une formulation quantitative puis qualitative par Dalcq (1952). Ces notions ne purent être vraiment débattues qu'après le grand événement de l'embryologie causale produit avec la découverte (1921-1924) du centre organisateur de laèvre dorsale du blastopore et la mise en place du concept d'induction provoquant la différenciation de territoires compétents par Hans Spemann (1869-1941 ; prix Nobel en 1935) et Hilde Mangold (1898-1924). Les recherches sur la fécondation ont connu une phase active entre les années 1899 et 1910 avec la pratique et l'analyse de la parthénogenèse expérimentale. Jacques Loeb (1859-1924) réussit pour la première fois la parthénogenèse chimique chez l'oursin (1899-1900) ; ses expériences qui vont poser des questions sur le statut du « citoyen chimique » seront le ferment qui va inciter de nombreux embryologistes à se lancer dans cette voie de recherche, parmi lesquels Eugène Bataillon (1864-1953) qui obtient les premiers résultats de parthénogenèse expérimentale chez un vertébré (parthénogenèse traumatique chez la grenouille, 1910-1911). Bataillon précisera la théorie de Loeb en formulant la théorie de la fécondation dans ses deux phénomènes essentiels à la survie de l'ovule et à la mise en route de sa division cellulaire : l'activation et la régulation. Le développement de l'embryon a été défini, dans les « théories micromériques », comme étant l'expression de particules contenues dans le noyau et les chromosomes. La plus célèbre de ces théories (1892) est celle d'Auguste Weismann (1834-1914) et de l'idioplasma se décomposant en idantes (chromosomes), ides, déterminants et biophores ; ce sont ces particules représentatives que O. Hertwig nomme « idioplastes » à propos desquels il écrit : « Pour me servir de deux métaphores, je dirai que les idioplastes sont comparables aux lettres de l'alphabet qui, peu nombreuses cependant, forment, en se combinant différemment, des mots qui, à leur tour, en se combinant différemment, forment des propositions de sens différents. Les idéoblastes sont encore comparables aux sons, qui engendrent des harmonies si diverses en se succédant ou en se combinant » (1892 :

La cellule et les tissus, trad. C. Julin, Paris, Georges Carré, 1894). La notion de « gènes » dans le contexte de la génétique ne sera qu'une transposition de ces concepts particuliers ; aussi l'embryologiste Thomas-Hunt Morgan (1866-1945) devenu généticien ne manquera-t-il pas de promouvoir la symbiose des deux disciplines dans son ouvrage *Embryologie et Génétique* (1934 : trad. J. Rostand, Paris, Gallimard, 1936).

Toutefois, ce n'est qu'à partir des années 1980-1985 qu'une génétique du développement s'établit avec force et dont les origines se trouvent chez Alfred H. Sturtevant (1929-1932), Curt Stern (1936), Conrad Waddington (1938) puis avec les travaux effectués par Edward Lewis en 1972-1973 (prix Nobel 1995) et par son école sur le complexe « bithorax » (groupe de gènes « homéotiques » de la drosophile), avec la découverte des gènes qui initient la segmentation de l'embryon par C. Nüsslein-Volhard et E. Weischaus (1980 ; prix Nobel 1995 ; « Mutations Affecting Segment Number and Polarity in Drosophila », *Nature*, 1980, vol. 287, p. 795-799) ; et celle de la séquence *homeobox* par W.J. Gehring (« The homeo box : a key to the understanding of development ? », *Cell*, 1985, t. 40, p. 3-5). Les problèmes posés par la symétrisation de l'œuf (axes de polarisation dorso-ventral et céphalo-caudal) sont aussi vieux que l'embryologie scientifique : règle de K.E. von Baer (1828-1837), travaux de W. Roux (1883-1887), expériences de P. Ancelet et P. Vintemberger (1938) ; et la génétique du développement vient de consacrer de nombreux travaux à la connaissance des gènes impliqués dans l'établissement des axes de polarité embryonnaires initiant l'organogenèse de l'individu. La ressemblance entre les gènes des complexes « HOM » chez les invertébrés et « Hox » chez les vertébrés, l'ancienneté du système HOM/Hox estimé à 600 millions d'années, incitent les généticiens du développement à rechercher d'autres gènes régulateurs car « l'étude de ces nouveaux gènes et de leurs interactions avec le système HOM/Hox éclairera les mécanismes du développement et l'évolution de ces architectes moléculaires de l'organisation corporelle des animaux » (W. McGinnis et M. Kuziora, Les gènes du développement, *Pour la Science*, dossier L'évolution, janvier 1997, p. 126-132).

Alors que les embryologistes depuis les années 1920-1930 s'activaient à rechercher des substances spécifiques responsables de l'embryogenèse (organisine), [« contagion métabolique » de J. Pateels (1939), « chimio-différenciation » de A. Dalq (1941)], les résultats de la technologie de la génétique moléculaire appliqués à la compréhension du développement conduisent C. Nüsslein-Volhard à cette conclusion que « d'ores et déjà, on a éclairci l'un des plus grands mystères de la nature : comment la complexité émerge de la simplicité originelle » (1996). Les généticiens du développement redonnent dans leurs travaux une portée et un intérêt dans la recherche des relations entre ontogenèse et phylogenèse, rappelant les grands moments de l'embryogénie des années 1860-1870 ; aussi n'hésitent-ils pas à évoquer, dans des raccourcis quelque peu

discutables, des « précurseurs » tels qu'Étienne Geoffroy Saint-Hilaire et Ernst Haeckel. La génétique du développement a fait redécouvrir les grands débats théoriques et philosophiques du XIX^e s. du concept d'unité de plan, de plan d'organisation et de recapitulation, que le philosophe Paul Janet (1823-1899) définissait dans *Les causes finales* comme appartenant à la « finalité de plan ».

Si nos connaissances sur l'embryogenèse nous conduisent à nous interroger et à réfléchir sur nos origines dans une rationalité scientifique, elles nous ouvrent aussi un domaine de réflexions dans le champ intellectuel de la philosophie. La connaissance de l'embryogenèse chez les vertébrés et de l'environnement physiologique et hormonal qui accompagne les événements biologiques de la maturation des cellules sexuelles, de la fécondation, de la nidation de l'embryon et de son développement, a permis d'appliquer à l'homme dans un contexte biomédical une méthodologie qui avait été expérimentée chez l'animal : insémination artificielle, fécondation *in vitro*, transfert d'embryon. C'est en Angleterre à l'hôpital d'Oldham, le 25 juillet 1978, qu'est né le premier « bébé éprouvette », Louise Brown. Le premier « bébé éprouvette », français, Amandine, voit le jour le 24 février 1982, à l'hôpital Antoine Béclère de Clamart ; l'équipe responsable de cette naissance était composée par deux médecins, René Frydman et Émile Papiernick, et un biologiste Jacques Testart. Le passage de la recherche fondamentale en embryogenèse à la pratique biomédicale, ce nouveau pouvoir de l'homme sur l'embryon dans « L'art de faire autrement des enfants comme tout le monde » (R. Frydman, 1994) n'allait pas sans soulever de nombreux problèmes et poser de nombreuses questions au politique et à l'éthique. Chez l'homme l'embryogenèse débute par la fécondation qui est le résultat d'un acte sexuel. Or, depuis les années 1980, avec la pandémie du sida et la mise en place d'une procréation médicalement assistée (PMA) devenue une assistance médicale à la procréation (AMP) depuis 1994, l'humanité se trouve confrontée à une sexualité sans procréation et à une procréation sans sexualité (J.L. Fischer, 1996).

► BALAN B., *L'ordre et le temps*, Paris, Vrin, 1979. — CAULLEY M., *Les progrès récents de l'embryologie expérimentale*, Paris, Flammarion, 1939. — DALCQ A., *L'œuf et son dynamisme organisateur*, Paris, Albin Michel, 1941. — DENIS H., « Cytosquelette et polarité ovulaire », *Médecine/Science*, t. 12, 1996, p. 1145-1158 ; « Déterminants et polarité embryonnaire », *ibid.*, t. 12, p. 1281-1292. — DENIS H. & COLLENOT A., « La théorie des feuillettes : implications embryologiques et évolutives », *Médecine/Sciences*, t. 11, 1995, p. 1581-1593 ; « Taxinomie et embryologie : une connexion ancienne et fructueuse », *ibid.*, p. 1695-1706. — DELSOL M. dir., *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 1994, t. 119, n° 2, p. 99-158 (« Embryologie et évolution », table ronde organisée le 10 décembre 1992). — FISCHER J.L., « Experimental embryology in France (1887-1936) », *The International Journal of Developmental Biology*, vol. 34, 1990, p. 11-23 ; *La naissance de la vie, une anthologie*, Paris, Presses-Pocket, 1991 ; « Sexualité et procréation : problème de frontière », *Médecine/Science*, 1996,

n° 220, p. 2-8. — FRYDMAN R., *L'art de faire autrement des enfants comme tout le monde*, Paris, Robert Laffont, 1994. — GALLIEN L., *Problèmes et concepts de l'embryologie expérimentale*, Paris, Gallimard, 1958. — HORDER T.J., WITKOWSKI J.A. & WYLIE C.C. éd., *A history of embryology*, Cambridge Univ. Press, 1985. — LE DOUARIN N., *The Neural Crest*, Cambridge Univ. Press, 1982. — LE DOUARIN N. & MACLAREN A., *Chimera in developmental biology*, Orlando, Academic Press, 1984. — OPPENHEIMER J.M., *Essays in the History of Embryology and Biology*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1967. — SANDER K., COUNCE S.J., FÄSSLER P.E., FISCHER J.L. & NÖBLER-JUNG K., *Landmarks in Developmental Biology 1883-1924*, Berlin, Verlag, 1997. — TESTART J., *L'œuf transparent*, Paris, Flammarion, 1986. — WOLFF E., *Les chemins de la vie*, Paris, Hermann, 1963.

Jean Louis FISCHER

→ Cellule ; Clonage ; Darwinisme ; Développement ; Évolutionnisme ; Gène ; Haeckel ; Hybride ; Loi biogénétique fondamentale ; Monstre.

EMPIROCITICISME → Empiriomonisme ; Empirisme ; Espace : la critique de Mach

EMPIRIOMONISME

À partir de 1904, date à laquelle est publiée la première partie de *l'Empiriomonisme*, l'œuvre de Bogdanov tout entière s'organise autour de quelques thèses fondamentales qui resteront caractéristiques de sa philosophie. Ces thèses que Lénine combat dans *Matérialisme et Empirio-criticisme* se résument toutes à un emprunt à la doctrine alors en vogue du physicien autrichien Ernst Mach ; doctrine qu'on a coutume de désigner sous le nom d'« empirio-criticisme », bien que Mach ne fit pas lui-même usage de ce terme.

La philosophie de Mach se présentait comme une réponse, étayée sur des résultats obtenus en psychophysologie, à l'état de crise dans lequel on affirmait qu'était entrée la physique à la suite de la formulation du second principe de la thermodynamique ; elle dévotait une théorie générale de la connaissance et de l'histoire des sciences. Elle se faisait fort de libérer les sciences de l'illusion métaphysique majeure qui avait encombré les physiciens, la distinction philosophique de la matière et de l'esprit. À cette distinction il prétendait être en mesure de donner congé. Les résultats de ses travaux sur *l'Analyse des sensations* l'autorisaient, selon lui, à soutenir que toute sensation est le résultat d'une composition plus ou moins complexe d'« éléments » dont il serait vain de vouloir dire s'ils sont « physiques » ou « psychiques », s'ils relèvent de la « matière » ou de l'« esprit », car ils sont « neutres ».

C'est ainsi que Mach, en présentant sa philosophie comme « la philosophie des sciences contemporaines de la nature » pouvait prétendre avoir surmonté pour son propre compte l'opposition philosophique fondamentale du matérialisme et de l'idéalisme : la question du primat de la matière sur la pensée, ou de la pensée sur la matière, ne se posait plus dès lors qu'on a repéré

l'élément commun, indéterminé qui constitue l'horizon ultime de toutes nos connaissances.

Puisque cette philosophie « réconcilie » le matérialisme et l'idéalisme, comme Bogdanov, elle s'avère compatible avec le matérialisme de Marx. Or, la conjoncture scientifique impose de « rajeunir » la philosophie marxiste si l'on veut qu'elle puisse rendre compte des derniers résultats obtenus dans les sciences de la nature. Il faut donc suivre hardiment le mot d'ordre d'Engels selon lequel « à chaque grande découverte scientifique le matérialisme doit changer de forme », et ne pas hésiter à le « marier » à l'empirio-criticisme.

C'est sur ce point que Lénine l'attaque en 1909 : la division de la philosophie entre deux tendances est éternelle, rappelle-t-il en s'appuyant lui aussi sur Engels, parce qu'elle est, en dernière analyse, fondée sur la division en classes de la société. Mach n'a donc nullement, quoi qu'il en dise, mis fin au conflit du matérialisme et de l'idéalisme. En réalité, ce physicien cherche à brouiller les cartes et à dissimuler son ralliement à la tendance idéaliste de l'histoire de la philosophie dont il se contente de reprendre les thèmes les plus éculés sous un vocabulaire moderniste d'apparence scientifique. Sa philosophie n'est nullement fondée sur les résultats des sciences contemporaines, elle est au contraire incompatible avec leur tendance dominante, affirme Lénine, et doit être tenue pour responsable, avec les autres variantes de la philosophie idéaliste qui y concourent, du prétendu « état de crise » de la physique, lequel n'est jamais que la crise philosophique de quelques physiciens à l'occasion d'une mutation révolutionnaire de leur savoir. Et pour achever sa démonstration, Lénine s'appliquait à démontrer qu'à l'inverse, les thèses fondamentales du matérialisme dialectique pouvaient aider les physiciens à formuler de nouveaux concepts, en leur permettant de résister aux empiétements de la philosophie idéaliste dans leur pratique.

Mais il est un aspect du système que Lénine est amené à passer sous silence : celui par lequel ce « disciple russe de Mach » déclare se séparer de son maître. Car si Bogdanov n'a jamais manqué de reconnaître sa dette, il n'a jamais accepté non plus de se dire « machiste ».

C'est par son « monisme » que Bogdanov réfléchit la différence propre de son système par rapport à celui de Mach. Ce thème du « monisme » lui vient de loin : de ses premières options philosophiques qu'il rattache fort justement au « matérialisme des sciences naturelles » dont il fut d'abord l'adepte et dont il ne cessa par la suite de subir l'emprise. Le monisme était en effet l'emblème philosophique et, pourrait-on dire, le « slogan » des naturalistes, adeptes et vulgarisateurs du darwinisme qui avaient trouvé dans la théorie de l'évolution des arguments antireligieux (voire anticléricaux) et antimétaphysiques. Tout dans la nature pouvait être expliqué comme une propriété de la matière, sans qu'on ait nul besoin d'avoir recours au moindre élément transcendant. Ils adhéraient, selon eux, à la célèbre maxime du médecin idéologue français Cabanis : « Le cerveau sécrète la pensée

comme le foie sécrète la bile. » De ce monisme, Bogdanov retient le projet de présenter dans sa philosophie (l'empiriomonisme) un « tableau général du monde » reposant sur un seul principe d'explication en partant d'une unique origine des êtres et des choses. En vertu de ce présupposé, il entreprend la critique de la notion empiriocriticienne d'expérience, coupable à ses yeux de rester entachée de dualisme.

Mach, explique-t-il, était sur la bonne voie lorsqu'il faisait apparaître, avec sa notion d'« élément », l'indifférenciation première du « physique » et du « psychique ». Mais il s'est arrêté en chemin et en est resté, victime de son positivisme, à un point de vue étroitement descriptif, lequel constate le fait sans chercher à en expliquer le pourquoi, et laisse ainsi échapper le principe de l'unité de la matière et de l'esprit. Bogdanov s'attaque donc à la question du « pourquoi », et modifie en conséquence la notion « machiste » de l'expérience en la déterminant comme « expérience de travail ». Point névralgique de son système où se nouent, sans qu'on puisse encore le deviner dans l'*Empiriomonisme*, les raisons de sa fortune politique ultérieure. Cette rectification de la thèse de Mach s'avère en effet lourde de conséquences, car elle introduit dans le système de Bogdanov un élément de déséquilibre interne qui ne cessera, jusqu'à la *Tectologie*, de développer ses effets opposés.

L'introduction de la notion de « travail » comme origine de l'expérience entre en effet brutalement en conflit avec les bases mêmes de l'empiriocriticisme, lequel repose sur une conception sensualiste de l'expérience conçue comme complexe de sensations et considérée comme son triomphe philosophique et sa garantie scientifique d'avoir pu dégager la notion d'élément d'une pure analyse des sensations simples. Tenir cette « analyse » pour insuffisante c'est bien contrevenir au principe de l'empiriocriticisme. Aussi, en un sens, Bogdanov n'a-t-il pas eu tort de s'irriter qu'on ait voulu assimiler purement et simplement son système à la philosophie de Mach.

Par la construction, inédite, de la notion d'« expérience de travail », je me donne les moyens, explique-t-il, de fonder ma doctrine sur le « matérialisme social » de Marx, c'est-à-dire la théorie scientifique du développement historique des formes du travail. En introduisant ainsi la notion de travail comme base de sa conception de la connaissance, il s'engageait sur une voie qui aurait pu le mener à affirmer, en bonne logique matérialiste, le primat de la pratique sur la théorie. Mais il aurait alors été contraint d'abandonner la catégorie empiriste de l'expérience dont il était parti.

Bogdanov, « oubliant » sa philosophie machiste, s'est par la suite laissé porter à maintes reprises par cette tendance de son dispositif théorique. En témoignent les analyses concrètes qu'il consacre à l'histoire des sciences, notamment à celle de l'astronomie ; ou ses analyses critiques de la division capitaliste du travail scientifique : des pages dont on a pu, à bon droit, souligner l'étonnante actualité du point de vue de la sociologie des sciences.

Mais s'il oublie ainsi à l'occasion sa référence philosophique de base, Bogdanov n'y renonce pourtant jamais. Résultat : ce théoricien qui se proclame marxiste et qui a écrit la préface à la première édition russe du *Capital* (1909) pense la notion de travail non plus dans les termes marxistes classiques d'un procès de travail inséré dans un procès de production marqué par la lutte des classes mais dans ceux d'un processus biologique d'adaptation de l'organisme au milieu. Chez lui, dans l'expression « expérience de travail », c'est en définitive toujours le mot d'« expérience » qui porte l'accent théorique principal.

Quelle est, demande-t-il, l'« âme » de la science ? Ce sont ses méthodes. « Les méthodes de la science, c'est-à-dire les moyens grâce auxquels elle élabore la vérité, sont l'âme de la science, la base de son œuvre. » Or, ces méthodes, dans leur apparente diversité, peuvent toutes être réduites à une méthode fondamentale : l'induction. Mais quelle est l'origine de l'induction ? demande Bogdanov. C'est la réponse adaptative de l'organisme au milieu qui, dès le simple mouvement réflexe, procède à ce qu'il appelle une « généralisation pratique ». Cette généralisation qui reste embryonnaire chez l'animal connaît chez l'homme un extraordinaire développement du fait qu'il s'agit d'« un être de travail » qui doit agencer des moyens à une fin...

Pour expliquer le passage de la généralisation pratique à la théorie, on voit alors Bogdanov s'ingénier à agencer une théorie de l'origine commune du langage et de la pensée à partir de l'acte de travail. S'appuyant sur les travaux du philologue moniste allemand Noiré — le « génial Noiré », « un marxiste en philologie sans le savoir » —, il défend l'idée que tout mot est toujours déjà initialement « mot-concept » sous la forme rudimentaire d'une « interjection de travail », laquelle constitue « la désignation compréhensible de l'acte de travail auquel elle se rapporte et qui est naturelle à tous les membres de la collectivité ». D'où il tire, pour finir, que, « puisque le mot original signifie une action, une série de mots constituait déjà une règle technique ». Il n'y a plus dès lors qu'à décrire le développement de la lutte de l'homme contre le milieu pour passer d'un degré inférieur de la généralisation au degré supérieur ; et la science apparaît ainsi comme le terme ultime d'une série d'efforts continue et progressive.

D'où la thèse doublement antidialectique de Bogdanov qui veut que « pensée ordinaire » et « pensée scientifique » soient de même essence, qu'il n'y ait entre elles nul « saut » et que « la pensée scientifique ne se différencie que par un côté plus organisé, c'est-à-dire en rejetant systématiquement tout ce qui est contradictoire ». De cette thèse on ne peut tirer que des conclusions épistémologiques relativistes sur le statut des vérités produites par la science. Bogdanov écrit : la notion de « vérité objective » est un « fétiche » (métaphysique) ; la science, elle, n'a jamais produit que des « vérités d'époque ». Et lorsque Plekhanov, gardien du dogme, lui rappelle sans ménagement qu'Engels a écrit exactement le contraire et a soutenu

que les vérités scientifiques sont des vérités objectives, il se rebiffe, crie à l'objectivisme bourgeois, maintient que sa propre position est marxiste et tente de prouver qu'Engels n'a pas pu penser ce qu'il a écrit ! Tant il est vrai que, pour lui, la seule définition marxiste de la science est celle qu'il a donnée, celle qui a rétabli la continuité du lien entre le travail et la science : « La science est l'expérience collective de travail organisée. » D'où se déduit immédiatement la définition de la vérité comme « forme organisante de l'expérience », évidemment soumise à la relativité historique des « données » de cette « expérience ».

Cette position philosophique a fait de Bogdanov le premier tenant de la théorie des « deux sciences » — bourgeoise et prolétarienne. Si l'âme de la science, ce sont ses méthodes, si ces méthodes peuvent toutes être ramenées comme à leur origine à des méthodes de travail, le développement de la science doit être rapporté à celui des méthodes de travail. Or, Bogdanov, malgré son marxisme affiché, réduit le procès de production à un agencement progressivement perfectionné des seuls éléments matériels des forces productives, le degré de perfectionnement — d'« organisation » — de ces éléments exprimant celui de l'adaptation de l'homme au milieu. La référence à Darwin ne saurait masquer qu'il ne s'agit ici que d'un évolutionnisme vague appelé à justifier la thèse continuiste et téléologique de Bogdanov sur l'histoire des sciences : « Une chaîne ininterrompue de développement qui va des procédés organisationnels élémentaires de travail aux sommets des méthodes scientifiques. »

Cette thèse prend place dans la philosophie de l'histoire que construit Bogdanov à partir de l'*Empiriomonisme* : une philosophie évolutionniste de type quasiment spencérien. Amputant le concept de « forces productives » de son élément social-humain — la force de travail — et annulant ainsi la différence propre qui sépare ce concept de toute notion techniciste de la technique, Bogdanov réduit les rapports de production à de purs rapports techniques d'organisation du travail. Dès lors, dans son tableau du monde, ce n'est plus, comme chez Marx, la lutte des classes qui apparaît comme le moteur de toute l'histoire, mais le développement de la technique. Pour Bogdanov, comme plus tard pour Staline, « la technique décide de tout ». La division en classes de la société n'apparaît en conséquence que comme un obstacle transitoire et inessentiel au développement harmonieux de la société sur le fil d'un temps continu, homogène et intérieurement finalisé par l'ombre portée de son Origine.

Ainsi se mettent en place les éléments du système de la *Tectologie* qui achève cette philosophie en décrivant l'histoire des sociétés humaines comme secrètement gouvernée par un principe d'organisation jusqu'alors inaperçu. À travers les luttes et les drames de l'histoire réelle, c'est l'Organisation, principe d'ordre intemporel, qui cherche à se réaliser. Si bien que les sociétés de classes — en particulier la société bourgeoise — sont pensées comme des réalisations impar-

faites ou des esquisses de l'Organisation : des organisations dont le principe — la désorganisation ou l'« anarchie » — trahit leur propre essence. Elles apparaissent du même coup comme des formations sociales fragiles, instables, vouées à leur perte, parce que dès le premier moment minées par la contradiction sourde qui va les emporter.

C'est dans l'opuscule sur *La Science et la classe ouvrière*, qu'est développée, appuyée sur des exemples concrets, la critique de la « science bourgeoise ». Comme on peut s'y attendre, la pratique scientifique contemporaine est menée du point de vue de son rapport au « travail ». Le lien qui unit originellement, c'est-à-dire par nature, la science au travail s'est trouvé brisé dans les sociétés de classes, explique Bogdanov. La science bourgeoise en est ainsi venue à oublier complètement son origine. On doit imputer à cet oubli tous ses embarras. La science a perdu de vue jusqu'à l'idée de l'unité de ses méthodes pour se morceler en un corps disparate de disciplines spécialisées qui se développent chacune dans l'ignorance de sa voisine, sans se prêter le concours dont elles pourraient se renforcer mutuellement. Cette spécialisation, Bogdanov la dénonce à la fois comme l'effet et comme l'image, à l'intérieur de la science, de l'anarchie qui règne dans la production capitaliste et affecte de proche en proche l'ensemble de la société bourgeoise. Cette spécialisation renforce une tendance inhérente au statut de la science dans toutes les sociétés de classes qui « fétichisent » en autant de « mystères sacrés » les résultats obtenus, énoncés dans un langage ésotérique inaccessible aux masses populaires. Et ces mystères sont d'autant mieux gardés que les méthodes scientifiques, parcimonieusement dévoilées dans une pédagogie profondément élitiste, se trouvent jalousement gardées secrètes par ceux qui les détiennent. Tout cela, conclut-il, a contribué à constituer une caste d'« aristocrates de l'esprit », sommités académiques au service des détenteurs du pouvoir. La science est ainsi devenue un instrument « autoritaire » de la domination des classes exploiteuses.

C'est si vrai que tous les opprimés qui sont d'aventure, au prix d'efforts surhumains, parvenus à partager ses « mystères » se sont, *ipso facto*, éloignés de leurs frères de classe et souvent retournés contre eux. « La science bourgeoise est une science qui embourgeoise. » À partir de là se définissent les tâches du prolétariat en matière scientifique. Le mot d'ordre : rétablir le lien entre science et travail, ce qui signifie en l'occurrence prendre appui sur la base collective de travail dans la production machinisée pour combattre l'idéologie individualiste des détenteurs du savoir, réformer en le simplifiant et en l'unifiant le langage de la science pour assurer non sa vulgarisation — qui déforme toujours son contenu en fonction des objectifs idéologiques de la classe dominante — mais sa réelle diffusion ; refondre, enfin, la pédagogie en la simplifiant et en la mettant en contact avec la pratique. On aboutira ainsi à ce que

Bogdanov appelle une « socialisation » du savoir scientifique, gros d'un développement sans précédent des connaissances.

S'il n'existe que des « vérités d'époque » dont toute l'« objectivité » se résume à exprimer le niveau de développement des forces productives ; si ce niveau de développement se traduit toujours par une forme d'organisation des éléments de la technique de travail ; si ces formes d'organisation s'ordonnent historiquement selon un processus de rationalisation et d'élargissement croissant conformément à une évolution fondée en nature dans des données « biologiques » ; si, avec la « production machinisée », le collectivisme de ces formes d'organisation apparaît comme la promesse d'une extension de cette rationalité enfin universalisée à l'ensemble de la société ; alors, il faut dire que la classe ouvrière est par elle-même, par sa position dans la production, et la vision que, de cette position, elle peut avoir de l'ensemble de la nature et de la société, porteuse d'un nouveau « point de vue » — « universel » — qui doit lui permettre de refondre complètement l'édifice conceptuel de toutes les sciences existantes.

D'où les célèbres premières lignes de la brochure intitulée *La Science et la classe ouvrière* : « Dire que le caractère de classe de la science réside dans la défense des intérêts d'une classe donnée, ce n'est qu'un argument de pamphlétaire ou une falsification pure et simple. En réalité, la science peut être bourgeoise ou prolétarienne par sa « nature » même, notamment par son origine, ses conceptions, ses méthodes d'étude et d'exposition. Dans ce sens fondamental, toutes les sciences, sociales ou autres, y compris les mathématiques et la logique, peuvent avoir et ont réellement un caractère de classe. » D'où enfin le programme de l'Université prolétarienne et ses tentatives de réalisations dans l'Académie socialiste, puis le projet de rédaction d'une *Encyclopédie ouvrière*. Programme, tentatives et projet qui reposent sur l'idée que la classe ouvrière, seule capable de théoriser sur la base de sa pratique, des nouvelles méthodes collectives-rationnelles de la production machinisée, est porteuse d'une « nouvelle logique », donc grosse d'une nouvelle science.

► COHEN R.S., « La philosophie de Mach », revue *Synthese*, 1970. — GIORELLO G., préface pour la trad. it. de la brochure sur *La Science et la classe ouvrière*, Milan, Bompiani, 1974. — GRILLE D., « Lenins Rivale : Bogdanov und seine Philosophie », *Abhandlungen des Bundesinstituts für estwissenschaftliche und internationale Studien*, vol. XII, Cologne, 1966. — LECOURT D., *Lyssenko, histoire réelle d'une « science prolétarienne »*, rééd. Paris, PUF « Quadrige », 1995. — LENINE, *Œuvres complètes*, Moscou, Inst. Marx-Engels-Lénine, 55 vol., 1958-1965 (trad. fr., Paris, 47 vol., 1958 sq.). — STALINE I.V., *Anarchisme ou Socialisme ?*, in *Œuvres complètes I*, Moscou, 1946. — WETTER G., *Le Matérialisme dialectique* (1948), Paris, Desclée de Brouwer, 1962.

Dominique LECOURT

→ Induction ; Mach ; Monisme ; Théorie ; Travail.

EMPIRISME

Désigné comme tel (*Empirismus*) par Kant pour définir, sur le plan pratique, une attitude qui, en substituant au devoir un intérêt « empirique », se révèle susceptible de mettre en péril l'idée même de moralité, l'empirisme, sur le plan théorique, doit en revanche être accueilli comme une maxime féconde capable de dresser une barrière face aux prétentions de la spéculation métaphysique. Toutefois, dans sa version radicale, celle de Hume, dont Kant salue l'initiative au moment où il prétend en tempérer les effets dévastateurs, l'empirisme conduit à un scepticisme qui embrasse « tout usage scientifique théorique de la raison » (*Critique de la raison pratique*, PUF, p. 53).

L'empirisme, en effet, met en lumière un paradoxe que l'on peut repérer dans ce qu'on appelle traditionnellement « le problème de Hume » : conjonction constante n'implique pas connexion nécessaire ; le passage de l'une à l'autre ne relève d'aucune démonstration ou justification rationnelle, mais seulement de l'accoutumance, puis de l'habitude installée, qui suscitent cette conviction que la conjonction répétée de deux phénomènes (par exemple, du bois sec jeté dans un feu attise la flamme, l'eau portée à cent degrés entre en ébullition) est inévitablement destinée à se reproduire, alors même que le contraire d'un fait demeure toujours possible et que rien ne garantit — intuitivement ou démonstrativement — la conformité du futur au passé. Il y a ici paradoxe dans la mesure où l'information fournie par les sens ne renvoie dans le meilleur des cas qu'à une croyance, en fait une certitude morale, une conviction, une confiance dans la reproduction attendue d'un phénomène maintes fois observé, mais nullement à une certitude d'ordre logique et scientifiquement établie. Le processus participe de mécanismes psychologiques, voire biologiques, en dehors de toute assurance d'ordre rigoureusement épistémologique. Dès lors, si l'empirisme, conventionnellement appréhendé selon l'adage « il n'est rien dans l'intellect qui n'ait sa source dans les sens », tend à rendre problématique le contrôle de l'intellect en déplaçant vers l'accoutumance le mécanisme de l'inférence en général, de l'induction en particulier, force est de reconnaître que ce qu'on appelle « empirisme » accède à la scène philosophique moins comme un protocole minutieusement instruit en vue de l'émergence d'une méthode scientifique que comme la problématisation de tout protocole de ce type. L'empirisme — et pas seulement dans sa version humiennne — se trouve ainsi écartelé entre la confiance spontanée dans la reproduction future du phénomène passé et coutumier et l'impossibilité de justifier rationnellement le processus empiriquement constaté.

Par-delà les filiations plus ou moins lâches qui retracent la destinée de l'empirisme d'Aristote à Quine, en passant par Bacon, Locke, Berkeley, Hume, Mill, Carnap et quelques autres, par-delà aussi la reconnaissance triviale de l'expérience comme point de départ nécessaire pour toute connaissance, qu'elle soit dite

vuilgair ou réputée scientifique, la question décisive est précisément celle que Hume a mise en place : ce qui est empiriquement reconnu n'est pas pour autant démonstrativement établi. Il en résulte que si la science — forcément expérimentale dans son activité quotidienne — se trouve démonstrativement, autrement dit aussi logiquement, fragilisée dans sa légitime aspiration à la prévision, la crise est ouverte. L'attitude « empiriste » est bien à l'initiative de cette crise ; mais l'empirisme, en la circonstance, ne relève plus simplement de cette vision un peu naïve d'une accumulation de données, d'un emboîtement d'expériences, destinés à constituer un corpus scientifique (quelles que soient les disciplines) indéfiniment amendable et perfectible dont la théorie serait, à chaque étape, chargée de faire le bilan et d'établir les perspectives. Ce qu'on appelle « empirisme » enfonce en réalité un coin entre la confiance spontanée ou acquise de l'individu dans la reproduction à l'identique de phénomènes observés et l'assurance réfléchie et démonstrativement acquise de la reproductibilité desdits phénomènes. Entre le constat d'un assentiment psychologique installé et l'impossibilité d'une justification rationnelle de ce constat, l'empirisme, ainsi appréhendé, est d'emblée critiqué et méthodiquement sceptique. Ce que Kant, bon lecteur de Hume, avait su percevoir mieux que quiconque.

Quoi qu'il en soit, et contrairement à une image scolaire trop répandue, l'empirisme n'est certainement pas pour autant réductible à un antirationalisme militant (l'opposition frontale rationalisme/empirisme est une construction post-kantienne) ; son propos est moins d'abaisser la raison que de mettre en lumière les difficultés de son exercice, les apories qu'elle secrète lorsque ses zélés défenseurs, les ultrarationalistes, tombent dans l'oubli des origines effectivement sensibles de toute connaissance. En ce sens, l'empirisme serait plutôt invitation, voire incitation, à l'éveil de la raison à elle-même, à la prise de conscience de ses extraordinaires possibilités comme de ses limitations intrinsèques et, du même coup, rappel à l'humilité de certaines prétentions suprasensibles qui conduisent au « pays des fées » (l'expression est de Hume) en même temps qu'exaltation des puissances d'inventivité qui seules définissent ce qu'il est convenu d'appeler la « nature humaine » : moins que les sens-eux-mêmes et loin de toute apologie du « donné », c'est alors l'imagination qui se trouve mise aux commandes de la machine mentale, non pas pour substituer facilement une « faculté » à une autre, mais bien plutôt pour mettre en place les conditions d'une salutaire vigilance dans l'analyse de la construction de « mondes » divers dont l'histoire des sciences est le premier témoin et que la philosophie des sciences doit réfléchir à sa manière. L'empirisme doit, à cet égard, être perçu non pas comme une philosophie de la conformité à une norme préétablie, mais comme une philosophie de l'invention. C'est, semble-t-il, sur ces bases que devrait s'organiser toute controverse, en particulier sur les rapports entre expérience et théorie, relativité et objectivité, voire le synthétique et l'analytique. Peut-être

serait-on alors à même de tempérer la sévérité du verdict de Bachelard lorsqu'il affirmait que l'empirisme est « une philosophie périmée ».

► AYER A.J. & WINCH R., *The British Empirical Philosophers. An Anthology*, Londres, 1957. — JACOB P. éd., *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique de 1950 à nos jours*, Paris, Gallimard, 1980. — SOULEZ A. dir., *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, Paris, PUF, 1985. — SOULEZ A. & SEBESTIK J. éd., *Le Cercle de Vienne. Doctrines et controverses*, Paris, Klincksieck, 1986. — WOOLHOUSE R.S., *The Empiricists*, Oxford Univ. Press, 1988.

Didier DELEULE

→ Bacon ; Carnap ; Cercle de Vienne ; Découverte ; Donné ; Épistémologie ; Expérience ; Fait ; Hume ; Kant ; Locke ; Rationalité.

ÉNERGÉTISME

Indépendamment l'un de l'autre, Robert von Mayer (1814-1878), Ludvig A. Colding (1815-1888) et James P. Joule (1818-1889) établissent au début des années 1840 la formule d'équivalence entre la chaleur et le travail. Cette formule semble aller dans le sens d'une théorie cinétique de la chaleur. On croit y déceler un nouveau succès du « mécanisme ». Hermann von Helmholtz (1821-1894) généralise peu après l'idée d'équivalence et énonce le « principe de conservation de la force », qu'on désignera plus tard comme celui de la conservation de l'énergie. Et, de fait, le *Mémoire sur la conservation de la force* (1847) défend une position épistémologique strictement mécaniste. « Finalement, écrit-il, le problème des sciences physiques des forces invariables, attractives et répulsives, dont l'intensité dépend de la distance des centres d'action. La possibilité de comprendre parfaitement la nature est subordonnée à la solution de ce problème. » Plusieurs physiciens donnent pourtant de ce principe une interprétation opposée. C'est le cas en particulier de William John M. Rankine (1820-1872) qui invite ses contemporains à la plus grande circonspection dans l'usage des « hypothèses mécaniques ».

Si ces hypothèses se sont imposées dans de nombreuses branches de la physique, cela tient seulement au fait que « la théorie des mouvements et des forces motrices est la seule théorie physique complète », écrit Rankine. Mais « même les hypothèses dont les conséquences sont le plus complètement confirmées par l'expérimentation ne peuvent jamais, par aucune accumulation de preuves, atteindre au degré de certitude qui appartient aux faits observés ». En particulier, pour la théorie de la chaleur, l'hypothèse de mouvements sous-jacents rendant compte de la formule d'équivalence entre chaleur et travail apparaît superflue. Pourquoi donc considérer la mécanique comme la base de l'édifice entier de la physique ? La reformulation du second principe de la thermodynamique par Rudolf Clausius (1822-1888) en 1850 ne fera que renforcer les positions

des physiiciens antimécanistes. On découvre en effet des phénomènes physiques orientés dans le temps de façon absolue et irréversible. Les équations de la mécanique – qui supposent des phénomènes réversibles – ne permettent pas d'en rendre compte.

Le physicien autrichien Ernst Mach (1838-1916) fera apparaître toute l'ampleur et la gravité de la question posée lorsqu'il écrira dans *La mécanique* (1883) : « Il n'existe pas de phénomène purement mécanique. Quand deux masses se communiquent des accélérations réciproques, il semble qu'il y ait tout au moins là un pur phénomène de mouvement. Mais à ce mouvement sont, dans la réalité, toujours liées des variations thermiques, magnétiques, électriques et chimiques qui, dans la mesure où elles se produisent, modifient le phénomène. Inversement les circonstances thermiques, magnétiques, électriques et chimiques peuvent déterminer un mouvement. Les phénomènes purement mécaniques sont donc des abstractions intentionnelles ou forcées, dont le but est une plus grande facilité de l'examen. » Mach rejoint Rankine lorsqu'il plaide en conséquence pour « limiter notre science physique à l'expression de faits observables, sans construire des hypothèses derrière ces faits, où plus rien n'existe qui puisse être conçu ou prouvé ». Certains, comme le philosophe français Pierre Duhem (1861-1916) dans *Le mixte et la combinaison chimique* (1902), vont plus loin et proposent de rebâtir la physique entière (mécanique comprise) sur la base de la thermodynamique. Soulignant l'échec des tentatives les plus puissantes et ingénieuses pour donner du principe de Sadi Carnot (1796-1832) une interprétation qui s'accordât avec la théorie mécanique de la chaleur, Duhem parle de la thermodynamique comme d'une « doctrine reine [...] de laquelle doivent découler les diverses disciplines qui constituent la Physique ». Et il en vient à la présenter non comme une discipline particulière, mais comme « le recueil des principes généraux, applicables à l'étude de tous les phénomènes [...] à tous les changements qui peuvent se produire dans le monde inorganique ». Deux conceptions de la physique théorique vont désormais s'affronter : l'une, qui continue à chercher des hypothèses explicatives et dont l'interprétation statistique du principe de Carnot par Ludwig Boltzmann (1844-1906) va apparaître comme le triomphe ; l'autre, positiviste voire phénoméniste comme celle de Mach qui ne craint pas de se référer à l'immatérialisme de l'évêque G. Berkeley (1685-1753), et qui récuse toute invocation de quelque « cause cachée des phénomènes ».

La doctrine avancée et développée par le chimiste allemand Wilhelm Ostwald (1853-1932) sous le nom d'« énergétisme » ou « énergétisme » se situe dans ce dernier camp. Ostwald retrace la genèse de la notion de matière à partir de celle de masse, laquelle a pu faire figure, à tort, de « pivot des lois naturelles ». On a fini par comprendre en bloc sous cette notion tout ce qui, pour nos sens, est lié indissolublement à la masse, comme le poids, le volume, les propriétés chimiques. « La loi physique, conservation de la masse, a ainsi

dégénéré en un axiome métaphysique : conservation de la matière. » Ostwald demande qu'on chasse la métaphysique du domaine de la science positive. Il prend position avec éclat contre la théorie atomiste. Un article de lui paraît dans la *Revue générale des sciences pures et appliquées* du 15 novembre 1895 traduit sous le titre de « La déroute de l'atomisme contemporain ». Ostwald veut qu'on substitue à l'idée (métaphysique) de matière celle d'énergie comme concept fondamental non seulement des sciences physicochimiques, mais biologiques et sociologiques. Il bâtit ainsi un véritable système qui s'adosse à une théorie de la connaissance radicalement empiriste : « Comment connaissons-nous le monde extérieur, sinon par nos sensations ? Toutes nos sensations ont un caractère commun et un seul : elles correspondent à une différence d'énergie entre les organes des sens et le milieu qui les entoure. » Dans l'introduction à son livre le plus populaire, il écrit : « L'énergie est le réel dans un double sens. D'abord, elle est le réel en ce qu'elle est ce qui agit ; quel que soit l'événement considéré, c'est indiquer sa cause que d'indiquer les énergies qui y prennent part. Ensuite elle est le réel en ce qu'elle permet d'indiquer le contenu de l'événement. Elle constitue un pôle immobile dans la mobilité des phénomènes, et, en même temps, la force d'impulsion qui fait tourner le monde des phénomènes autour de ce pôle. » Dans un article retentissant publié en 1895 par la *Revue générale des sciences*, il réaffirme ses présupposés épistémologiques : « S'il faut renoncer aux atomes, à la mécanique, quelle image de la réalité nous restera-t-il ? Mais on n'a besoin d'aucune image, d'aucun symbole. Ce n'est pas notre affaire de voir le monde déformé dans un miroir courbe ; il faut le voir directement autant que le permettent nos forces intellectuelles. Établir des rapports entre des réalités, c'est-à-dire des grandeurs tangibles, mesurables, de telle sorte que les unes étant données, les autres s'en déduisent, voilà la tâche de la science ; et la science ne l'a pas remplie quand elle se paie d'une image plus ou moins hypothétique. »

Le professeur de chimie-physique à l'université de Leipzig déclenche ainsi, en pleine « crise de la physique moderne », l'une des plus violentes controverses de la fin du siècle dernier. Le vice-président de l'Académie des sciences, A. Cornu, lui répond vertement et dénonce « la négation railleuse de principes qui, depuis trois siècles, ont donné tant de preuves de leur fécondité ». Marcel Brillouin, maître de conférences de physique à l'École normale supérieure, prend le relais dans un article plus mesuré intitulé « Pour la matière ». Le 30 décembre 1895, Ostwald répond à Brillouin par une défense et illustration de l'énergétisme. Ce débat sort du cadre académique, du jour où Lénine en réinterprète les termes dans son fameux livre sur *Matérialisme et empiriocriticisme* (1909) destiné à combattre les « disciples russes de Mach » regroupés autour de A. Bogdanov.

► DUHEM P., *Le mixte et la combinaison chimique* (1902), rééd., Paris, Fayard, 1985. – HELMHOLTZ W.V., *Mémoire sur la conservation de la force*, 1847. – LECOURT D., *Une crise et son*

enjeu, Paris, Maspero, 1973. – LÉNINE, *Poinoe sobranie soci-neni*, Moscou, 55 vol., 1958-1965. – MACH E., *La mécanique* (1883), trad. fr., Paris, Hermann, 1903. – OSTWALD W., *L'énergie*, trad. fr., Paris, Alcan, 4^e éd., 1913. – RANKINE W.J., « Outline of a science of energetics » (1855), *Miscellaneous scientific papers*. Londres, 1881. – REY A., *Le mécanisme et l'énergétisme au point de vue des conditions de la connaissance*, Paris, 1908.

Dominique LECOURT

→ Chaleur ; Empirionisme ; Énergie ; Probabilité [PHYSIQUE] ; Travail.

ÉNERGIE

PHYSIQUE

Dans son fameux cours (*Feynman's Lectures on Physics*, 1964), le physicien américain Richard P. Feynman énonce la propriété suivante : la principale caractéristique de l'énergie c'est d'être conservée. De fait, ce n'est qu'après la « découverte » de ce que l'on a alors appelé le principe de conservation de l'énergie que l'énergie a acquis le statut de concept de la physique. Les guillemets dans la phrase précédente ont pour fonction de signaler qu'il s'agit d'une découverte d'un genre particulier. En effet, on associe en général le mot découverte à un auteur (ou à un explorateur) qui, un beau jour, a trouvé (est tombé sur, *invenire* en latin) quelque chose de l'ordre de la pensée (ou de l'ordre des choses). Ainsi, par exemple, si l'on ajoute foi au récit qu'il en fait, on dira que Feynman, qui vient d'être cité, a découvert la méthode des diagrammes qui porte son nom lors d'une nuit mémorable bien datée dans son autobiographie, dans le courant des années 1950. Rien de tel pour la « découverte » du principe de conservation de l'énergie : d'une part, elle s'étale sur 20 ans au moins (1840-1860) ; et peut-être peut-on même considérer qu'elle s'étale sur 40 ans si l'on inclut le travail de Sadi Carnot de 1824 dont il sera question plus loin ; d'autre part, elle doit être attribuée à plusieurs « auteurs » : Faraday, Carnot, Joule, Mayer, Helmholtz, Thomson, Rankine... pour ne citer que les plus célèbres – des auteurs qui n'ont pas collaboré comme tel au fait aujourd'hui où existent des lieux où se rencontrent les spécialistes (colloques, programmes subventionnés, grands instruments, Internet), mais qui au contraire travaillaient de façon relativement isolée et avaient des préoccupations très différentes. De plus, on peut se demander s'il convient de parler de découverte pour un principe.

Quoi qu'il en soit, le concept d'énergie n'est devenu un concept de la physique qu'à partir du moment où a été établi de façon irréversible qu'il existait une loi de conservation de l'énergie. Dans un ouvrage écrit en 1887 (*Das Prinzip der Erhaltung der Energie*), Max Planck écrit : « Je ne traiterai du concept d'énergie que dans la mesure où il peut être rattaché au principe [celui qui donne son titre à l'essai], supposant donc que le concept d'énergie en physique tient avant tout sa

signification du principe de conservation qui le concerne » (cité par Y. Elkana, « The conservation of energy : a case of simultaneous discovery ? », *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, 23, 90 et 91, Paris, 1970). Comme c'est souvent le cas en physique, où la dénomination joue un rôle essentiel (comment mathématiser, c'est-à-dire faire fonctionner des symboles, une théorie dans laquelle les mots ont une signification chancelante ?), l'émergence du concept d'énergie a donné lieu à un débat sémantique. Débat ponctué d'avancées théoriques, au terme duquel les mots force et énergie, longtemps mêlés, ont reçu chacun une définition bien précise, en sorte que lorsqu'on parle d'énergie on ne parle pas de force, et inversement. Aujourd'hui, un candidat au baccalauréat qui confondrait force et énergie se verrait infliger un zéro rageur : la force et l'énergie n'ont pas les mêmes dimensions, c'est-à-dire ne dépendent pas de la même façon des grandeurs fondamentales (masse, longueur, temps). Or s'il est une règle qui, aujourd'hui, apparaît comme le degré zéro de la théorie physique, c'est précisément celle qui interdit d'identifier deux grandeurs qui n'ont pas les mêmes dimensions ; en effet de telles grandeurs ne sont pas de même nature. Un exemple simple permet de comprendre la raison de cet interdit : l'aire d'une surface (dont le carré peut être considéré comme le prototype) varie comme la longueur (côté du carré) élevée à la puissance 2 ; un volume, lui, varie comme la longueur élevée à la puissance 3 : surface et volume n'ont pas les mêmes dimensions ; ils ne sont pas mesurés avec les mêmes unités ; ils sont (évidemment) de nature différente. Cette règle qui, pour utiliser une expression triviale, « interdit » de mélanger les torchons et les serviettes (ou d'additionner les choux et les carottes) est précisément celle qui, pour un esprit moderne du xx^e s., semble avoir été violée tant qu'on n'a pas établi de distinction entre force et énergie.

Remarque : de ce qui vient d'être dit on pourrait déduire que les mots force et énergie ont longtemps (jusqu'au milieu du XIX^e s.) été interchangeables. Tel n'est pas le cas. La situation n'est en rien symétrique : le mot énergie n'a jamais désigné ce qu'aujourd'hui nous appelons force ; en revanche, le mot force (dans toutes les langues européennes et à des degrés divers) a longtemps eu un double sens : à la fois capacité de produire le mouvement et réservoir de potentialités.

De cette confusion des sens propres au mot force en français et en anglais et *Kraft* en allemand, les circonstances dans lesquelles a été écrit l'essai de Planck mentionné plus haut porte la marque éclatante. Cet essai a été écrit à la demande de la Faculté de philosophie de l'université de Göttingen, en 1887, soit 40 ans après la parution d'un mémoire de Helmholtz intitulé *Über die Erhaltung der Kraft* où la conservation de ce que Helmholtz appelle encore *Kraft* est mathématiquement établie (précisément sur les bases d'un argument aux dimensions). La question posée par la faculté était : lorsque le physicien anglais William Thomson (Lord Kelvin) parle de « conservation de l'énergie », faut-il

entendre la même chose que ce que le physicien allemand Hermann von Helmholtz appelle « conservation de la force » ? Les deux mots, dans le texte allemand, sont *Énergie* (traduction de *energy*) et *Kraft*. L'embarras des philosophes de Göttingen vient de ce que les deux auteurs cités semblent parler de la même chose (chose qui a la propriété d'être conservée) mais en lui attribuant deux noms différents : l'Anglais utilise *energy*, alors qu'il aurait pu parler de *force* ; l'Allemand utilise le mot *Kraft* (le mémoire de Helmholtz de 1847 s'intitule *Über die Erhaltung der Kraft*) ; pourquoi n'utilise-t-il pas le mot *Énergie* qui fait partie du vocabulaire des physiciens mécaniciens ? Autrement dit : comment faut-il nommer la quantité qui est conservée ? Ou encore : peut-on traduire l'anglais *energy* par *Kraft* ? La question se pose particulièrement en allemand, où dans le langage courant, en dehors du contexte scientifique ou technique, *Kraft* désigne, même encore aujourd'hui, à la fois une force appliquée à un corps et l'énergie, la puissance d'agir (en français le problème est moins sensible puisque dans le langage ordinaire on fait la distinction entre un homme qui a de la force et un homme qui a de l'énergie).

Comme on l'a vu, Planck tranche la question de façon claire et nette : le concept qui est défini à partir de sa conservation ne doit pas être appelé *Kraft* mais *Énergie* – en dépit du titre de l'article de Helmholtz ; et pour que nul n'en doute, Planck donne à son propre essai un titre qui reprend celui de Helmholtz en changeant de façon ostentatoire *Kraft* en *Énergie*.

Comme il a été signalé plus haut, le mot « énergie » figurait déjà avant le début du XIX^e s. dans le vocabulaire de la physique, plus exactement dans celui de la mécanique. Il a été introduit, en français, par les mathématiciens-physiciens du XVIII^e s. (dont les mémoires sont en général rédigés en français qui était alors la langue scientifique, comme l'est l'américain aujourd'hui). Jean Bernoulli est apparemment l'introduit du mot dans une lettre écrite à Varignon en date du 26 janvier 1717, où il définit différentiellement l'énergie comme le produit de la force appliquée à un corps par le déplacement infinitésimal subi par ce corps sous l'effet de cette force – soit encore, en généralisant à un déplacement fini, l'intégrale de la force sur le déplacement, ce qu'aujourd'hui nous appelons le travail mécanique.

Bernoulli appartenait à une tradition philosophique, dont Leibniz est le représentant le plus illustre, selon laquelle il existe dans la Nature quelque chose qui se conserve au cours des processus physiques. On sait que Leibniz, s'opposant en 1690 à Descartes, avait montré que ce qui est conservé n'est pas, comme le prétendait Descartes, la quantité de mouvement totale (somme des produits masse par vitesse) mais ce qu'il avait appelé *vis viva* (force vive), définie comme le produit de la masse par le carré de la vitesse. Dans des manuscrits ultérieurs, Leibniz avait étendu le concept de *vis viva*, devenu force vive absolue ou force motrice (*potentia* en latin), de manière à y inclure les forces

« potentielles », présentes dès lors qu'un corps est capable, de par son existence, d'induire des actions ou changements dans d'autres corps : « Or il se trouve par la raison et par l'expérience que c'est la Force vive absolue, ou qui s'estime par l'effet violent qu'elle peut produire, qui se conserve, et nullement la quantité de mouvement » (éd. Gerhardt, série 2, vol. 2, p. 219).

On ne s'étonnera pas dans ces conditions que la définition technique de l'énergie (produit de deux grandeurs) donnée par Bernoulli soit immédiatement suivie d'un théorème de conservation. Ce théorème, dans les mots de Varignon qui le reprendra de Bernoulli, s'énonce : « En tout équilibre de forces quelconques en quelque manière qu'elles soient appliquées, et suivant quelques directions qu'elles agissent les unes sur les autres, ou médiatement ou immédiatement, la somme des Énergies affirmatives sera égale à la somme des Énergies négatives prises négativement » – ce qui, du point de vue actuel, n'est somme toute qu'un cas particulier de conservation de l'énergie (ici l'énergie mécanique). D'où il résulte que si l'on donne un déplacement à une ou plusieurs parties d'un système, les autres parties du système subiront des déplacements et des forces tels que la somme des énergies positives et négatives, calculées comme indiqué, fasse zéro.

Mais il est clair que pour Bernoulli le principe de conservation qu'il a trouvé n'est pas le grand principe qui régit le monde ; il est d'une application bien trop limitée (aux forces statiques et à l'équilibre). Le mot énergie, s'il a bien été introduit en rapport avec l'idée de conservation, n'est pas entré dans la physique par la grande porte. Et de fait, pour Bernoulli, le concept important n'est pas celui d'énergie mais bien le concept leibnizien de force vive, considérée comme une forme de substance en quantité définie qui ne peut diminuer qu'en produisant des effets, en sorte que chaque fois que de la force vive semble disparaître, le pouvoir d'agir (*facultas agendi*) n'est pas perdu mais simplement transformé.

La situation théorique au début du XIX^e s. était donc la suivante : les physiciens mécaniciens étaient à la recherche d'une quantité qui se conserve au cours du mouvement (étant entendu que tout processus physique s'explique en termes de figures et mouvements), c'est-à-dire une grandeur qui garde la même valeur au cours d'un processus physique. L'énergie introduite par Bernoulli n'était certainement pas la grandeur recherchée. Mais l'idée dans l'air du temps, parmi les mécaniciens et les philosophes, était qu'il existe quelque chose (à découvrir) qui garde toujours la même valeur, en sorte que si une quantité de cette chose semble disparaître c'est qu'elle s'est simplement transformée, ce dont témoignent à coup sûr les effets produits par cette chose sous sa nouvelle forme. On sent bien que cette idée doit avoir partie liée avec le concept métaphysique de substance. Il suffit de citer la *Critique de la Raison Pure* de Kant (2^e éd.) pour s'en persuader : « Première analogie. Principe de la permanence de la substance. La substance persiste dans tout le changement des phénomènes et sa quantité n'augmente ni ne

diminue dans la nature. » Et Kant ajoute en guise de preuve : « Tous les phénomènes sont dans le temps et c'est en lui seulement comme substrat (ou forme permanente de l'intuition intérieure) qu'on peut représenter la simultanéité aussi bien que la succession... Or le temps ne peut pas être perçu en lui-même. Par conséquent, c'est dans les objets de la perception, c'est-à-dire dans les phénomènes, qu'il faut trouver le substrat qui représente le temps en général et dans lequel tout changement [...] peut être perçu dans l'appréhension par le rapport des phénomènes avec lui... Le permanent, relativement auquel tous les rapports de temps des phénomènes peuvent seulement être déterminés est la substance dans le phénomène, c'est-à-dire le réel des phénomènes, réel qui demeure toujours le même comme substratum de tout changement et, comme cette substance ne saurait changer dans l'existence, sa quantité dans la nature ne peut ni augmenter ni diminuer. » Ce passage de Kant, outre qu'il indique bien à la recherche de quoi étaient les physiciens au début du XIX^e s., laisse aussi entrevoir une idée à laquelle le théorème de Noether donnera sa formulation mathématique, à savoir que l'énergie, en tant qu'elle est conservée, est indissociable du temps. Ou encore, en termes plus savants : à tout groupe d'invariance est associée une grandeur conservée, générateur infinitésimal de la représentation du groupe ; c'est parce que le temps (« la condition formelle *a priori* de tous les phénomènes » dit Kant), ou plus exactement la suite du temps, est représenté par une ligne infinie uniforme (où donc il est possible de définir un groupe d'invariance par translation), qu'il existe une grandeur conservée, à laquelle on a fini par donner un nom unique, celui d'énergie. On verra que c'est cette relation au temps qui a permis au concept d'énergie de sortir indemne (ou presque) de la révolution quantique.

Une fois tracé le tableau de la situation au début du XIX^e s., il est possible de décrire comment s'est faite la dissociation du terme force (ou *Kraft*) en force et énergie (*Energie*). Le point marquant est que cette recatégorisation des concepts n'a pas été le fait des physiciens eux-mêmes. Ce ne sont pas des travaux prolongeant la tradition de Bernoulli (et de Leibniz) qui ont permis de déterminer la nature de la quantité conservée (invariante au cours du temps). Le concept d'énergie est un enfant de la révolution industrielle, en ce sens que des individus (essentiellement des ingénieurs et des médecins), ayant des préoccupations toutes différentes de celles des savants métaphysiciens, ont à un moment de l'histoire de l'humanité ressenti la nécessité de ce concept, l'énergie, dont la caractéristique déterminante est d'être conservée. À vrai dire, ces ingénieurs ont servi de relais en mettant l'accent sur la notion de conversion (différente de celle de conservation), opération qui était leur pain quotidien. On peut dire que Helmholtz (lui-même physiologiste, mais aussi physicien théoricien et philosophe) est celui qui a réuni les deux bouts de la chaîne, celle de la métaphysique leibnizienne et celle de l'invention technique, en établissant mathématiquement la loi de conservation.

La loi de conservation de l'énergie et donc la « découverte » de l'énergie ont été rendues possibles par l'existence d'un nombre de plus en plus grand de ce que l'on a appelé des conversions. L'invention de la pile électrique par Volta en 1800 en est un exemple : un phénomène chimique est converti en phénomène électrique. L'électrolyse, phénomène inverse, est un autre exemple : la conversion d'un phénomène électrique en phénomène chimique. En 1820, Oersted avait montré qu'un phénomène magnétique pouvait produire du mouvement, donc servir à faire tourner un moteur. En 1831 Faraday démontra qu'il était possible de convertir du mouvement en courant électrique. L'invention de la photographie, conversion d'un phénomène lumineux en un phénomène chimique, peut être également citée. Sans oublier, bien sûr, la conversion de chaleur en mouvement, donc en « puissance motrice » comme l'on disait, telle qu'elle s'effectue dans une machine à vapeur.

Selon Y. Elkana (« The conservation of energy : a case of simultaneous discovery ? », *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, vol. 23, n^o 90 et 91, Paris, 1970), on peut distinguer deux écoles, l'une en Angleterre, l'autre en Allemagne. La première, autour de Joule, Thomson et Rankine, avait pour préoccupation essentielle l'amélioration des moteurs, c'est-à-dire les conversions de phénomènes divers en mouvement (capable d'entraîner une roue ou un dispositif fournissant du travail). Ce sont eux qui ont démontré que la chaleur est un mouvement désordonné des molécules. La deuxième, autour de Mayer et Helmholtz, était plus intéressée par le problème de la chaleur humaine, ou plus généralement animale ; c'est Helmholtz, on l'a dit, qui a établi la forme mathématique de la loi de conservation ; mais Helmholtz tout comme Mayer dissociaient catégoriquement la loi de conservation de la question de savoir si la chaleur est ou n'est pas du mouvement. Toujours selon Elkana, le mémoire de Carnot sur « la puissance motrice du feu » est ce qui établit un lien entre ces deux types de préoccupations.

On sait que Carnot (Sadi et non Lazare) a énoncé le second principe de la thermodynamique alors que le premier était encore dans les limbes. Rappelons que le premier principe établit l'équivalence de la chaleur et du travail (le travail peut être intégralement transformé en chaleur) et que le second principe limite le processus inverse : il est impossible de transformer intégralement une quantité de chaleur en travail (ce qui, du point de vue économique, est certes bien dommage puisque s'il n'en était pas ainsi il serait possible de faire marcher un bateau rien qu'en extrayant de la chaleur de la mer, ce qui n'abaîsserait pratiquement pas sa température). Carnot a établi qu'il n'était possible de transformer de la chaleur en travail (ce qui se passe dans une machine à vapeur) que si le système fonctionne entre deux sources de chaleur, la source chaude fournissant une certaine quantité de chaleur dont une partie est transformée en travail (récupérable à l'extérieur), la reste (qui ne peut être réduit à zéro) étant transféré à la

source froide. Le travail de Carnot, présenté dans un mémoire ne contenant des équations mathématiques qu'en notes, intitulé « Réflexions sur la puissance motrice du feu », date de 1824. Le mot énergie ne figure jamais dans ce mémoire, le mot force, accidentellement. Ce qui intéresse Carnot, c'est le pouvoir, l'efficacité d'une machine thermique. Mais Carnot, ancien élève de l'École polytechnique, connaissait parfaitement les travaux des mathématiciens français (dont certains avaient été ses maîtres) et la recherche d'une grandeur conservée était pour lui une démarche naturelle. Aussi la logique du raisonnement de Carnot est-elle une logique de la conservation. En effet, Carnot fonde son argumentation sur une théorie de la chaleur (qui s'est révélée fautive plus tard, on va le voir), la théorie du calorique : la chaleur est assimilée à un fluide qui s'écoule et se déplace d'un corps à un autre. « La production de pouvoir moteur est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique, mais à un transport d'un corps chaud à un corps froid » (les italiques sont de Carnot). Il n'y a donc pas disparition (« consommation ») de calorique, mais bien conservation sous la forme d'un transport. En un mot, Carnot établit un bilan : que ce bilan porte sur le calorique et non sur ce qui deviendra l'énergie importe peu du point de vue de la qualification du raisonnement.

Tout autre est la logique de l'argumentation de Joule qui, rappelons-le, a établi que le travail mécanique (par exemple, celui d'un moteur qui fait tourner des palettes dans un liquide visqueux) est intégralement transformé en chaleur (qui a pour effet d'élever la température du liquide). Il s'agit là d'une logique de la convertibilité. Le travail de Joule est expérimental, motivé par le souci d'améliorer les performances de la dynamo. De plus, par tradition nationale, Joule était partisan de la théorie corpusculaire de la chaleur et pensait que, comme l'avait suggéré Newton, la chaleur était due à l'agitation des corpuscules constituant la matière. Aussi entreprit-il une série d'expériences (dans le détail desquelles il n'est pas nécessaire d'entrer) afin de vérifier cette conception de la chaleur (appelée en Angleterre théorie dynamique de la chaleur). « [L'expérience] a montré, conclut-il, que chaque fois que de la force vive est apparemment détruite, un équivalent de cette force vive est produit... Cet équivalent est la chaleur » (J.P. Joule, *Scientific Papers*, p. 269). Joule ne dit pas qu'il existe une grandeur conservée, mais simplement que les diverses formes de « force » peuvent être converties en chaleur ; pour lui, ces diverses formes de force ne sont pas de même nature.

C'est à Kelvin que revient le mérite d'avoir fait le pas suivant, de la convertibilité à la conservation, sans aller, comme on va le voir, jusqu'à énoncer un principe de conservation de façon explicite. Kelvin, contrairement à Joule, connaissait le mémoire de Carnot et cherchait à établir une échelle absolue de température sur la base des conclusions de ce mémoire — ce à quoi il parvint d'ailleurs (d'où le nom de Kelvin donné à la

mesure de la température absolue). Mais son apport, pour ce qui nous intéresse ici, est autre. Kelvin était préoccupé par le fait que Carnot et Joule, sur la base de deux théories antithétiques (le calorique et la théorie dynamique de la chaleur), avaient abouti à des conclusions similaires. Convaincu, par tradition nationale, que la chaleur est du mouvement, Kelvin entreprit de montrer que les conclusions de Carnot sur la puissance motrice de la chaleur pouvaient être obtenues sur la base de la théorie dynamique de la chaleur et que l'hypothèse du calorique n'était pas nécessaire pour cela. C'est donc lui qui établit de façon définitive la nature de la chaleur : le mouvement des corpuscules constituant la matière ; d'ailleurs son principal mémoire porte le titre : « Sur la théorie dynamique de la chaleur. » Kelvin ne parle donc pas de conservation, encore moins de conservation de l'énergie ; mais dans la mesure où les résultats de Carnot reposent sur un bilan (et donc sur l'idée de conservation : ce qui entre dans une colonne doit disparaître dans une autre, comme dans une comptabilité), la théorie dynamique de la chaleur de Kelvin (à laquelle Rankine donnera le nom de thermodynamique) repose implicitement sur l'idée de conservation.

Mais alors d'où vient qu'en 1887 la Faculté de philosophie de Göttingen cite William Thomson (Lord Kelvin) comme l'auteur de la « conservation de l'énergie » ? En grande partie des réélaborations ultérieures propagées par les disciples de Kelvin, G. Tait en particulier qui, ayant connaissance de la démonstration de Helmholtz, n'hésite pas à identifier les conclusions de Kelvin et celles de Helmholtz. Si Tait emploie le mot *energy* et non *force*, c'est probablement par la conjugaison de deux raisons. D'une part, Tait veut se démarquer d'une conception, celle d'une quantité conservée, gage de stabilité de l'univers, qu'il considère comme métaphysique (donc obscure), d'autant plus que cette conception est aussi celle de la *Naturphilosophie* allemande. D'autre part, l'énergie, on l'a dit, a été introduite par les mécaniciens pour désigner ce qu'aujourd'hui nous appelons le travail mécanique. Or ce qui intéresse les ingénieurs, c'est précisément la capacité des machines à produire du travail mécanique ; en sorte que, tout naturellement, le travail mécanique est devenu l'unité de mesure de cette chose qui se transforme et se conserve à travers les transformations observées dans les ateliers et les usines.

On peut même imaginer que c'est à dessein que les physiciens anglais, après avoir lu le mémoire de 1847 de Helmholtz *Über die Erhaltung der Kraft*, ont décidé d'opter pour le mot *energy*, plutôt que *force*. Précisément pour rompre les liens avec la tradition philosophique allemande qui va de Leibniz à la *Naturphilosophie* (Schelling, en particulier, qui s'est appliqué à illustrer les idées de conversion et de conservation par des exemples tirés des résultats de la science contemporaine et qui même a fondé en partie sa philosophie sur ces résultats), tradition dans laquelle Helmholtz avait été éduqué. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si les préoccupations de Helmholtz étaient à la fois d'ordre

physique et d'ordre physiologique. Il faut remarquer également qu'en 1887, Planck, dans sa réponse à la question posée par la faculté de philosophie, où il affirme que *Kraft* doit être remplacé par *Énergie*, se défend d'être le moins du monde influencé par la tradition de la *Naturphilosophie*. Visiblement, opter pour *Énergie* plutôt que *Kraft*, c'est se ranger du côté de la science mathématisée et des ingénieurs qui en sont les représentants les plus valorisés au moment où il écrit. Cette prise de position (pour la science exacte contre les spéculations philosophiques) est d'ailleurs motivée par le caractère mathématique du mémoire de Helmholtz. Helmholtz est en effet le premier à avoir produit une analyse aux dimensions des diverses formes de *Kraft*, et à avoir montré que ces grandeurs qui ont toutes les mêmes dimensions sont en fait des parties d'une même quantité dont il a démontré mathématiquement la constance au cours du temps.

Le destin du mot « énergie » a de quoi étonner. Il est clair que Bernoulli introduit ce terme pour mesurer ce que nous appelons maintenant le travail mécanique, en toute connaissance de son étymologie grecque, *energeia*. Chez Aristote *energeia* désigne le mode d'être en acte (*ergon*) et s'oppose à *dunamis*, le mode d'être en puissance. La distinction se comprend mieux si l'on se souvient que chez Aristote le monde accomplit le passage de l'*arche* au *telos*, passage du commencement à la fin : *dunamis* représente donc un manque, un manque à être, alors que *energeia* correspond à la réalisation de l'être présent. L'*energeia* est une activité immanente, une actualisation au cours de laquelle la matière reçoit une forme, les formes étant chez Aristote ce qui est substantiel.

Le choix du mot « énergie » par Bernoulli se comprend si l'on se souvient que le mot apparaît dans le contexte des travaux virtuels ; le travail mécanique (l'énergie selon Bernoulli) est ce qui s'actualise lors d'un déplacement virtuel. Ce qui est étrange c'est que Bernoulli, ami et disciple de Leibniz, ait cherché un principe de conservation pour ce qu'il appelle énergie. En effet, chez Aristote, l'idée d'une substance qui serait le substrat à partir duquel se construisent les phénomènes, idée indissociable de celle de conservation, est totalement absente, incongrue. Il n'y a pas de conservation mais au contraire un processus d'actualisation qui épuise le domaine des possibilités de nouvelles formes. En cherchant pour le concept d'énergie une loi de conservation, Bernoulli (et ses successeurs jusqu'à aujourd'hui) renversent la signification du mot énergie. Il ne s'agit plus de combler un manque, mais de puiser dans quelque chose qui persiste et qui est la substance même. On peut d'ailleurs s'interroger sur l'origine de l'idée de conservation, idée qui ne va pas de soi (la preuve, c'est que les Grecs ne l'avaient pas). D'où vient que l'on ait cherché ce qui dans la nature se conserve ? On peut remarquer que cette recherche est corrélative de l'idée d'unité de la nature ; et de fait, le concept d'énergie a bien joué un rôle unificateur des divers phénomènes physiques. De l'idée d'unité de la nature à celle d'un Dieu unique, il n'y a qu'un pas,

qu'on peut peut-être franchir si l'on se souvient que chez Descartes, l'idée de conservation (en l'occurrence de la quantité de mouvement) manifestait l'omniprésence de Dieu qui, à chaque instant, rajoute au monde la quantité de mouvement qui lui manque.

Donnons pour conclure quelques indications sur l'évolution du concept d'énergie au ^{XX}e s. On sait qu'Einstein, en 1905, a démontré l'équivalence de la masse (inertielle) et de l'énergie, unifiant les deux notions de la physique classique qui avaient à voir avec la notion philosophique de substance. Plus difficile a été l'adaptation du concept d'énergie à la physique quantique, dans la mesure où l'on crut à un instant qu'il serait nécessaire d'abandonner les concepts de la physique classique. On mesurera l'ampleur du désarroi dans lequel se trouvaient les physiciens vers 1924 au fait qu'ils aient sérieusement songé à abandonner la loi de conservation de l'énergie, c'est-à-dire ce qui définit cette dernière. L'exploration du domaine atomique a conduit à reconnaître que les concepts de la physique classique y étaient mal adaptés, mais ne pouvaient être abandonnés puisque toute mesure se donne en leurs termes. Il fallait donc les modifier. La conclusion a été que les grandeurs physiques ne doivent plus être représentées par des fonctions à variables réelles mais par des opérateurs agissant dans un espace plus large (espace de Hilbert). L'existence d'un groupe d'invariance par translations dans le temps des phénomènes physiques conduit à définir un opérateur, générateur infinitésimal du groupe des translations dans le temps, qu'il est alors facile d'identifier (via la connaissance de ses états propres et valeurs propres) à l'énergie. Les valeurs prises par l'énergie lors d'une mesure sur un système dans un état quelconque présentent alors une dispersion, en conformité avec le principe d'indétermination de Heisenberg. L'énergie a survécu en s'adaptant, en tant que grandeur invariante (pour un système isolé).

► CARNOT S., *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (1824), rééd., Paris, Blanchard, 1953. — COHEN I.B. éd., *The Conservation of Energy and the Principle of Least Action*, New York, Arno Press, 1981. — ELKANA Y., « The Conservation of Energy : a Case of Simultaneous Discovery ? », *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, vol. 23, n° 90 et 91, Paris, 1970 (rept. in *Essential Tension*, Chicago, 1971). — HARMAN P.M., *Energy, Force, and Matter. The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1982. — HELMHOLTZ H. VON, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Leipzig, 1892-1895 ; *Selected Writings of Herman von Helmholtz*, Middletown, Conn, 1971. — HIEDERT E.N., *Historical Roots of the Principle of Conservation of Energy*, New York, Arno Press, 1962. — JOULE J.P., « On the Caloric Effects of Magnetolectricity and the Mechanical Value of Heat », *Philosophical Magazine*, ser. 3, 23 : 263-276, 347-355, 435-443. — KELVIN (Lord), *Popular Lectures and Addresses*, Londres, Macmillan, 1894. — KUHN T.S., « Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery », *Critical Problems of the History of Science : Proceedings of the Institute for the History of Science at the University of Wisconsin*, Sept. 1-11, 1957, Madison, 1959. — MACH E., *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, Prague, 1872 (Leipzig

[Barth], 1909). — WEYL H., *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton Univ. Press (USA), 1949.

Françoise BALIBAR

→ Chaleur ; Corps noir ; Criticisme ; Énergétisme ; Force ; Probabilité (PHYSIQUE) ; Travail.

ENRIQUES Federigo, 1871-1946

Mathématicien ainsi que philosophe et historien des sciences italien, Enriques est né à Livourne et mort à Rome ; il fit preuve d'intuitions géniales sur la didactique des mathématiques. Chargé de la chaire de géométrie à Bologne en 1896, il est à considérer comme l'un des fondateurs de l'école de géométrie algébrique qui s'imposa entre les deux guerres mondiales. Enriques donna son essor à la Société italienne de philosophie ; il montra que la science ne devait pas être cantonnée dans la sphère de l'utile ; il se battit en faveur d'une intégration des aspects variés de la culture. De 1938 à 1944, Enriques, frappé par les lois de discrimination antisémite, a dû cesser d'enseigner. Son chef-d'œuvre est sans doute son livre *Problemi della scienza* (1906) qui fut traduit en français en deux volumes. Cet ouvrage reste un classique de la philosophie des sciences qui prend en charge par médiation l'opposition entre les thèses de Mach et celle de Poincaré. Dans l'introduction française du volume II, Enriques dit qu'il a sans cesse dégagé dans ses recherches la fonction spécifique de l'esprit qui crée la science : la poussée de l'expérience et la nature même de l'esprit humain peuvent ensemble expliquer, dans ses grandes lignes, l'évolution scientifique. Il conteste, à juste titre, la doctrine kantienne de l'*a priori* et le conventionalisme de Poincaré par sa mise en perspective de la genèse historique de la connaissance. Ainsi annonce-t-il les travaux de Bachelard et de Gonseth.

• *Problemi della scienza*, Bologne, Zanichelli, 1906 (trad. fr. *Les problèmes de la science et de la logique*, Paris, Alcan, 2 vol., 1909). — *Les concepts fondamentaux de la science*, Paris, Flammarion, 1912. — *Il valore della scienza*, Unnuario Univ. Bologna, 1907-1908. — *Scienza e razionalismo*, Bologne, Zanichelli, 1912 (Société française de philosophie, 1921). — *Per la storia della logica*, Bologne, Zanichelli, 1922. — *La signification et l'importance de l'histoire de la science et l'œuvre de Paul Tannery*, Rev. Métaphys. Mor. 31, Paris, 1924. — *L'évolution de la logique*, trad. Monod-Herzen, Paris, Chinon, 1925. — *Signification de l'histoire de la pensée scientifique*, trad. fr., Paris, Hermann, 1934. — *Le problème de la raison*, in Congrès Descartes, Paris, Hermann, 1937. — *Le matematiche nella storia e nella cultura*, Bologne, Zanichelli, 1938. — *La théorie de la connaissance scientifique de Kant à nos jours*, Paris, Hermann, 1938. — *Causalité et déterminisme dans la philosophie et l'histoire des sciences*, Paris, Hermann, 1941. — *Il razionalismo sperimentale* (anthologie), éd. M. Castellana, Milla, Lecce, 1975. — ENRIQUES F. & SANTILLANA G. DE, *Storia del pensiero scientifico*, vol. 1, Bologne, Zanichelli, 1932 ; *Compendio di storia del pensiero scientifico dall'antichità fino ai tempi moderni*, Bologne, Zanichelli, 1937.

Éric ÉMERY

→ Bachelard ; Idéalisme ; Méthode ; Rationalité.

ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

L'enseignement scientifique, relayé d'ailleurs par la vulgarisation, opère la transmission des acquis de la science vers un large public. Or entre la science élaborée par les savants et la science enseignée interviennent des décalages et des adaptations, ne serait-ce que par l'intervention du concepteur de programme (inspection générale ou commission *ad hoc*) qui définit les contenus et les grandes lignes d'orientation de l'enseignement à dispenser. Au-delà du cadre institutionnel et des programmes il est difficile d'appréhender les réalités des cours effectivement délivrés aux élèves ; à défaut, l'analyse des manuels et des traités les plus marquants, l'exploitation des sujets d'examen et de concours permettent une première approche des contenus.

L'étude de l'enseignement des sciences nécessite une analyse suivant les différentes composantes disciplinaires qui ont chacune leur spécificité : sciences de déduction, sciences d'expérience, sciences d'observation. L'organisation des cursus amène à définir les lignes de partage en imposant des découpages disciplinaires — problème qui touche celui de la classification des sciences — et entraîne le choix de certains couplages comme celui de la physique avec la chimie dans l'enseignement français.

Une étude sur le temps long, du XIX^e au XX^e s., fait apparaître une permanence dans les problèmes rencontrés et la pérennité de certains discours. Mais l'étude de l'évolution de l'enseignement des sciences doit être menée en prenant en compte l'importante notion de décalage. On peut noter des décalages dans le temps long, mais il convient aussi de souligner l'existence, à une époque donnée, de décalages fort divers : décalage entre la science enseignée et la science savante, décalage entre les mesures adoptées et la réalité de l'application, décalage entre les projets et les choix effectués, décalage entre les discours des savants et leur pratique effective, etc.

Un élément décisif du système éducatif est constitué par l'enseignement secondaire qui ouvre la voie aux études en facultés. Il constitue donc, en association avec la formation de ceux qui le dispensent, un noyau dur dans l'étude de l'enseignement des sciences. Dans un parcours allant du XIX^e au XX^e s. il faut souligner l'important décalage qui concerne le public d'élèves visés par l'enseignement secondaire qui, pour répondre à une demande sociale d'enseignement réservé à une élite, s'est orienté vers un enseignement de masse. Tout au long du XIX^e s. l'enseignement secondaire français, non gratuit, concerne moins de 5 % des enfants ; les effectifs évoluent entre 100 000 et 200 000 du milieu du XIX^e s. à 1950 et atteignent le million en 1960.

Du fait de leur développement, les sciences jouent un rôle de plus en plus important dans notre société et le problème se pose d'une diffusion de la connaissance scientifique vers un très large public. Sur l'exemple de l'enseignement français une mise en perspective historique, montrant les évolutions tout en

mettant en évidence des permanences et des décalages, peut contribuer à alimenter une réflexion de fond sur les problèmes posés au seuil du XXI^e s.

Différences disciplinaires

Si dès les débuts de l'Université impériale le doctorat a une triple spécialisation (sciences mathématiques, physiques et naturelles) le concours d'agrégation pour le recrutement des professeurs de lycée est unique et l'histoire naturelle n'y joue aucun rôle. Spécialiser l'agrégation, pour accroître la compétence scientifique des enseignants, pose dans les années 1830-1840 le problème du choix des couplages disciplinaires avec l'affrontement du physico-mathématicien Poisson et du chimiste Thenard autour de la place à réserver à la physique qui apparaît comme un élément charnière. Le premier ne veut pas la séparation de la physique et des mathématiques, le second souhaite maintenir liées la physique et la chimie. Finalement en 1840, après la mort de Poisson, les deux spécialités retenues pour l'agrégation sont les mathématiques d'une part, les sciences physiques et naturelles d'autre part. De ce fait la physique est éclatée, tout au long du XIX^e s., en une physique mathématique et une physique expérimentale liée à la chimie.

L'enseignement est marqué par la suprématie des mathématiques et leur rapide prise d'autonomie. En fait il s'opère une partition entre les sciences abstraites et les sciences d'observation et d'expérience, ces dernières incluant physique, chimie, histoire naturelle. Certes sur les quelque mille docteurs ès sciences de la Faculté des sciences de Paris au XIX^e s. on en compte un peu moins du quart en mathématiques (23 % pour 36 % en sciences naturelles et 41 % en sciences physiques). Mais au XIX^e s. l'enseignement secondaire, qui est dominé par les humanités, privilégie les mathématiques au sein de l'enseignement scientifique. La classe où débute l'enseignement des sciences est fort variable, l'enseignement de sciences physiques étant repoussé en fin de cursus dans toute la première moitié du siècle. L'augmentation de la part réservée aux sciences dans le plan d'études de 1880 bénéficie, d'une manière notable, à l'histoire naturelle. Les naturalistes s'en félicitent, regrettant que l'enseignement scientifique ait eu trop longtemps pour but de développer la faculté logique aux dépens de la faculté d'observation en accordant la prééminence aux mathématiques.

L'École normale, qui prépare les futurs professeurs, recrute tout au long du XIX^e s. sur la base d'un concours unique dominé par les mathématiques. L'importance accordée à l'unité de formation fait exclure toute spécialisation dès la première année d'École. De ce fait les choix disciplinaires des normaliens privilégient les mathématiques et le pourcentage d'orientations vers les sciences naturelles reste très faible. Ce n'est qu'au début du XX^e s. que le concours d'entrée est diversifié alors que la triple spécialisation de l'agrégation est instaurée depuis 1869. Notons cependant l'évolution non linéaire de ce concours avec un retour en 1852 à une

agrégation unique de sciences pour assurer une polyvalence des professeurs, leur permettant « des pénétrations fréquentes de l'une des divisions artificielles de la science dans l'autre » (*Archives de l'Académie des sciences*, cartons Dumas).

Définir le domaine enseigné en situant les disciplines les unes par rapport aux autres tout en indiquant les points de rapprochement est un souci commun aux savants qui enseignent à l'École normale de l'an III. Lagrange et Laplace soulignent l'enrichissement réciproque des mathématiques et de la physique ; Haüy oppose « théorie » et « classification » pour situer la physique par rapport à l'histoire naturelle et fait apparaître le rôle charnière de la physique entre la chimie et les mathématiques. Berthollet, quant à lui, situe la chimie au sein de la triade « physique — chimie — histoire naturelle », alors que Daubenton insiste sur les différences entre l'histoire naturelle et la chimie, la « destruction » étant « le point de partage ». Mais, au fur et à mesure que les sciences progressent les limites de séparation vont en s'estompant alors que l'extension du domaine des connaissances impose la spécialisation des études. Le rapport de Pierre Bourdieu et François Gros de 1989, *Principes pour une réflexion sur les contenus de l'enseignement*, invite à « repenser les divisions en disciplines, en soumettant à l'examen certains regroupements hérités de l'histoire et en opérant [...] certains rapprochements imposés par l'évolution de la science ».

Les sciences au lycée

Les lycées créés en 1802 concernent les seuls garçons, l'enseignement féminin n'étant organisé qu'en 1880 par la loi Sée et d'une manière différente de son homologue masculin. Dans la première moitié du XIX^e s. il s'agit avant tout de dispenser une culture désintéressée et les humanités sont prédominantes. Cependant les mutations économiques profondes qui se produisent au cours du siècle, en liaison avec les progrès des sciences et des techniques, imposent des évolutions au système éducatif. Dès le premier quart du XIX^e s. (en relation avec la poussée industrielle des années 1821-1825) une réflexion est menée pour adapter l'enseignement aux besoins des diverses classes de la société et faire une plus large place aux sciences. Avec des études secondaires, qui ne tiennent pas compte de la diversité des vocations, qui jettent tous les esprits dans un même moule, les crises qui se succèdent font redouter la formation de « déclassés » représentant un danger potentiel pour l'État (*Archives de l'Académie des sciences*, cartons Dumas).

Des projets établissant deux divisions, l'une littéraire et l'autre scientifique, sont avancés par V. Cousin en 1834 et J.-B. Dumas en 1847. Lorsqu'il devient ministre de l'Instruction publique en 1840, V. Cousin ne met pas son projet en application ; dans le nouveau plan d'études qu'il établit il rejette même l'ensemble de l'enseignement des sciences en classe de philosophie, soulignant que pour lui il s'agit « des sciences

prises au sérieux » (V. Cousin, *Œuvres. Instruction publique*, Paris, Pagnerre, 1850, t. 1, p. 185-186). C'est le Second Empire qui va fournir le cadre propice à une réforme des études secondaires. Le développement économique renforce les besoins, la fermeté politique offre des moyens d'intervention plus directs et l'influence des saint-simoniens favorise la réforme. Cette réforme, dite de la « bifurcation des études », reprend des éléments importants tant du projet Cousin que du projet Dumas. Établie en 1852 elle constitue une étape décisive dans l'évolution de l'enseignement secondaire français. Deux filières sont alors distinguées à partir de la troisième, l'une littéraire et l'autre scientifique ; des éléments de mathématiques sont enseignés dès la sixième et les autres disciplines scientifiques sont incluses dans les cursus dès la classe de troisième. Les deux filières sont équivalentes par la durée et la sanction des études ; le baccalauréat ès sciences devient alors indépendant du baccalauréat ès lettres, ce qui constitue un acquis définitif (jusqu'à là les aspirants au baccalauréat ès sciences devaient produire le baccalauréat ès lettres).

Cette réforme est marquée par une orientation utilitaire, liée à certaines motivations qui ont conduit à favoriser le développement de l'enseignement des sciences, considéré comme pouvant être conçu d'une manière idéologiquement saine en le bornant à une information, une acquisition utilitaire des connaissances. Une telle orientation est en accord avec l'objectif explicité par le ministre H. Fortoul de « modifier les méthodes d'éducation qui ont produit trop d'esprits stériles et dangereux » (décret du 10 avril 1852). D'ailleurs la dénomination classe de philosophie disparaît alors au profit de celle de classe de logique. Marquée par le caractère autoritaire du régime qui l'a établie, la réforme rencontre – pour des raisons diverses – un échec à court terme.

La « bifurcation » est supprimée en 1864 par V. Duruy qui revient à une conception plus traditionnelle des études classiques. Pour lui, il faut enseigner les sciences dans un ordre logique, avec les mathématiques à la base et les sciences physiques au sommet (circulaire du 22 septembre 1863). Cependant il introduit une innovation importante avec la création, en parallèle, d'un enseignement sans latin débutant en sixième, l'enseignement secondaire spécial qui, en évoluant, devient en 1891 l'enseignement moderne.

La réforme Fortoul, de durée éphémère, a introduit un mode d'organisation des études secondaires qui est repris au XX^e s., la nécessité d'un système de bifurcation des études s'imposant alors définitivement du fait de la surcharge des programmes. La réforme de 1902 réalise en quelque sorte une synthèse des deux plans Fortoul et Duruy : un enseignement sans latin débutant en sixième en parallèle avec l'enseignement classique qui offre une « trifurcation » après la troisième. On veut alors constituer des « humanités scientifiques ». Ainsi, cinquante ans après la réforme Fortoul, le développement des sciences entraîne une diversification des études à laquelle on ne pourra plus renoncer et un choix

est alors admis entre divers genres de culture générale. La réforme Carcopino de 1941 adopte un système voisin de celui de 1902, mais dans la deuxième moitié du XX^e s. une diversification des études plus large s'impose pour faire face à une explosion de la demande sociale d'enseignement.

Science et enseignement

À la fin du XIX^e s. les sciences sont en pleine époque de progrès et les enseignements se sont diversifiés dans les facultés, mais la définition du contenu des licences (malgré des accroissements) reste inchangée depuis 1808 avec les trois groupements : calcul intégral, mécanique rationnelle et astronomie ; physique, chimie et minéralogie ; zoologie, botanique et géologie. Cette organisation interdisait d'autres groupements de matières tout aussi rationnels, voire même plus utiles ; en effet, le physicien a besoin des mathématiques et le naturaliste doit connaître la physique et la chimie pour aborder la physiologie. D'ailleurs, comme le souligne en 1891 J. Tannery, c'est « dans les régions où les diverses sciences se rejoignent et se mêlent que le savant peut [...] avoir l'espoir de faire moisson de découvertes ». Aussi en 1896 la licence est réformée ; elle est alors définie par trois certificats d'études supérieures délivrés par les facultés des sciences dans les matières enseignées par elles, ce qui autorise des combinaisons variées propres à encourager l'originalité d'esprit.

Le tournant du siècle est aussi marqué par la réforme de 1902 qui établit de nouveaux programmes pour le secondaire et introduit un nouvel esprit dans l'enseignement scientifique. Mais, cinquante ans plus tard, les programmes sont restés pour l'essentiel quasiment inchangés. Or dès les premières décennies du XX^e s. des évolutions profondes sont intervenues dans les disciplines. D'une part il s'est produit un renouvellement de la pensée mathématique marqué par les travaux du groupe Bourbaki ; d'autre part l'avènement de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique ont modifié profondément la physique qui connaît bientôt un développement explosif dans le domaine microscopique et subit des réaménagements importants. Deux grandes réformes vont, dans les années 1960-1970, rénover les contenus de l'enseignement secondaire : d'abord la réforme des « mathématiques modernes » où l'aspect formel occupe une place prépondérante, puis la réforme Lagarrigue en physique dont l'objectif est de présenter avec le maximum d'authenticité les méthodes fondamentales de la discipline : recours aux « superlois » (conservation, invariance, symétrie), modélisation, formalisation, expérimentation. La nouvelle orientation de l'enseignement des mathématiques est alors l'objet de prises de position polémiques de la part des physiciens, telle cette déclaration officielle formulée en 1970 : « C'est l'envahissement par les mathématiques délibérément les plus abstraites. Négligeant toute la réalité historique du développement de sa propre science [...] la

pédagogie mathématicienne entend couler l'ensemble des élèves dans le monde unique d'une discussion linéaire à travers une succession figée d'axiomes et de théorèmes. Épistémologiquement contestable, un tel enseignement prend rapidement pour fonction essentielle de détourner des sciences. [...] Cette école de dogmatisme a pour dernier souci [...] de veiller à fournir aux autres disciplines les outils mathématiques qui leur sont nécessaires » (in M. Hulin, *Le Mirage et la nécessité*, p. 41).

Quelques décalages

Nombreux sont les décalages à prendre en compte, et tout d'abord celui qui intervient dans le contenu des mots. Ainsi le terme de physique théorique utilisé au XIX^e s. concerne le simple exposé des théories, réservant à la physique mathématique les calculs développés au sujet d'une situation physique par opposition à la physique expérimentale. De même le terme problème de physique utilisé au XIX^e s. s'applique à ce qui dans notre terminologie actuelle constitue un exercice, le terme de problème faisant désormais référence à un ensemble structuré de questions. Mais ce décalage peut venir de l'évolution du contexte conceptuel. Ainsi l'importance accordée au principe de conservation de l'énergie doit être située bien différemment au début et à la fin du XX^e s. Si en 1902 on restructure le cours de physique en donnant de l'importance à ce principe, celui-ci occupe une place centrale à la fin du siècle. Cependant le contexte conceptuel est tout autre. D'un côté il y a rejet de tout ce qui n'est pas réalité observable et, de l'autre, la primauté est accordée aux « superlois » directement liées au processus de formalisation mathématique, à l'intervention généralisée de la théorie des groupes en physique.

Science enseignée et science savante sont en décalage dans le temps car l'enseignement ne peut intégrer des nouveautés n'ayant pas reçu une sanction suffisante. Mais le poids des idéologies dominantes peut produire certains blocages : tel est le cas de la théorie atomique et de l'influence exercée par le positivisme. Si A. Würtz souligne en 1875 l'utilité de la théorie des atomes dans l'enseignement, si P. Langevin insiste en 1904 sur l'intérêt pédagogique de son introduction, ces conceptions sont en opposition avec celles des physiciens positivistes qui, comme W. Ostwald, donnent la prééminence aux faits et à l'observation, qui rejettent les « explications illusives » auxquelles conduisent « les hypothèses qui substituent une image possible à la réalité observable ». Aussi, explique G. Bachelard, l'hypothèse atomique figurait « en appendice pour bien marquer qu'on devait enseigner toute la chimie sous la bonne forme positiviste – par les faits et seulement par les faits », les auteurs évitant de prononcer le mot atome dans l'exposé du cours (*Les intuitions atomistiques*, Paris, Vrin, 2^e éd., 1975, p. 84-86).

Science enseignée et science savante sont en décalage, ne serait-ce qu'en raison des objectifs différents assignés au savant et à l'enseignant, ou, en reprenant

les termes d'E. Renan, au « fabricant » et au « débiteur » de science. Mais avec l'évolution des disciplines la situation se complique considérablement. Ainsi la physique pratiquée par le physicien à la fin du XX^e s. est une science très complexe, associant des « pratiques expérimentales raffinées – et elles-mêmes fondées sur la physique ! – à des techniques mathématiques difficiles, et à une conceptualisation très abstraite » (M. Hulin, *op. cit.*, p. 175). Il en résulte nécessairement un décalage accru entre la physique des physiciens et la physique enseignée au lycée.

Masculin – Féminin

L'enseignement féminin présente par rapport à l'enseignement masculin deux types de décalage : un décalage dans le temps pour son organisation et un décalage dans sa conception même.

La loi Sée (1880) marque le début de l'enseignement secondaire féminin. Il est conçu différemment de son homologue masculin créé au début du XIX^e s. : il s'agit d'un enseignement de type moderne, qui ne mène pas au baccalauréat et, par conséquent, ne donne pas accès aux facultés. Si le projet de loi présenté par Camille Sée prévoit un enseignement des « sciences mathématiques, physiques et naturelles », le texte définitif retient « une formule plus modeste », plus restrictive, à savoir « l'arithmétique, les éléments de la géométrie, de la physique, de la chimie et de l'histoire naturelle ». On considère en fait que les mathématiques constituent pour les jeunes filles une introduction à l'étude des sciences physiques et naturelles qu'un esprit cultivé ne peut ignorer. Ainsi l'enseignement scientifique qui leur est destiné est-il rendu plus élémentaire.

L'orientation particulière donnée à l'enseignement féminin est confirmée lorsqu'après la création de l'École normale de Sèvres en 1881, est instituée en 1884 une agrégation unique de sciences pour les jeunes filles, alors qu'à cette date trois spécialités sont distinguées pour les hommes. Le concours féminin présente la spécificité de comprendre à l'écrit une composition littéraire. Celle-ci, de poids non négligeable, porte sur un sujet de morale ou d'éducation et subsiste encore dans le premier quart du XX^e s. La présence de cette composition au concours est justifiée par « l'utilité qu'il y aurait à ne pas laisser étrangères aux exercices de littérature ou à l'art d'écrire les jeunes filles qui suivront la carrière des sciences » (arrêté du 5 janvier 1884). Toutefois, en 1894, deux spécialités sont créées à l'agrégation féminine : sciences mathématiques, sciences physiques et naturelles.

Cependant dès la fin du XIX^e s. des pionnières obtiennent des diplômes masculins : agrégation de mathématiques en 1885, doctorat ès sciences naturelles en 1888 et 1889, doctorat ès sciences mathématiques en 1893. Les thèses soutenues à la Faculté des sciences de Paris dans les trois premières décennies du XX^e s. attestent d'une poussée féminine mais aussi d'orientations disciplinaires bien marquées, avec seulement une thèse en

mathématiques et une large domination des thèses de sciences naturelles alors que celles de sciences physiques concernent essentiellement la chimie.

En 1924 la loi Bérard identifie les enseignements secondaires féminin et masculin, mais les agrégations restent distinctes. Certains sont opposés à leur fusion, comme le mathématicien H. Lebesgue qui invoque l'incapacité physiologique des femmes à faire face au vaste programme imposé aux hommes. Une telle position est dénoncée par le physicien G. Bruhat qui argue de l'expérience pour affirmer l'identique capacité des cerveaux féminins et masculins. En 1927 l'agrégation de sciences naturelles devient mixte et le XX^e s. va réaliser peu à peu l'assimilation complète des études masculines et féminines. Il reste cependant à combler un déficit au niveau des orientations féminines vers les sciences et à rééquilibrer leurs choix disciplinaires.

Permanences et évolutions

Des thèmes permanents apparaissent dans les discours tenus : classe où doit débiter l'enseignement des sciences, développement de la créativité des élèves, place des enseignements de technologie à l'Université, recours à l'histoire des sciences, etc. Un thème aux occurrences multiples, mais aussi en rapport avec des motivations variables, est celui du caractère expérimental de la physique.

La physique expérimentale s'est développée en France au milieu du XVIII^e s. sous l'influence de l'abbé Nollet. Avec le XIX^e s. apparaît un discours militant en faveur du caractère expérimental de la physique et, du XIX^e au XX^e s., se succèdent des affirmations de principe pouvant associer la recommandation de la méthode inductive à la nécessité du recours à l'expérience. Toutefois des réserves critiques sont émises sur ces orientations, comme celle formulée par G. Bachelard : « Attachez les jeunes esprits au concret, aux faits. Voir pour comprendre, tel est l'idéal de cette étrange pédagogie. Tant pis si la pensée va ensuite du phénomène mal vu à l'expérience mal faite » (« Recherches philosophiques 1931-1932 », *Études*, Paris, Vrin, 1970, p. 12).

Peu à peu la physique est présentée comme une science expérimentale modèle. Une place va être réservée dans l'enseignement à l'activité expérimentale : création d'épreuves pratiques à l'agrégation en 1852, introduction de travaux pratiques pour les élèves dans les lycées en 1902, instauration du montage de physique en 1904.

Les motivations pour cette insistance sont à situer dans des contextes variables. Au milieu du XIX^e s. le chimiste J.-B. Dumas avance l'argument qu'en développant l'aspect expérimental de l'enseignement de la physique on le rendra accessible à la « masse des élèves ». Mais, en fait, c'est une manière d'affirmer la différence entre physique et mathématiques et de justifier ainsi le bien-fondé du couplage de la physique avec la chimie plutôt qu'avec les mathématiques. Lors de la réforme de 1902 le discours officiel, tout en affirmant

l'unité de la science, souligne l'apport spécifique des sciences physiques, à savoir « la notion de vérité positive, c'est-à-dire du fait expérimentalement constaté » et donne ainsi une justification à la place qui vient de leur être faite dans la culture secondaire aux côtés des « mathématiques abstraites ». Dans les années 1970, avec la commission Lagarrigue, le discours est teinté d'une certaine ambiguïté en raison de la place de choix réservée à la physique microscopique. Certes c'est encore une manière de situer la physique par rapport aux mathématiques dont l'enseignement vient d'être rénové (réforme des mathématiques modernes), mais un élément nouveau apparaît dans le discours, l'affirmation de la nécessité de respecter autant que possible les caractéristiques épistémologiques de la discipline, l'interaction dialectique entre l'activité expérimentale et l'activité théorique.

À côté d'affirmations de principe ou de la constance d'objectifs énoncés, demeure une permanence de certains problèmes. Tel est le cas de celui de la formation des professeurs et de son articulation autour de deux pôles : l'acquisition des savoirs et leur transmission. D'un siècle à l'autre le contexte est extrêmement évolutif, avec une permanence des enjeux économiques et culturels alors que s'opère un glissement des rivalités disciplinaires lettres - sciences, mathématiques - sciences expérimentales.

Au XIX^e s., où les humanités dominent, le problème est de développer l'enseignement scientifique où les mathématiques vont occuper une place privilégiée. Puis se pose le problème de la place à accorder aux différentes disciplines. Dans les années 1920 on conçoit la possibilité de constituer deux types d'enseignement scientifique, l'un à tendance plus abstraite ou plus mathématique, l'autre à tendance plus concrète ou plus expérimentale. Dans les années 1970 est avancée l'idée d'une formation axée sur deux pôles, les mathématiques et les sciences expérimentales (physique, chimie, biologie et disciplines techniques), tout en insistant sur la nécessité d'une formation générale harmonieuse réalisant l'équilibre entre les disciplines abstraites et les sciences d'observation et d'expérimentation.

L'importance de l'enseignement des sciences dans la formation du citoyen, déjà soulignée au milieu du XIX^e s. par l'économiste saint-simonien Michel Chevalier, est perçue avec une acuité accrue dans le monde actuel. Ainsi l'un des objectifs désormais assignés à l'enseignement est de préparer les élèves aux « choix politiques, économiques, sociaux, voire d'éthique » auxquels doivent procéder nos sociétés, en leur fournissant « un mode d'emploi des sciences et des techniques » (programmes de sciences physiques, 1992). Cette idée s'est construite dans une réflexion critique menée, dans les années 1980, par Michel Hulin, l'un des acteurs de la réforme Lagarrigue, l'amenant à conclure à la nécessité d'une « épistémologie sociale » (*op. cit.*, p. 23, 145, 176). Un tournant apparaît ici avec la substitution d'une capacité à gérer le savoir scientifique à une compétence scientifique largement partagée.

► BACHELARD G., *Le Nouvel Esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934. — BELHOSTE B., GISPERT H. & HULIN N. dir., *Les sciences au lycée*, Paris, Vuibert/INRP, 1996. — FOX R. & WEISZ G. dir., *The Organization of Science and Technology in France 1808-1914*, Cambridge Univ. Press, et Paris, MSH, 1980. — HULIN M., *Le Mirage et la nécessité*, Paris, PENS, et Palais de la Découverte, 1992. — HULIN N. (dir.), *Physique et « humanités scientifiques »*, Villeneuve d'Ascq, Septentrion, 2000 ; *Sciences naturelles et formation de l'esprit*, Villeneuve d'Ascq, Septentrion, 2002 ; *Les femmes et l'enseignement scientifiques*, Paris, PUF, 2002. — HULIN-JUNG N., *L'Organisation de l'enseignement des sciences*, Paris, CTHS, 1989. — SIRINELLI J.-F. dir., *Livre du bicentenaire de l'École Normale Supérieure*, Paris, PUF, 1994.

Nicole HULIN

→ Académies ; Muséum national d'histoire naturelle ; Vulgarisation.

ENSEMBLE

MATHÉMATIQUES

Notion intuitive

Un troupeau de chèvres, un groupe d'enfants dans une cour de récréation, un tas de petits pois sur la table de la cuisine, quelques fruits dans un compotier, les grains de sable d'une plage, autant d'exemples de la notion intuitive d'ensemble. Il y a probablement une notion d'ensemble plus ancienne que celle de nombre, si on pense aux façons de compter le nombre des bêtes d'un troupeau en mettant dans un sac un caillou par bête ou en faisant sur un bâton une encoche par bête. Si gros qu'il soit, un troupeau a un nombre fini de bêtes ; de même est fini le nombre des petits pois écosés pour le déjeuner. Pour le nombre des grains de sable, c'est apparemment plus difficile à dire : il nous faudrait savoir comment distinguer le fini de l'infini. Et pour cela l'intuition est insuffisante.

Concept mathématique. Les origines

La notion mathématique d'ensemble s'est précisée, imposée au XIX^e s. comme instrument nécessaire pour former un concept mathématique de l'infini. Commencée par Bernard Bolzano (1781-1848) dans son ouvrage posthume, *Les Paradoxes de l'infini*, cette mathématisation est accomplie dans les travaux de Richard Dedekind (1831-1916) et de Georg Cantor (1845-1918). C'est d'abord séparément que ces deux mathématiciens créent une nouvelle branche des mathématiques, la théorie des ensembles. Ensuite, encouragé par un dialogue épistolaire permanent avec Dedekind et mu par les problèmes que lui pose, la compréhension du continu, Cantor conçoit une nouvelle numération, la numération transfinitie. Dedekind a probablement connu l'ouvrage de Bolzano, dont Hermann Hankel (1839-1873) signale l'intérêt dans l'article « Grenze » de l'*Encyclopédie générale des sciences et des arts* publiée en 1871 à Leipzig. Cantor

le connaît très certainement dès 1870 ; il l'apprécie comme l'unique anticipation, encore imparfaite, de son propre travail.

La théorie des « systèmes » de Richard Dedekind. — Dès ses premiers mémoires, Dedekind calcule sur les ensembles — qu'il appelle « systèmes » — comme s'il s'agissait de nombres. Dans sa théorie des idéaux, qui apparaît dans le *X^e Supplément aux Leçons de théorie des nombres de Dirichlet* (1871), il introduit les opérations sur les ensembles par traduction des opérations algébriques sur les nombres. Dedekind systématise sa pensée dans son fameux opuscule, *Que sont et que doivent être les nombres ?*, rédigé entre 1872 et 1878, publié seulement en 1888. Un ensemble S y est défini comme étant différentes choses a, b, c, ... réunies sous un même point de vue, « rassemblées dans la pensée ». a, b, c, ... sont dites « éléments » de S, en notation actuelle $a \in S$. S est « parfaitement déterminé si on peut déterminer pour chaque chose si elle est élément de S ou non ». Dedekind définit ensuite l'égalité, l'inclusion, la réunion et l'intersection de deux ensembles : $S = T$ si tout élément de S est élément de T et réciproquement ; $S \subset T$ si tout élément de S est élément de T (on dit que S est une partie ou un sous-ensemble de T ; si l'inclusion est stricte, c'est-à-dire si $S \subset T$ et $S \neq T$, on parle de sous-ensemble propre) ; la réunion $S \cup T$ est l'ensemble des éléments qui appartiennent à S ou à T ; l'intersection $S \cap T$ est l'ensemble des éléments qui appartiennent à S et T à la fois. Dedekind envisage des ensembles composés d'un seul élément, mais ne distinguera que plus tard, dans un inédit publié seulement en 1971 sous le titre « Appartenance et inclusion », entre l'élément a et l'ensemble {a} dont le seul élément est a. En revanche, il exclut l'ensemble vide. Dedekind reprend la définition de J.P. Lejeune Dirichlet (1805-1859) d'une application f : loi qui à tout élément s d'un ensemble S fait correspondre un élément bien déterminé f(s), image de s dans un ensemble T. Il définit la propriété d'injectivité : f est injective (*ähnlich*) si elle fait correspondre à deux éléments distincts a et b deux images distinctes f(a) et f(b). Une application injective f de S dans l'image f(S) est bijective : f admet alors une application inverse f⁻¹, de f(S) dans S ; on a f⁻¹(f(s)) = s. Deux ensembles S et T sont semblables (*ähnlich*) s'il existe une application f injective telle que T = f(S). Cette relation de « similitude » est une relation d'équivalence ; aussi Dedekind envisage-t-il de partager tous les ensembles en classes de sorte qu'à une classe déterminée appartiennent tous les ensembles équivalents à un ensemble donné S. Dedekind ne se doutait pas du paradoxe qui consiste à considérer la notion d'ensemble de tous les ensembles sur lequel est définie la relation d'équivalence considérée.

Georg Cantor et les ensembles de points. — Tandis que Dedekind introduit les notions d'ensemble et d'application pour résoudre des problèmes d'algèbre et d'arithmétique et fonder la notion de nombre entier,

Cantor est conduit aux mêmes notions par ses recherches sur les séries trigonométriques. En 1870, il démontre le résultat suivant : soit une fonction à variable réelle $f(x)$, donnée par une série trigonométrique : $f(x) = 1/2a_0 + \sum (a_n \sin nx + b_n \cos nx)$; si la série converge vers 0 pour toute valeur de x , alors tous les coefficients a_n et b_n sont nuls. Cantor généralise ce théorème dans le cas où, dans un intervalle borné I , il y a un nombre fini de points pour lesquels $f(x)$ n'est pas nulle ou bien la série trigonométrique n'est pas convergente. Puis il s'interroge sur ce qui se passe si l'ensemble des points d'exception est infini. La réponse se trouve dans un mémoire de 1872, considéré par Ernst Zermelo (1871-1953) comme « le lieu de naissance de la théorie cantorienne des ensembles ». Il y introduit, en effet, la notion de point d'accumulation d'un sous-ensemble réel borné E : x est un point d'accumulation de E si tout intervalle ouvert contenant x contient une infinité de points de E . L'ensemble E' des points d'accumulation de E est appelé le premier ensemble dérivé de E . Si E' n'est pas composé d'un nombre fini d'éléments, on peut répéter l'opération et considérer le deuxième ensemble dérivé E'' de E , et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on arrive à un ensemble $E^{(n)}$ qui a un nombre fini de points et dont le dérivé $E^{(n+1)}$ est vide. On dit alors que E est de n -ème espèce. Cantor démontre que son théorème demeure vrai si l'ensemble des points d'exception de la fonction $f(x)$ est de n -ème espèce, c'est-à-dire aboutit à l'ensemble vide après un nombre fini de dérivations. Cantor introduit dans le même article de 1872 la définition des nombres réels comme limites de suites de Cauchy de nombres rationnels et formule l'axiome de correspondance bijective entre nombres réels et droite du plan, représentation numérique et représentation géométrique respectivement du « continu linéaire ». La même année Dedekind publie *Continuité et nombres irrationnels*, où les nombres réels sont construits par le procédé des coupures. Il n'a pris connaissance du travail de Cantor sur le même sujet qu'au moment d'écrire la préface de son opuscule et souligne en une phrase la coïncidence de leurs points de vue. Les deux constructions ont ceci en commun : la considération de collections infinies traitées comme des tous achevés et bien déterminés. C'est en cela précisément que consiste l'admission explicite, en mathématiques, de l'infini actuel.

L'élaboration progressive de la théorie des ensembles

Après l'avoir rencontré en Suisse au cours d'un voyage d'agrément, Cantor entame avec Dedekind une correspondance qui se poursuit jusqu'en 1899 et sert de banc d'essai aux principales idées de la théorie des ensembles. L'analyse de cette correspondance permet de suivre pas à pas l'élaboration de la nouvelle théorie et de mesurer l'influence grandissante sur Cantor du style rigoureux et dépouillé de l'algébriste qu'était Dedekind.

Le 29 novembre 1873, Cantor écrit à Dedekind pour

lui soumettre la question de savoir s'il existe une bijection entre l'ensemble \mathbb{N} des entiers naturels et l'ensemble \mathbb{R} des nombres réels. Cantor évoque le fait qu'une telle bijection existe entre \mathbb{N} et l'ensemble $\mathbb{Q} = \mathbb{N}^2$ des nombres rationnels et, plus généralement, entre \mathbb{N} et \mathbb{N}^k , pour un entier k strictement positif. Dedekind répond par retour de courrier en énonçant et démontrant la proposition que même l'ensemble de tous les nombres algébriques, c'est-à-dire de tous les nombres qui sont solutions d'une équation algébrique à coefficients entiers, peut être mis en correspondance bijective avec \mathbb{N} . Par une lettre du 7 décembre 1873, Cantor envoie, aussitôt qu'il l'a trouvée, sa première démonstration de l'inexistence d'une bijection entre \mathbb{N} et l'intervalle réel $]0,1[$. Dedekind répond en simplifiant la démonstration. Cet important résultat montre que l'infini de l'ensemble des nombres réels n'est pas « le même » que celui des nombres entiers, et qu'il existe donc au moins deux infinis distincts, le dénombrable représenté par \mathbb{N} , et le continu représenté par \mathbb{R} . La voie est par là ouverte à une classification des ensembles infinis.

Le 5 janvier 1874, Cantor pose à Dedekind un nouveau problème : « Est-ce qu'une surface (par exemple un carré, frontière comprise) peut être mis en relation univoque avec une courbe (par exemple un segment de droite, extrémités comprises), de telle sorte qu'à tout point de la surface corresponde un point de la courbe et réciproquement ? » Plus de trois ans après, le 20 juin 1877, Cantor envoie à Dedekind sa première démonstration d'une bijection entre l'intervalle réel $]0,1[$ et le carré de côté cet intervalle. Le 22 juin, Dedekind lui fait observer que la démonstration est incomplète. Le 25 juin, Cantor lui adresse une nouvelle démonstration et, le 29 juin, le presse de lui répondre en insistant sur le caractère inattendu de son résultat : « Ce que je vous ai communiqué tout récemment, écrit-il, est pour moi si inattendu, si nouveau, que je ne pourrai pour ainsi dire pas arriver à une certaine tranquillité d'esprit avant que je n'aie reçu, très honoré ami, votre jugement sur son exactitude ? Tant que vous ne m'aurez pas approuvé, je ne puis que dire : je le vois, mais je ne le crois pas. » Dedekind le rassure le 2 juillet 1877, Cantor publie alors son résultat dans un mémoire (*Ein Beitrag zur Mannigfaltigkeitslehre*) où il définit la notion de puissance : deux ensembles M et N ont même puissance ou sont « équivalents » s'il existe une application bijective de M sur N . Par exemple l'ensemble \mathbb{R} des nombres réels est « équivalent » à l'ensemble \mathbb{R}^2 des couples de nombres réels, et aussi à l'ensemble \mathbb{R}^3 des triplets de nombres réels, et, plus généralement, à l'ensemble \mathbb{R}^n des n -uplets de nombres réels. La notion géométrique de dimension comme nombre de coordonnées indépendantes semble ruinée. Mais, comme le fait remarquer Dedekind à Cantor, la correspondance bijective qu'il a fabriquée entre la ligne et la surface n'est pas continue : elle est même partout discontinue : « Vous êtes obligé, écrit-il, d'introduire dans la correspondance une discontinuité à donner le vertige, qui réduit tout en atomes, telle que toute partie continûment connexe, si

petite qu'elle soit, de l'un des domaines a une image complètement déchirée, discontinue. » Aussi « le nombre de dimensions d'une multiplicité continue est, après comme avant, le premier et le plus important de ses invariants ». Cantor essaie de démontrer l'invariance de la dimension par transformation bijective et bicontinue. Une démonstration absolument correcte sera fournie par L.E.J. Brouwer (1881-1966) en 1911. Il est alors définitivement clair que la notion de dimension d'un continu n'intervient pas dans celle de puissance de ce continu. Plus généralement, les questions de cardinalité se règlent indépendamment de la topologie.

Cantor parle donc de l'équivalence de deux ensembles corrélés bijectivement, là où Dedekind parle de similitude. Ces deux termes ont laissé place, aujourd'hui, à celui d'équipotence, plus précis. Cantor relève que, dans le cas d'ensembles finis, le concept de puissance coïncide avec celui de nombre entier et insiste sur un fait déjà signalé par Bolzano : un ensemble infini n'a pas nécessairement la propriété des ensembles finis, qui ont une puissance supérieure à celle de chacune de leurs parties propres. En d'autres termes, un ensemble infini peut être mis en bijection avec une de ses parties propres : ainsi l'ensemble des entiers positifs et l'ensemble, strictement inclus dans le premier, des entiers positifs et pairs. Cantor appelle « de première classe » les ensembles qui ont la même puissance que \mathbb{N} , énonce que toute partie infinie d'un ensemble de première classe est de première classe et que la réunion dénombrable d'ensembles de première classe est un ensemble de première classe. Il pense pouvoir démontrer qu'il n'y a que deux classes de sous-ensembles infinis de \mathbb{R} , celle des sous-ensembles qui ont la puissance du dénombrable et celle des sous-ensembles qui ont la puissance du continu. C'est la première formulation de ce qu'on appellera plus tard « l'hypothèse du continu » (HC), par laquelle Cantor tâche de passer de la topologie à une arithmétique transfinie. Le problème du continu, celui de savoir s'il y a plus de deux puissances distinctes immergées dans le continu, fut un puissant moteur de développement de la théorie des ensembles. C'est avec l'idée de pouvoir le résoudre que Cantor avance pas à pas dans la construction de celle-ci, à laquelle il fit endosser après coup le rôle de fondation abstraite pour toutes les mathématiques. En 1882, il écrira en effet que « la plupart des difficultés de principe que l'on rencontre en mathématiques ont leur origine dans le fait que l'on méconnaît la possibilité d'une théorie purement arithmétique des grandeurs et des ensembles » (*Œuvres*, p. 156, note). La théorie des ensembles s'impose, pour ainsi dire, dans le processus, auquel Cantor a fortement contribué, d'arithmétisation de la géométrie et de l'analyse.

Entre 1879 et 1884, Cantor publie dans les *Mathematische Annalen* une série d'articles (« Über lineare unendliche Punktmanigfaltigkeiten »). Le cinquième article de la série, « Grundlagen einer allgemeinen Mannigfaltigkeitslehre », est particulièrement instructif par l'examen

qu'y fait Cantor des conceptions de l'infini livrées par les traditions philosophique et mathématique.

Le contenu mathématique de ces articles consiste en un exposé général de la théorie des sous-ensembles infinis de \mathbb{R} . Les ensembles de n -ème espèce, c'est-à-dire ceux dont le $n + 1$ ème dérivé $E^{(n+1)}$ est vide, sont appelés maintenant ensembles du premier genre. Les ensembles du second genre sont ceux dont le $n + 1$ ème ensemble dérivé n'est jamais vide, quel que soit $n \in \mathbb{N}$. Cantor introduit la notion d'ensemble E « partout dense » (*überall dicht*) dans un intervalle I : tout sous-intervalle ouvert de I a une intersection non vide avec E . E est nécessairement du second genre, en d'autres termes un ensemble du premier genre n'est pas partout dense dans un intervalle. Cantor définit l'ensemble intersection de tous les $E^{(n)}$ pour $n \in \mathbb{N}$: $\bigcap E^{(n)} = E^{(\infty)}$ ensemble dérivé de E d'ordre ∞ . Cantor est ainsi amené à user de ces symboles traditionnels de l'infini (∞) en relation avec les deux opérations de dérivation et d'intersection infinie. En 1883, il remplace le symbole ∞ par ω (§ 11 des « Grundlagen einer allgemeinen Mannigfaltigkeitslehre », *Œuvres*, p. 195). Ainsi $E^{(\omega+1)}$ est l'ensemble dérivé de $E^{(\omega)}$, $E^{(\omega,2)}$ l'ensemble dérivé d'ordre ω de $E^{(\omega)}$, $E^{(\omega^2)} = \bigcap E^{(n\omega)}$ pour $n \in \mathbb{N}$, etc. Finalement Cantor construit les ensembles $E^{(\omega^2)}$, $E^{(\omega^3)}$, etc. L'abandon du symbole ∞ , traditionnellement considéré comme « indéterminé », pour le nouveau symbole ω , impliqué dans toute une arithmétique, est significatif de la transformation de l'infini actuel en véritable objet mathématique. Et la construction, par dérivations successives, d'une échelle infinie marque une étape décisive dans la conception d'une arithmétique transfinie. Cantor formule déjà les deux principes de construction de l'échelle : l'adjonction d'une unité (+ 1) et le passage à la limite, qui consiste, pour une suite infinie sans dernier élément, à créer un nouveau nombre, n'ayant pas de prédécesseur immédiat et posé comme supérieur à tous les éléments de la suite.

Les ordinaux transfinis

Cantor se rend compte de la nécessité, pour avancer dans sa théorie des ensembles de points, d'étendre la notion classique de nombre. Au rebours de toute la tradition qui ne pouvait concevoir des nombres infinis, il affirme (en 1883) que l'infini, tout aussi bien que le fini, peut être nommé ou « fixé mathématiquement par des nombres » (*Œuvres*, p. 175). C'est une véritable révolution dans la pensée mathématique. Il sait bien, d'ailleurs, qu'il viole ainsi les intuitions établies, emmurées dans la conception d'un infini « impropre » (*uneigentlich*), celui que représente une quantité variable croissant ou décroissant au-delà de toute limite. Comme le remarque Cantor avec acuité, croissance ou décroissance indéfinies ne nous font pas sortir du domaine du fini. Avec elles on a affaire à du « fini variable » et non à l'infini proprement dit. De ce dernier, le point à l'infini des géomètres nous donne une idée. Les nombres infinis doivent avoir la même « détermination » (*Bestimmtheit*) et la même « réalité »

(*Realität*) que ce point à l'infini et que les nombres finis. Ce sont des « nombres entiers infinis au sens propre », des « nombres concrets ayant une signification réelle (*von realer Bedeutung*) », auxquels Cantor a été conduit par la logique des problèmes qu'il essayait de résoudre (*Cœuvres*, p. 166). On constate un irrépressible réalisme philosophique sous-tendant l'affirmation de l'existence de nombres infinis en acte.

Les nombres entiers infinis indiquent le nombre d'éléments d'ensembles « bien définis ». Par ensemble « bien défini » Cantor entend toute multiplicité « déterminée de manière interne sur la base de définitions et de leurs conséquences logiques obéissant au principe du tiers exclu. De sorte qu'on doit pouvoir déterminer, pour tout objet, s'il appartient ou non à l'ensemble et si deux objets de l'ensemble sont égaux ou non ». Cantor distingue, le premier dans l'histoire, deux notions de nombre. La première notion est indépendante de l'ordre des éléments de l'ensemble considéré et correspond dans le fini à la notion de nombre entier, dans l'infini à la notion de puissance; en 1895 elle recevra le nom de « nombre cardinal » (*Kardinalzahl*). La seconde, d'abord désignée par le terme *Anzahl*, puis par celui de nombre ordinal (*Ordnungszahl*), va correspondre à l'existence d'un bon ordre sur les ensembles « bien définis ». Le nombre cardinal ressortit à l'opération de compter, qui est indifférente à l'ordre dans lequel les différents éléments sont pris en compte. C'est le caractère le plus général des multiplicités. Le nombre ordinal résulte de la numérotation ou énumération, qui établit un ordre de succession entre les éléments. Ces deux notions sont confondues dans le fini. Quelle que soit, en effet, la façon d'énumérer les éléments d'une collection finie, le dernier élément énuméré, disons le n -ième, marque en même temps le nombre cardinal de la collection, soit n . Mais pour les collections infinies il n'en est pas de même. Prenons des exemples simples. Soient les ensembles : $E = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$, $F = \{2, 3, 4, \dots, 1\}$. E et F ont le même nombre cardinal, qui est celui de l'ensemble dénombrable des entiers naturels, et des ordinaux différents, soit respectivement ω et $\omega + 1$. En revanche les ensembles $H_1 = \{1, 2, 3, \dots\}$ et $H_2 = \{2, 1, 3, \dots\}$, qui n'ont pas le même ordre, ont le même ordinal, le même type d'ordre (et aussi, bien sûr, le même cardinal). Ce qui est identique en eux ce n'est pas l'ordre mais l'énumération : on commence par un premier et on continue comme dans la suite des entiers positifs, peu importe quel élément on a mis en premier, lequel on a mis en second, lequel on a mis en troisième et ainsi de suite. Le concept de nombre ordinal est donc un concept abstrait, distinct de l'ordre effectif dans lequel sont donnés des éléments, dont la nature spécifique est également négligée. Par définition, deux ensembles totalement ordonnés — totalement signifie que pour deux éléments quelconques on sait s'ils sont égaux ou si l'un est plus petit que l'autre — sont semblables ou de même type, s'il existe de l'un sur l'autre une bijection f préservant l'ordre, c'est-à-dire telle que $f(x) \leq f(y)$

pour $x \leq y$. La notion de type d'ordre nous fait quitter le terrain particulier des ensembles de points et les considérations topologiques liées à l'opération de dérivation, pour celui, plus général, des ensembles *in abstracto*.

Les ordinaux finis forment la classe I des ordinaux, les ordinaux des ensembles de première classe (les ensembles dénombrables) forment la classe II des ordinaux, les ordinaux des ensembles infinis non dénombrables forment la classe III. On voit qu'à une seule puissance, par exemple, le dénombrable, correspondent différents ordinaux, toute une classe infinie d'ordinaux. L'hypothèse du continu consiste à postuler que la puissance immédiatement supérieure à celle de la classe I, immédiatement supérieure donc au dénombrable, est la puissance de la classe II et que celle-ci est identique à la puissance du continu. À plusieurs reprises Cantor pense avoir démontré cette hypothèse; parfois il pense au contraire que le continu n'a pas la 2^{\aleph_0} puissance et n'a pas même une puissance qui puisse être déterminée par un nombre.

Pour pouvoir étendre au transfini les propriétés de comparabilité et d'induction (on appelle induction la propriété suivante de \mathbb{N} : si une propriété P est vérifiée par le nombre 0 (ou le nombre 1 ou un autre nombre du début de la suite) et si, étant vérifiée par un nombre n , quelconque mais fixé, elle est aussi vérifiée par son successeur $n + 1$, alors elle est vérifiée par tout nombre entier) valables pour les nombres finis, Cantor introduit la notion d'ensemble bien ordonné. Un ensemble bien ordonné est un ensemble muni d'une relation d'ordre total et tel que chacun de ses sous-ensembles non vides a un plus petit élément. Un ensemble fini est bien ordonné. La suite infinie des entiers naturels est un ensemble \mathbb{N} bien ordonné; de même toute suite indexée par \mathbb{N} . Les types d'ordre des ensembles infinis bien ordonnés constituent les ordinaux transfinis. Ainsi les ordinaux de la classe II représentent autant de manières d'ordonner par un bon ordre un ensemble infini dénombrable; ceux de la classe III toutes les manières d'ordonner par un bon ordre un ensemble infini non dénombrable.

Cantor a considéré l'existence d'ensembles bien ordonnés comme l'effet d'une « loi de la pensée », s'appliquant à l'infini comme au fini. Il eût fallu pourtant montrer que tout ensemble (infini) peut être bien ordonné. Zermelo comble cette lacune en 1904. Moyennant le théorème dit « du bon ordre », on peut transférer aux ensembles infinis quelconques certaines propriétés des nombres finis. En particulier, on peut prolonger en une induction transfinie l'induction complète ordinaire, qui permet d'atteindre un entier fini quelconque, mais ne permet pas d'atteindre ω , lequel n'est immédiatement précédé par aucun entier.

L'échelle des cardinaux transfinis

La notion de nombre cardinal est doublement abstraite, puisqu'elle s'obtient à partir de celle de nombre

ordinal et consiste à négliger le type d'ordre associé à tous les ordinaux d'une même classe. Les cardinaux infinis sont gouvernés par des règles partiellement différentes de celles qui gouvernent les cardinaux finis, mais ce sont des « nombres infiniment grands en acte, qui ont la même réalité et la même détermination que les cardinaux finis » (*Cœuvres*, p. 280).

Cantor démontre que les cardinaux infinis actuels n'ont pas de maximum, dans un bref article de 1891 où il donne une nouvelle démonstration de l'existence d'ensembles non dénombrables. Cette nouvelle démonstration, « par la diagonale », est fameuse parce qu'elle introduit un mode inédit de raisonnement mathématique. Celui-ci sera notamment repris par Gödel dans sa preuve de l'incomplétude de l'arithmétique élémentaire. Cantor souligne qu'il ne fait plus référence, comme dans sa première démonstration de 1873, aux nombres irrationnels, dont l'existence était contestée par Leopold Kronecker (1823-1891), et utilise l'écriture décimale des nombres réels. En tenant compte de la généralisation faite dans une lettre à Dedekind du 28 août 1899, on peut dire que Cantor montre que pour tout ensemble M , l'ensemble F des fonctions de M dans un ensemble à deux éléments, dont le cardinal est $\text{Card}(F) = 2^M$, est d'une puissance strictement supérieure à celle de M ; en d'autres termes $\text{Card}(2^M) > \text{Card}(M)$. L'existence de cardinaux non dénombrables est ainsi démontrée de manière purement algébrique, mais il y a tout de même une grande audace à considérer l'ensemble de toutes les fonctions arbitraires d'un ensemble sur un autre, sans plus s'embarasser de connaître dans le détail la forme de ces fonctions ni s'arrêter à la conception traditionnelle de la fonction comme donnée par une règle explicite.

En 1895 et 1897 paraissent respectivement les deux parties des *Beiträge zur Begründung der transfiniten Mengenlehre*, exposé plus abstrait et plus systématique de l'arithmétique transfinie, où le terme « transfini » supprime définitivement celui d'« infini » pour qualifier ensembles et nombres. La théorie des cardinaux transfinis est cette fois présentée avant celle des ordinaux, l'ordre de la genèse réelle des résultats étant abandonné, comme le sont aussi toutes les justifications métaphysiques de l'existence de l'infini actuel. La première phrase définit le concept d'ensemble : « Tout rassemblement en un tout M d'objets m déterminés et bien distincts de notre intuition ou de notre pensée (qui sont appelés « éléments » de M). » Cantor n'envisage pas l'éventualité de l'ensemble vide. La notation aujourd'hui usuelle est introduite : $M = \{m\}$; le cardinal de M est noté \bar{M} .

L'échelle des cardinaux transfinis commence par \aleph_0 , cardinal de l'ensemble \mathbb{N} des entiers naturels. On sait construire, par le procédé de la diagonale, un cardinal égal à 2^{\aleph_0} , strictement supérieur à \aleph_0 , et de nouveau un cardinal $2^{2^{\aleph_0}}$ strictement supérieur à 2^{\aleph_0} , et ainsi de suite. Dans cette notation, l'hypothèse du continu consiste à supposer que 2^{\aleph_0} , qui est le cardinal du continu, est le cardinal immédiatement supérieur à \aleph_0 , soit $2^{\aleph_0} = \aleph_1$. L'hypothèse généralisée du continu

étend cette équation à un \aleph d'indice quelconque; elle pose $2^{\aleph} = \aleph_{\alpha+1}$.

La théorie des ensembles a suscité à ses débuts de grandes résistances. Leopold Kronecker en fut l'adversaire immédiat et le plus acharné. Il la qualifie de « sophistique mathématique » et tente d'empêcher la publication dans le *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, fondé par Leopold Crelle (1780-1855), des premiers articles de Cantor, ceux où il démontre que l'ensemble des nombres réels n'est pas dénombrable et que l'ensemble des points d'un carré est équipotent à l'ensemble des points de son côté. Dedekind a fait jouer son crédit en faveur de Cantor. De son côté, le mathématicien norvégien Gösta Mittag-Leffler a ouvert les pages de son journal, *Acta mathematica*, aux traductions françaises, assurées par les élèves de Charles Hermite (1822-1901), des articles de Cantor sur les ensembles de points. D'autres mathématiciens : Jacques Hadamard (1865-1963), Adolf Hurwitz (1859-1919), David Hilbert (1862-1943), entre autres, perçoivent l'intérêt de la théorie des ensembles. Émile Borel (1871-1956) publie en 1899 ses *Leçons sur la théorie des fonctions*, qui représentent le premier manuel de ladite théorie. En Angleterre paraissent dès le début du xx^e s. deux traités importants : *The theory of sets of points* (1906) de W.H. et G.C. Young et *The Principles of mathematics* (1903) de Bertrand Russell (1872-1970).

Dedekind et Cantor ont tenté en vain de donner une définition non contradictoire du concept d'ensemble. La définition de Cantor de 1895 conduisit au paradoxe du plus grand ordinal, formulé par Burali-Forti en 1897. En fait, il faut renoncer à chercher une définition de ce terme. Les mots « ensemble », « élément », « appartient à », ainsi que leurs symboles, soit E , e et \in , sont « primitifs », c'est-à-dire n'ont pas à être définis. La situation est comparable à celle de la géométrie, exposée axiomatiquement : les mots « point », « droite » et « plan » ne sont pas définis et leur usage est réglé par l'énoncé d'axiomes qui déterminent les propriétés des notions auxquelles ils sont associés.

L'apparition de paradoxes dans la théorie des ensembles, dont le premier est découvert par Cantor lui-même dès 1883, entraîne précisément l'axiomatisation de la théorie par Ernst Zermelo et Adolf Abraham Fraenkel (1891-1965). Parallèlement, des discussions portent sur la nécessité de retenir certains axiomes, comme l'axiome du choix non dénombrable. Ce dernier stipule que pour toute famille, même infinie, d'ensembles non vides, il existe une fonction (qu'on ne spécifie pas davantage) qui, à chaque ensemble associe un de ses éléments, et permet de constituer ainsi un nouvel ensemble non vide. L'enjeu des discussions est grand, parce que de nombreux résultats appartenant à d'autres branches mathématiques que la théorie des ensembles ne peuvent être rigoureusement démontrés sans cet axiome : par exemple, tout espace vectoriel a une base, tout ensemble ordonné inductif a un élément

maximal (lemme de Zorn), tout corps a une extension algébriquement close, etc. L'histoire de l'axiome du choix est parallèle à celle de l'hypothèse du continu. Kurt Gödel (1906-1978) en démontre, en 1938, la consistance avec les autres axiomes de la théorie des ensembles, ce qui écarte définitivement la crainte que son utilisation pourrait éventuellement conduire à une contradiction. Et Paul Cohen (né en 1934) en démontre l'indépendance, ce qui permet de conclure qu'il s'agit d'une proposition indécidable, dont on peut envisager ou non l'adjonction aux autres axiomes de la théorie.

Tous ces problèmes n'ont pas empêché la théorie des ensembles de s'intégrer au patrimoine mathématique classique, en fournissant, au début du XX^e s., leurs bases à plusieurs disciplines alors en voie de constitution : la topologie, la théorie de la mesure et de l'intégration, la théorie des probabilités. Aujourd'hui, l'algèbre des ensembles est appliquée dans de très nombreux domaines, allant des mathématiques à l'électronique (construction des ordinateurs), à la linguistique et aux techniques de gestion ou études de marché.

► BOREL E., « Quelques remarques sur les principes de la théorie des ensembles (1905) et Cinq Lettres de Baire, Borel, Lebesgue sur la théorie des ensembles (1905) », *Logique et fondements des mathématiques*, éd. F. Rivenc & Ph. de Rouilhan, Paris, Payot, 1992, p. 287-308. — BOURBAKI N., *Éléments de mathématique. Théorie des ensembles*, Paris, Hermann, 1966 ; *Éléments d'histoire des mathématiques*, Paris, Hermann (1960), 2^e éd. revue et augmentée, 1969 (chap. I). — CANTOR G., *Abhandlungen mathematischen und philosophischen Inhalts*, Berlin, 1932 ; réimpr. Hildesheim, Olms, 1966. — CANTOR G. & DEDEKIND R., *Correspondance*, texte all., éd. J. Cavailles & E. Noether, Paris, 1937 (trad. fr. in CAVAILLES J., *Œuvres complètes de philosophie des sciences*, Paris, Hermann, 1994, p. 375-449). — CAVAILLES J., *Remarques sur la formation de la théorie abstraite des ensembles*, Paris, Hermann, 1937 (repr. in *Œuvres complètes de philosophie des sciences*, Paris, Hermann, 1994, p. 221-374). — DAUBEN J., *Georg Cantor. His mathematics and philosophy of the infinite*, Cambridge (Mass.)/Londres, 1979. — DEDEKIND R., *X^e Supplément aux Leçons de théorie des nombres de Dirichlet (1871)*, repr. in *Gesammelte mathematische Werke*, t. III, Braunschweig, Vieweg, 1932 ; *Que sont et que doivent être les nombres ?*, texte all., Braunschweig, Vieweg (1888), repr. in *Gesammelte mathematische Werke*, t. III, Braunschweig, Vieweg, 1932 (trad. fr., Paris, Le Seuil « La bibliothèque d'Ornicar », 1978) ; *Continuité et nombres irrationnels*, texte all., Braunschweig, Vieweg, 1872, repr. in *Gesammelte mathematische Werke*, t. III, p. 315-334 (trad. fr., Paris, Le Seuil « La bibliothèque d'Ornicar », 1978) ; « Appartenance et inclusion », inédit publié, trad. et prés. M.-A. Sinaceur, *Revue d'histoire des sciences*, t. XXIV (1971), p. 247-254. — DUGAC P., *Richard Dedekind et les fondements de l'analyse*, Paris, Vrin, 1976. — FRAENKEL A., *Abstract set theory*, Amsterdam, North-Holland Publ. Co, 1953. — HALLETT M., *Cantorian set theory and limitation of size*, Oxford, Clarendon Press, 1984. — MESCHKOWSKI H., *Probleme des Unendlichen. Werk und Leben Georg Cantors*, Braunschweig, Vieweg, 1967, 2^e éd. 1983.

Hourya SINACEUR

→ Bourbaki ; Cantor ; Catégories et foncteurs ; Dedekind ; Extension ; Formalisme ; Infini mathématique ; Structure ; Théorie.

ENTROPIE

Pour expliquer et rendre concret le concept « prodigieusement abstrait » (Poincaré) d'entropie, nous nous efforcerons de nous replonger dans le contexte de la découverte, à l'intérieur des controverses techniques, scientifiques et philosophiques qui ont accompagné la naissance et l'essor de la thermodynamique.

Thomson entre Carnot et Joule

Vers la moitié du XIX^e s., ce qu'à l'époque on appelait « la théorie de la chaleur » était traversé d'une contradiction apparemment insoluble : selon Sadi Carnot, la production de travail par la chaleur pouvait être expliquée par la transmission du fluide calorique ; selon James Joule, elle était due à la conversion de la chaleur en travail.

Ce conflit théorique s'incarna dans la personne et dans l'œuvre du jeune William Thomson (Lord Kelvin). Enfant prodige de la physique anglaise, il quitta Cambridge en 1845 pour travailler quelque temps à Paris avec Régnault qui, à l'époque, accomplissait pour le compte du gouvernement français des recherches expérimentales sur les propriétés physiques et chimiques des gaz avec l'objectif d'apporter aux ingénieurs les données nécessaires pour construire des machines à vapeur plus efficaces. À Paris, Thomson tomba sur le *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur* d'Émile Clapeyron, physicien et ingénieur de l'École polytechnique qui, le premier, s'était aperçu de l'importance de l'œuvre de Carnot, en avait formalisé la démarche argumentative et, utilisant le diagramme de Watt, avait représenté graphiquement le cycle d'une machine thermique idéale, selon une forme encore aujourd'hui répandue dans les manuels de thermodynamique. Frappé par l'article de Clapeyron qui comportait une critique des théories traditionnelles de Laplace et Poisson, Thomson chercha sans succès dans tout Paris un exemplaire des *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* que Carnot avait publiées en 1824.

Retourné en Angleterre et après avoir obtenu à vingt-trois ans la chaire de philosophie de la nature à Glasgow, Thomson commença à diffuser le principe de Carnot auprès de ses collègues de la Glasgow Philosophical Society, tandis qu'il l'utilisait pour expliquer le fonctionnement de la machine à air de Stirling. Sa confiance dans la valeur explicative de la théorie de Carnot est absolue. Mais en juin 1847, au colloque de la British Association à Oxford, Thomson entendit la conférence d'un certain James Prescott Joule, un autodidacte, fils d'un marchand de bière, qui avait entrepris des recherches sur les phénomènes thermiques dans l'espoir d'inventer un moteur électromagnétique capable de dépasser le rendement des machines à vapeur. Le projet originaire abandonné, il avait continué ses expériences, cherchant à établir une corrélation quantitative entre chaleur et énergie électromagnétique.

Et il avait atteint la conviction que la chaleur était convertible en mouvement : « Chaque fois que la force vive est apparemment détruite, se produit un équivalent qui peut être ensuite reconverti en force vive. Cet équivalent est la chaleur — (*On Matter, Living Force and Heat*). Ces premiers travaux avaient rencontré un certain scepticisme parmi les scientifiques ; en effet, en se fondant sur des calculs qui impliquaient des valeurs de quelques centièmes de degré, Joule demandait à ses auditeurs de mettre en cause les concepts sur lesquels avait été bâtie la science de la chaleur. Thomson en fut toutefois énormément frappé. « Je n'oublierai jamais la *British Association* à Oxford en 1847, quand dans une des sections j'entendis lire un mémoire d'un jeune à l'aspect très modeste, qui ne manifestait pas dans ses manières la moindre conscience du fait qu'il était en train d'expliquer une grande idée. Je fus énormément frappé par cette conférence. Je pensais d'abord que sa théorie ne pouvait être vraie, puisqu'elle divergeait d'avec celle de Carnot. Immédiatement après la lecture du mémoire j'échangeai quelques mots avec l'auteur, James Joule, qui furent le début d'une amitié de quarante ans. »

Thomson saisit immédiatement la contradiction qui s'ouvrait entre les expériences de Joule et l'hypothèse de Carnot. Si Carnot était dans le vrai, il était impossible de transformer complètement une quantité de chaleur en travail, parce que le rendement du moteur thermique idéal est inférieur à 1. En plus, selon Carnot la production de travail se produit à travers le passage de la chaleur, et non pas par conversion de chaleur en travail. L'hypothèse de Joule semblait être bien démontrée par ses expériences ; le principe de Carnot, qui s'appuyait sur une tradition bien solide, avait une remarquable fécondité explicative. Que faire ?

Pour le moment Thomson continua à faire confiance au principe de Carnot et prépara pour l'impression une étude où les résultats des recherches expérimentales de Régnault, associées à la théorie de Carnot, permettaient de définir une échelle thermométrique absolue. Dans ce bref écrit, Thomson fait allusion également « aux découvertes remarquables » de Joule sur la génération de la chaleur, mais tandis qu'il reconnaît la possibilité d'engendrer de la chaleur par frottement, il soutient que « la conversion de la chaleur (ou du calorique) en effet mécanique est probablement impossible ; certainement elle n'a jamais été découverte ». Ces mots donnèrent naissance à une discussion par lettre entre Joule et Thomson, suite à laquelle et après avoir finalement réussi à se procurer un exemplaire des *Réflexions*, Thomson précisa sa pensée dans un célèbre *Compte rendu de la théorie de Carnot sur la puissance motrice de la chaleur*. Dans ce mémoire, à propos du passage où Carnot affirme que le moteur thermique idéal doit éviter la simple conduction de la chaleur d'un corps chaud à un corps froid parce qu'il s'agirait d'un inutile rétablissement de l'équilibre du calorique et donc d'un gaspillage d'énergie, Thomson se demande : « Quand "l'action thermique" est ainsi gaspillée dans la conduction de la chaleur à travers un

solide, qu'en est-il de l'effet mécanique qu'elle aurait dû produire ? Rien ne peut se perdre au cours des processus naturels ; aucune énergie ne peut être détruite [ainsi que le soutenait Joule]. Mais alors, quel est l'effet produit à la place de l'effet mécanique qui a été perdu ? Une parfaite théorie de la chaleur demande impérativement une réponse à cette question ; et pourtant aucune réponse ne peut être donnée en l'état actuel de la science. »

Donc, face à cette controverse entre une nouvelle théorie confirmée par l'expérience et une vieille théorie qui semblait être infirmée par les nouvelles expériences, mais qui gardait une remarquable capacité explicative, Thomson attend. En comparant la simple conduction de la chaleur d'un corps chaud à un corps froid à une machine thermique à rendement zéro, il transforme celle qui pour Joule était une réfutation de la théorie de Carnot en un problème ouvert à résoudre à l'intérieur de cette théorie. À la fin de ce mémoire, Thomson pose explicitement l'alternative entre expliquer les données de Joule à l'intérieur de la théorie de Carnot (et de la tradition du « calorique ») ou « refonder la théorie de la chaleur sur des bases complètement nouvelles ».

La solution à cette impasse théorique arriva de l'Allemagne, en 1850, dans un mémoire de Rudolf Clausius intitulé *Sur la force motrice de la chaleur et les lois qu'il s'en déduisent pour la théorie même de la chaleur*. Selon Clausius, la contradiction relevée par Thomson n'est pas si grave, parce qu'elle ne concerne pas tellement les faits expérimentaux, mais « la manière de se représenter les phénomènes ». En plus, il n'est pas nécessaire de rejeter entièrement le principe de Carnot : si on l'examine de plus près, on découvre que « ce n'est pas le principe fondamental même de Carnot, mais l'assertion qu'il ajoute qu'il n'y a pas de chaleur perdue, qui est en contradiction avec la nouvelle manière de voir ; car dans la production du travail il peut bien se faire en même temps qu'une certaine quantité de chaleur soit consommée et qu'une autre soit transportée d'un corps chaud à un corps froid ».

Mais alors, si Clausius voulait garder le principe de Carnot, il fallait en donner une démonstration indépendante du principe de la conservation de la quantité de calorique, principe réfuté par Joule, dont Carnot lui-même soupçonnait la fausseté, mais qui était à la base des *Réflexions*. Thomson avait bien vu que si la chaleur n'est pas un fluide subtil et indestructible (le calorique), la démonstration de Carnot était complètement fautive. Comment démontrer, alors, le principe de Carnot, c'est-à-dire qu'un moteur thermique idéal, parfaitement réversible, donne le rendement maximal entre deux sources de chaleur à différentes températures indépendamment des agents utilisés pour l'actionner ?

Clausius propose l'axiome simple, non contredit par les expériences de Joule et confirmé par la vie de tous les jours, selon lequel : « La chaleur ne peut pas passer d'elle-même d'un corps froid à un corps plus chaud. »

À partir de cet axiome, le principe de Carnot peut être démontré par *reductio ad absurdum* à travers la démonstration suivante. S'il existait des agents capables de fournir un rendement supérieur à celui d'un moteur idéal, il serait possible d'activer, en utilisant deux machines thermiques idéales, un mécanisme de ce type : la machine moins efficace produit du travail en transférant la chaleur de la source A au réfrigérateur B, tandis que le travail produit est utilisé par la machine la plus efficace, qui fonctionne à l'envers, pour transférer la chaleur de B à A. Si ce mécanisme fonctionnait pendant un certain intervalle de temps, cela produirait un transfert de chaleur du réfrigérateur à la source, c'est-à-dire d'un corps plus froid à un corps plus chaud, ce qui est en contradiction avec l'axiome de départ. Donc il n'existe aucune machine qui, en travaillant entre deux températures données, puisse produire plus de travail qu'un moteur thermique idéal, parfaitement réversible.

Désormais la question allait trouver sa solution. L'année suivante, Thomson aussi publia un long mémoire, *Sur la théorie dynamique de la chaleur*, où il se proposait de montrer « quelles sont les modifications qui doivent être apportées aux conclusions atteintes par Carnot et par tous ceux qui ont suivi son mode de raisonnement particulier sur la puissance motrice de la chaleur, quand on admet l'hypothèse de la théorie dynamique de la chaleur, qui est contraire à l'hypothèse fondamentale de Carnot ».

Les mémoires de Thomson et Clausius résolvent définitivement la controverse scientifique entre la théorie dynamique de la chaleur et l'hypothèse de Carnot, dernier produit sophistiqué de la tradition du calorique. C'est ainsi que naît une nouvelle science, la thermodynamique, qui conserve ces deux principes encore aujourd'hui.

L'entropie de Clausius

Alors que le premier principe de la thermodynamique se rattache aux principes de conservation (de la masse, de la quantité de mouvement), déjà familiers à la mécanique du XIX^e s., le deuxième principe décrit des mouvements et des tendances de la nature qui ne pouvaient pas être aisément réduits aux schémas interprétatifs habituels. Poussé par ce défi, Clausius s'était engagé dans une réflexion théorique sur la nature de la chaleur, accompagnée d'une analyse et d'une formulation mathématique des lois qui en régissent l'action.

Dans le premier mémoire consacré à cette tâche, intitulé *Sur une nouvelle forme du second principe de la théorie mécanique de la chaleur* (1854), Clausius déclare que sa précédente formulation était imparfaite parce que, même si elle permettait de décrire les phénomènes thermiques et d'en déduire les équations correspondantes, elle ne permettait pas « de reconnaître d'une manière assez nette l'essence même du principe, et sa liaison avec le premier ». Il introduit donc le concept de transformation (*Verwandlung*) et reformule à travers lui les deux principes de la thermodynamique.

Tandis que le premier principe devient celui de l'équivalence de la chaleur et du travail et qu'il affirme justement la possibilité de transformer la chaleur en travail, le deuxième, rebaptisé principe de l'équivalence des transformations, exprime une relation entre deux types de transformations : la transformation de la chaleur en travail, et le passage de la chaleur d'un corps chaud à un corps plus froid, passage qui peut être considéré comme une transformation d'une quantité de chaleur à une température élevée, en chaleur à une température plus basse : « Dans tous les cas où une quantité de chaleur se transforme en travail, et où le corps qui opère cette transformation revient finalement à son état initial, il faut en même temps qu'une autre quantité de chaleur passe d'un corps chaud à un corps plus froid ; et le rapport de cette dernière quantité de chaleur à la première ne dépend que des températures des deux corps entre lesquels son passage s'effectue, et non de la nature de la matière médiatrice. »

Dans le cycle fermé, parfaitement réversible, conçu par Carnot, les deux types de transformations – de travail en chaleur (ou de chaleur à haute température en chaleur à basse température) et de chaleur en travail – devront être équivalents, c'est-à-dire tels qu'ils puissent se compenser mutuellement : leurs valeurs diffèrent seulement dans le signe et leur somme algébrique sera égale à zéro. Dans les cycles non réversibles, c'est-à-dire dans la plupart des phénomènes naturels, se produira au contraire un déséquilibre, parce que le premier type de transformation l'emportera sur le deuxième. Clausius attribue, par convention, le signe positif aux transformations du premier type et négatif à celles du second. D'où il suit que la somme algébrique des valeurs de toutes les transformations qui se produisent dans un cycle irréversible devra être nécessairement positive. La somme algébrique des transformations qui se produisent dans n'importe quel cycle fermé (réversible ou irréversible) est appelée par Clausius « valeur de transformation ».

Dans un mémoire de 1862 (*Sur l'application du principe de l'équivalence des transformations au travail intérieur*), Clausius essaye de mieux définir l'effet de la chaleur sur les corps en introduisant une nouvelle grandeur nommée désagrégation. La chaleur tend à assouplir ou à liquéfier les solides, à vaporiser les liquides, à dilater les aériformes, en général elle tend à affaiblir et à défaire les liens intermoléculaires ou à éloigner les molécules l'une de l'autre. « L'action de la chaleur tend toujours à diminuer la cohésion des molécules, et lorsque celle-ci est vaincue, à accroître leurs distances moyennes. Pour pouvoir exprimer mathématiquement ce fait, nous représenterons le degré de division du corps par une nouvelle quantité que nous nommerons la désagrégation du corps, et au moyen de laquelle nous pouvons définir l'action de la chaleur en disant simplement qu'elle tend à augmenter la désagrégation. »

En 1865, dans son mémoire récapitulatif *Sur diverses formes des équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur...*, Clausius accomplit

le dernier pas dans son analyse et unifie la valeur de transformation d'un corps et de son niveau de désagrégation par la célèbre grandeur qu'il appelle « entropie ». L'entropie correspond au « contenu de transformation d'un corps », c'est-à-dire à sa capacité de subir des transformations spontanées. Plus grande est la valeur de l'entropie, plus faible est la capacité du corps à se transformer et plus élevé est son niveau de désagrégation. Admirateur de la culture classique, celui qui avait changé son nom allemand de Gottlieb en l'archaïsant Clausius, ne pouvait que tirer le nom de cette qualité du grec. Voici l'explication qu'il en donne : « Je préfère emprunter aux langues anciennes les noms des quantités scientifiques importantes, afin qu'ils puissent rester les mêmes dans toutes les langues vivantes ; je proposerai donc d'appeler la quantité S l'entropie du corps, d'après le mot grec ἔντροπη, transformation. C'est à dessein que j'ai formé ce mot entropie, de manière qu'il se rapproche autant que possible du mot énergie ; car ces deux quantités ont une telle analogie dans leur signification physique qu'une certaine analogie de dénomination m'a paru utile. »

Le fait que l'entropie d'un système fermé soit vouée à augmenter signifie que les processus spontanés tendront toujours à transformer en énergie thermique les quantités d'énergie mécanique, électrique ou chimique, et qu'un système fermé tendra naturellement vers un état d'entropie maximale dans lequel toute transformation sera impossible. Dans la dernière page de ce mémoire, Clausius applique le principe de l'entropie à l'univers, considéré comme un système fermé, en décrétant sa lointaine mais inévitable mort thermique.

L'entropie de Boltzmann

Clausius et Thomson n'avaient pas encore terminé d'accorder le premier et le deuxième principes de la thermodynamique dans un cadre théorique unifié, que les conflits entre les partisans des deux principes reprirent. Cette fois ce n'était plus seulement des controverses techniques ou purement scientifiques : il s'agissait de l'opposition entre des hypothèses très générales qui sont à la base des théories explicatives et qui les conditionnent, d'un conflit entre deux conceptions différentes de l'explication scientifique, et finalement entre deux visions du monde opposées. Tandis que le premier principe pouvait encore s'intégrer à la conception mécaniste et réversible des phénomènes de la nature, le deuxième semblait introduire une asymétrie fondamentale et une irréversibilité inexplicable selon les principes de la mécanique classique.

D'un côté, donc, on clama la nécessité d'accorder la physique mécaniste avec l'irréversibilité propre des phénomènes de la nature. De l'autre côté, on chercha à reconduire, c'est-à-dire à expliquer en termes mécanistes, le deuxième principe de la thermodynamique. La théorie cinétique des gaz, qui connaissait à l'époque un grand développement, contribua à expliquer au niveau moléculaire le comportement macroscopique

observable. Vers la moitié du siècle, la théorie qui considérait la chaleur comme le produit du mouvement des atomes de la matière n'était pas plus accréditée que celle qui voyait la matière comme un continuum. Un article d'August Krönig de 1856 suivi en 1857 par le mémoire *Sur la nature du mouvement auquel nous donnons le nom de chaleur* de Clausius avait relancé l'hypothèse moléculaire au centre du débat scientifique. Elle fut reprise et développée par James Clerk Maxwell dans son article de 1860, « Illustrations of the dynamical theory of gas » et surtout dans *La théorie de la chaleur* de 1871, et apporta un nouveau cadre théorique pour l'ensemble des phénomènes physiques, dans lequel les réflexions sur la nature de la chaleur occupaient une place privilégiée.

Maxwell se servait déjà d'un certain nombre de raisonnements de type statistique qui seront précisés par Ludwig Boltzmann. Dans un article fondamental « Sur le rapport entre le deuxième principe de la théorie mécanique de la chaleur et le calcul des probabilités », Boltzmann réinterprète le concept d'entropie en soutenant qu'il n'est rien d'autre que l'expression macroscopique du fait que de grandes quantités de molécules tendent à passer d'un état moins probable à un état plus probable. On peut donc établir un lien précis entre l'entropie d'un corps et la probabilité de son état macroscopique, lien que Boltzmann exprima avec la célèbre formule $S = k \log W$, où S est l'entropie, k une constante et W la probabilité de l'état en question.

Il est difficile de sous-estimer la portée philosophique de cette réinterprétation statistique et mécaniste de l'entropie démontrée par Boltzmann. L'entropie de Clausius avait une forte connotation téléologique, parce qu'elle interprétait l'orientation des phénomènes observée dans la nature comme expression d'une orientation nécessaire et irréversible, comme une véritable cause finale. La conception mécaniste a toujours essayé de bannir ce type de causalité de la science et l'explication de Boltzmann ne contient en effet aucun élément téléologique : un système physique n'évolue pas intentionnellement vers des états à entropie plus élevée, mais ce sont les molécules qui le composent qui se disposent selon des états qui sont statistiquement plus probables. Ce qui n'exclut pas que le système, au niveau moléculaire, traverse des états moins probables, à entropie négative, mais en moyenne il s'approchera toujours de la disposition plus probable (en plus, l'entropie devient ainsi une grandeur qui permet de mesurer le niveau de désordre d'un système donné et l'équation de Boltzmann a pu être appliquée par la suite à la théorie de l'information, à l'évolution des systèmes biologiques, etc.).

Malgré ces tentatives d'explication mécaniste de l'augmentation de l'entropie, la majorité des physiciens de l'époque s'orientait de plus en plus vers une explication phénoménologique, c'est-à-dire vers une description des phénomènes de la nature privée de modèles ou d'hypothèses explicatives comportant assertions sur la structure profonde de la matière.

C'était par exemple le cas d'Ernst Mach en Allemagne et de Pierre Duhem en France. En se réclamant de l'œuvre de Macquorn Rankine et de Julius Robert Mayer, Wilhelm Ostwald théorisa la nécessité de refonder toute la physique à partir des principes de la thermodynamique considérant les phénomènes mécaniques seulement comme « un cas particulier des transformations générales de l'énergie ». Pour les énergétistes, la matière n'est qu'une pure construction mentale qui peut être réduite en énergie ; la masse n'est rien d'autre que la « capacité » de l'énergie cinétique ; le fait d'occuper l'espace est l'expression d'une « énergie de volume » ; la gravité est une énergie de position particulière : bref, la matière n'est qu'un « groupe de différentes énergies disposées dans l'espace ». « C'est dans l'énergie que s'incarne le réel », s'exclamait Ostwald dans la préface de son livre sur *L'Énergie* : « Elle est le réel en ce qu'elle est *ce qui agit* ; quel que soit l'événement considéré, c'est indiquer sa cause que d'indiquer les énergies qui y prennent part. Ensuite elle est le réel en ce qu'elle permet d'indiquer le contenu de l'événement. Elle constitue un pôle immobile dans la mobilité des phénomènes et, en même temps, la force d'impulsion qui fait tourner le monde des phénomènes autour de ce pôle. » Ostwald accompagna cette théorie scientifique d'une philosophie moniste et antimatérialiste qu'il divulqua dans de nombreux écrits.

Aujourd'hui nous savons que c'est l'évolution même de la physique qui a tranché dans le débat entre atomisme et phénoménologie macroscopique, entre l'interprétation statistique de l'entropie et les partisans de l'énergétisme. Mais dans les années qui couvrent toute la production scientifique de Boltzmann, de 1870 à 1906 (l'année tragique de son suicide), le choix entre atomisme et énergétisme était une question qui relevait plutôt d'une certaine vision du monde que de la physique expérimentale.

► BOLTZMANN L., *Theoretical physics and philosophical problems*, Dordrecht, Reidel, 1974. — CARNOT S., *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Paris, Bachelier, 1824 (voir également l'Édition critique avec introduction et commentaire, augmentée de documents d'archives et de divers manuscrits de Carnot, éd. R. Fox, Paris, Vrin, 1878). — CLAPEYRON E., « Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur », *Journal de l'École Polytechnique*, XIV, 1834, p. 153-190. — CLAUSIUS R., *Abhandlungen über die Mechanische Wärmetheorie*, Braunschweig, Vieweg, 1867 (trad. fr. *Théorie mécanique de la chaleur*, Paris, Lacroix, 1868-1869). — DUGAS R., *La théorie physique au sens de Boltzmann*, Neuchâtel, Le Griffon, 1959. — JOULE J.P., « On matter, living force, and heat », *Scientific Papers*, vol. 1, p. 385-390. — OSTWALD W., « La Déroute de l'atomisme contemporain », *Revue générale des sciences*, 1895, p. 953 sq. ; *L'énergie*, Paris, 1910. — THOMSON W., *Mathematical and Physical Papers*, Cambridge, 1882-1911.

Paolo D'IOrio

→ Carnot S. ; Chaleur ; Corps noir ; Crise de la physique moderne ; Équivalence (Principe d') ; Fin thermique de l'univers ; Irréversibilité ; Maxwell ; Probabilité (Physique) ; Temps.

ENVIRONNEMENT

Environnement : le terme fut en usage dans l'ancien français pour désigner l'action d'entourer et/ou le résultat de cette action. Puis il tomba en désuétude jusqu'au XIX^e s. où il figure à nouveau, avec le même sens, dans les dictionnaires. Empruntée à l'anglais *environment*, l'acception actuelle, comme « ensemble des conditions naturelles et culturelles susceptibles d'agir sur les êtres vivants et les activités humaines », s'est répandue au cours des années 1960 (*Dictionnaire historique de la langue française*). À vrai dire, Vidal de la Blache avait utilisé le terme comme l'équivalent anglais de milieu géographique. Ce fut sans lendemain : les géographes restèrent fidèles au concept de milieu. C'est à la charnière des années 1960 et 1970 que le mot s'impose en France, dans son sens actuel, pour qualifier un domaine de responsabilité politique, plus que pour désigner un champ de la recherche scientifique. Pierre George écrivit certes un « Que Sais-je ? » intitulé *L'environnement*, en 1971, estimant que la géographie avait quelques atouts pour en devenir la science, mais pas plus dans cette discipline que dans les autres, les scientifiques ne s'empressèrent d'utiliser cette notion.

De ces hésitations témoigne l'édition 1979 de l'*Encyclopædia universalis*. À l'entrée « Environnement », il n'est question que d'arts plastiques, d'architecture et d'urbanisme. Néanmoins, le long article consacré à la notion de « Milieu » propose le terme d'environnement comme équivalent de milieu extérieur : ensemble des facteurs qu'un organisme ne contrôle pas et qui conditionnent son activité biologique. De même l'article « Pollution » utilise-t-il indistinctement milieu, ambiance et environnement. La notion est enfin définie dans l'entrée « Système », en des termes identiques à l'acception qui a fini par s'imposer de nos jours : « L'évolution d'un système est conditionnée à la fois par les modifications internes qui peuvent affecter ses composants [...] et par les interactions qui peuvent s'établir entre le système et son environnement. »

Dès le complément paru en 1980, l'*Universalis* rectifie le tir avec un article intitulé « Environnement, droit et politique ». Il y est affirmé que « protection de la nature et lutte contre les pollutions sont [...] un impératif de survie ». En conséquence, les États ont été conduits à se doter d'une politique environnementale et à l'enregistrer dans le droit.

Avant de devenir un champ scientifique, l'environnement a donc bien été problématisé comme champ de la politique. L'élaboration, en 1969, d'un programme de « cent mesures pour l'environnement », la création du ministère du même nom (en 1971) consacrent l'environnement comme objet de responsabilité et domaine de compétence de l'appareil d'État. L'argumentation qui légitime ainsi les préoccupations environnementales articule, dans une même problématique, deux pratiques qui, depuis le XIX^e s., avaient confronté scientifiques, ingénieurs et pouvoirs publics : la protection de la nature et la gestion des risques. Le problème

est d'anticiper les effets non intentionnels d'activités économiques légitimes, quand elles sont susceptibles de nuire au patrimoine naturel ou à la sécurité des populations humaines. Dans les deux cas, la responsabilité de l'État est engagée : il s'agit de la sûreté des citoyens, de l'avenir d'un bien commun (la nature, la qualité de l'air que l'on respire et de l'eau que l'on boit), ce qui engage les conditions de vie qui seront léguées aux générations futures. Or, cette élaboration politique est contemporaine de la globalisation des problèmes d'environnement en une crise environnementale, par le truchement de scénarios planétaires. Préoccupés de l'exploitation croissante des énergies fossiles, et de leur gaspillage dans les pays industriels, économistes et géologues ont d'abord simulé l'épuisement de ces ressources. Les démographes ont pris le relais, allant jusqu'à prédire une croissance hyperbolique, et donc insoutenable, de la population humaine. Sont alors venus les scénarios élaborés par les climatologues et les spécialistes de la physique et de la chimie de l'atmosphère, envisageant, si l'augmentation constatée de la teneur en « gaz à effets de serre » devait se poursuivre, d'importants changements climatiques. La dimension planétaire de la crise environnementale est désormais à l'horizon de toute politique de l'environnement.

Scénarios, diagnostics, mises au point de mesures curatives ou préventives, supposent le développement des connaissances et des capacités d'expertise. Tel qu'il est politiquement défini le champ des préoccupations environnementales implique ainsi de nombreuses disciplines biologiques (physiologie, éthologie, écologie et écotoxicologie), des sciences de la terre (physico-chimie de l'atmosphère, climatologie, paléoclimatologie, océanographie, géographie) mais aussi des sciences sociales (économie, sociologie, anthropologie). D'où la mise en place de programmes interdisciplinaires incitatifs, à l'interface de la recherche scientifique et de la politique (création en 1978 du PIREN au CNRS, de la Cellule « Environnement » de l'INRA en 1986). La tâche de ces instances est de traduire en intérêt scientifique l'intérêt social qui est attaché aux problèmes environnementaux.

L'investissement d'un nouveau champ scientifique

À la charnière des années 1970 et 1980, la plupart des scientifiques concernés accueillirent avec méfiance les recherches qui leur étaient suggérées de la sorte. La notion d'environnement leur paraissait trop floue, trop englobante, relevant de ces prénotions du sens commun que le chercheur doit déconstruire s'il veut reformuler scientifiquement (ou déclarer sans objet) les questions naïves qui lui sont adressées. Pire encore, elle désignait un ensemble de préoccupations étatiques, dont les motivations paraissaient d'autant plus suspectes que bien des discours tenus sur la crise environnementale intentaient un procès à la technique, voire même à la science.

Une autre façon de ne pas prendre l'environnement

ou sérieux fut de l'assimiler aux concepts éprouvés de telle ou telle discipline : ce fut le milieu pour les géographes, ce furent les écosystèmes et les complexes d'écosystèmes (du paysage à la biosphère) pour les écologues. On pouvait alors aisément changer de vocabulaire sans modifier le propos, parer ses objets de recherche de la légitimité sociale acquise par les préoccupations environnementales, et proposer ses services, sans avoir à se préoccuper d'élaborer une problématique spécifique.

On peut se demander pourquoi le terme d'environnement est devenu depuis lors d'un usage courant dans la littérature scientifique : cela tient autant aux avantages de sa polysémie qu'aux espoirs d'interdisciplinarité que son interprétation systématique a fait naître. La notion d'ambiance (qui s'est imposée en Italie et en Espagne) est associée (en France) à de micro-milieu : ainsi les ergonomes parlent des ambiances toxiques, ou sonores, des ateliers. La notion de milieu est certes plus plastique. Pour le biologiste, le milieu peut se réduire au substrat dont il remplit ses éprouvettes et ses boîtes de Pétri. Pour l'agronome, l'éthologue, l'écologue, le milieu est un complexe d'écosystèmes. Si la géographie en vient à parler de milieux pour désigner des régions relativement vastes (par exemple, le milieu méditerranéen), l'échelle spatiale privilégiée de la mésologie est la petite région, celle dont les conditions topologiques, édaphiques et climatiques sont relativement homogènes, comme l'histoire de sa mise en valeur. La notion d'environnement présente l'avantage d'être applicable de l'éprouvette à la planète, et donc de mettre en relation des champs disciplinaires différents. L'espoir d'unifier ces champs dans une démarche interdisciplinaire est d'autant plus partagé que la notion est solidaire de la théorie des systèmes. Ayant acquis une légitimité scientifique avec la cybernétique, le systémisme est d'un usage courant dans la plupart des disciplines concernées. Il laisse d'autant mieux entrevoir la possibilité d'articuler leurs apports, qu'il propose une définition rigoureuse de l'environnement, acceptable par chacune d'entre elles.

Du complexe système-environnement à la conception hiérarchique du monde

Soit un système S, considéré comme autonome et composé d'un ensemble d'éléments en relations mutuelles. Son autonomie résulte d'un fonctionnement « opérationnellement clos » et d'une ouverture sur un domaine d'existence qui lui est extérieur : c'est ce domaine que l'on définit comme l'environnement Es du système (Varela, 1979). Parler de clôture opérationnelle veut dire que le système contrôle l'activité de ses composants, offrant à tous un ensemble de contraintes et d'opportunités et disposant de mécanismes de régulation dans lesquels tous sont pris. Un système crée ainsi « son espace de signification ». La rationalité autocalibrée qui s'en dégage permet de comprendre comment les événements et les fluctuations qui affectent son environnement prennent sens pour lui. C'est

dire que « l'environnement procède du système » (O. Godard, 1997), que son identification et sa délimitation dépendent des interactions qui lient le système S à un extérieur, mais aussi de la manière dont son propre fonctionnement y est – ou n'y est pas – sensible.

Parce qu'il est extérieur au système S, cet environnement (Es) échappe à son contrôle. Source de contraintes et d'opportunités non négociables, il l'est aussi de perturbations, auxquelles le système doit s'adapter ou qui le désintègrent s'il n'y parvient pas. Or l'activité propre de S peut fort bien altérer celle des systèmes avec lesquels il est en interaction, modifiant ainsi les propriétés de son environnement. Les contraintes nouvelles auxquelles il doit alors s'adapter, sont les effets en retour de sa propre activité.

Pour analyser le comportement d'un système S, il faut donc prendre en compte d'une part le niveau inférieur, celui de ses constituants, de leur activité, de leurs interactions (ce qui est indispensable pour appréhender la structure et le fonctionnement de S, ainsi que pour identifier les perturbations internes qui peuvent le déstabiliser), d'autre part le niveau supérieur de son environnement Es, celui des contraintes, variations et perturbations qu'il impose au système, éventuellement en réaction aux altérations qu'il subit en raison de l'activité de S. Ce principe méthodologique – qualifié de holiste puisqu'il se refuse à déduire les propriétés de tout système de la seule combinaison de celles de ses composants (P. Blandin & D. Bergandi, 1997) – est aujourd'hui admis par les chercheurs qui ont investi le champ de l'environnement. De même qu'est acceptée la conception hiérarchique sur laquelle il débouche. En effet, les éléments de S peuvent être considérés comme des sous-systèmes (c'est-à-dire des systèmes d'ordre inférieur par rapport à S), composés à leur tour de composants qui sont des sous-systèmes, et ainsi de suite. De même l'environnement Es peut être appréhendé comme un système d'ordre supérieur (dont S est un sous-système). Comme tout système, il a lui-même un environnement (EEs), et peut répercuter sur S, tout en les interprétant, les contraintes, opportunités, variations et perturbations qui lui viennent de ce dernier.

Le champ des recherches sur l'environnement est donc celui des interactions qu'un système S entretient avec son domaine d'existence Es, et l'on dira qu'il y a problème d'environnement quand des modifications de Es obligent S à affronter une situation inédite (que ces modifications aient pour origine l'activité propre de S ou des perturbations affectant EEs).

Holisme méthodologique ou holisme ontologique

Cependant, si la plupart des scientifiques s'accordent sur cette conception, les interprétations qu'ils en donnent diffèrent, et se regroupent schématiquement en deux catégories. S'en tenant au principe méthodologique, certains conçoivent les systèmes comme autant de découpages arbitraires dans un continuum de processus qui se déploient à différentes échelles d'espace et de temps. D'autres, voyant dans les systèmes des

entités réelles, appréhendent leur hiérarchie comme une série discrète de niveaux d'intégration (ou d'organisation) du vivant.

Dans la première interprétation (Allen & Starr, 1982), le système de référence peut être défini en fonction des objectifs cognitifs ou pratiques de la recherche, voire même selon les commodités de l'analyse. Il ne s'agit que de découper arbitrairement un tissu d'interactions dont les processus se développent à différentes échelles spatio-temporelles. D'un tel système procèdent différents environnements selon l'échelle appréhendée. L'attention est donc focalisée sur les perturbations qu'initie l'évolution du système de référence à différentes échelles de temps et d'espace. La démarche invite ainsi à une analyse multiscale des perturbations introduites par les activités humaines. Pour illustrer schématiquement le propos, prenons le cas d'un élevage intensif : il modifie fortement et à court terme la dynamique de la flore et de la faune du paysage dans lequel se situe l'exploitation. Il contribue aussi, mais plus modestement, à augmenter la teneur en nitrate des eaux : s'il y a d'autres élevages de même type dans la région, on assistera, à une échelle géographique plus large, et sur un registre de temps plus long, à la pollution des nappes phréatiques et des cours d'eau. Enfin, par ses effluents de méthane, le même élevage participe, mais de manière infinitésimale, à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre. Cependant l'accumulation de ces minuscules apports (sur le registre du temps long et à l'échelle planétaire) peut contribuer au changement du climat de la terre.

À cette conception multiscale s'oppose une interprétation ontologique des systèmes. Si le comportement d'un système quelconque ne peut être réduit à la combinaison de ceux de ses éléments, s'il peut construire son espace de signification, c'est que des propriétés irréductibles émergent du complexe d'interactions dont il est le théâtre et qui associent ses composants. On ne saurait donc découper arbitrairement un système dans un réseau continu d'interactions : encore faut-il que le système ainsi délimité corresponde à une entité, caractérisée par une (ou plusieurs) propriété(s) émergente(s) – (dites aussi relations définissantes). Il existe ainsi une hiérarchie de systèmes emboîtés, par niveaux d'intégration successifs. À chaque niveau correspond une propriété émergente (ou plusieurs). Le système et son environnement viennent ainsi prendre place dans une hiérarchie qui va de la molécule à la biosphère, en passant par tous les « intégrons » (Jacob, 1970) ou « holons » (Koestler, 1969) que l'on peut définir : cellules, organes et organismes, pour les niveaux d'organisation du vivant qui ont une enveloppe ; populations, peuplements, écosystèmes, complexes d'écosystèmes, biomes (on appelle biomes les grands types de végétation – avec les faunes qui leur sont associées – qui se succèdent en bandes approximativement parallèles du Pôle à l'Équateur. Ces biomes – par exemple : forêt sempivérte équatoriale, forêt tropicale caducifoliée, savane herbacée, désert, etc. –

sont caractéristiques des grandes zones climatiques de la planète) et biosphère pour ceux qui n'ont pas de frontière précise. Un holisme ontologique vient ainsi consolider le holisme méthodologique... mais il suppose la mise en évidence de propriétés émergentes, plus faciles à postuler qu'à démontrer.

De ces deux conceptions se déduisent des démarches inverses dans l'évaluation des problèmes environnementaux. De l'acception ontologique, on conclura volontiers que la prudence revient à perturber le moins possible le niveau d'intégration qui englobe celui où se déploie l'activité considérée. On jugera donc les interventions humaines à partir de l'incidence qu'elles ont sur leur environnement. Ceci autorise une démarche hétéroréférentielle, écocentrique, imposant du point de vue de l'environnement (qui acquiert, de ce fait, une valeur intrinsèque) des normes à la mise en valeur des ressources. Mais, comme il n'y a pas d'évaluation sans évaluateur (J.B. Callicott, 1989), se pose inévitablement la question de ses modalités. On ne parle au nom de l'environnement qu'à partir d'un point de vue situé dans le champ scientifique (et au-delà dans le champ social). Aucune hétéroréférence ne saurait ainsi échapper aux controverses scientifiques, comme à l'incomplétude des énoncés concernant la complexité des problèmes environnementaux. Si elle se veut conséquente, la démarche écocentrique implique de prendre en compte les conditions sociales de l'expertise qui la fonde, et donc d'intégrer la démarche inverse.

De la conception purement méthodologique du holisme se tirent d'autres conclusions. Parce qu'il procède du système arbitrairement (et légitimement) pris pour référence, l'environnement ne saurait avoir de valeur que relative. On ne saurait de même se proposer pour objectif de le perturber le moins possible, dans la mesure où il est, par définition, composé de tout ce qui est susceptible d'être perturbé par l'évolution du système. L'évaluation environnementale d'une activité demeure autoréférentielle : on peut donc adopter une démarche anthropocentrique. Mais son principe méthodologique impose d'embrasser, à différentes échelles spatio-temporelles, les modifications induites dans le tissu des interactions, et les perturbations auxquelles il faudra, en retour, s'adapter. Pour être conséquente l'évaluation autoréférencée doit inclure, à son tour, son inverse : l'anthropocentrisme doit intégrer, à un moment de sa démarche, un point de vue écocentrique.

À qui parle au nom de l'environnement, il est aisé de relever les distorsions que ses préjugés, ses présupposés, comme l'état du savoir et des techniques d'investigation, ont introduites dans son évaluation. Inversement Aldo Leopold peut aisément montrer, au destructeur de loups qu'il avait été, qu'un chasseur conséquent doit « penser comme un montagnard » (A. Leopold, 1948) avant d'exterminer les loups : prendre le point de vue de cet environnement qu'est la montagne pour qui y poursuit son gibier, c'est comprendre que la survie du loup se fera au plus grand

bénéfice des chasseurs et de leurs proies. On peut espérer que, par la confrontation de ces deux argumentations opposées, dont chacune intègre nécessairement l'autre comme moment de sa démarche, s'inventera une façon de situer les activités humaines dans leur environnement, et donc de repenser les relations de l'homme à la nature.

- ALLEN T.F.H. & STARR T.B., *Hierarchy : Perspectives for Ecological Complexity*, Univ. of Chicago Press, 1982. – BERQUE A., *Médiance – de milieux en paysages*, Paris, GIP Reclus, 1991. – BLANDIN P. & LAMOTTE M., « L'organisation hiérarchique de systèmes écologiques », in MONTALENTI G., RENZONI A. & ANELLI A. éd., *Atti del terzo congresso nazionale della Società Italiana di Ecologia*, Edizioni Zara, 1989. – BLANDIN P. & BERGANDI D., « Entre la tentation du réductionnisme et le risque d'évanescence dans l'interdisciplinarité : l'écologie à la recherche d'un nouveau paradigme », in LARRÈRE C. & LARRÈRE R. éd., *La crise environnementale*, op. cit., 1997. – CALLICOTT J.B., *In Defense of the Land Ethic – Essays in Environmental Philosophy*, State Univ. of New York Press, 1989. – CASTRI F. DI & HADLEY M., « Enhancing the Credibility of Ecology : Interacting Along and Across Hierarchical Scales », *Geojournal*, n° 17 – 1, 1988. – GEORGE P., *L'environnement*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1971. – GODARD O., « L'environnement, une polyésie sous-exploitée », in JOLLIVET M. éd., *Sciences de la nature sciences de la société – Les passeurs de frontières*, Paris, Éd. CNRS, 1992 ; « Le concept d'environnement, une hiérarchie enchevêtrée », in LARRÈRE C. & LARRÈRE R. éd., *La crise environnementale*, op. cit., 1997. – JACOB F., *La logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970. – KESTLER A., « Beyond Atomism and Holism – The Concept of Holon », in KESTLER A. & SMITHS J.R. éd., *Beyond Reductionism : New Perspectives in the Life Sciences*, Hutchinson of London, 1969. – LARRÈRE C., *Les philosophies de l'environnement*, Paris, PUF, 1997. – LARRÈRE C. & LARRÈRE R., *Du bon usage de la nature – Pour une philosophie de l'environnement*, Paris, Aubier, 1997 ; (éd.), *La crise environnementale*, Paris, INRA, 1997. – LÉOPOLD A., *Sand County Almanach*, trad. fr. *Almanach d'un comté des sables*, Paris, Aubier, 1995. – O'NEILL R.V., ANGELIS D.L. DE, WAIDE J.B. & ALLEN T.F.H., *A Hierarchical Concept of Ecosystems*, Princeton Univ. Press, 1986. – ROBIC M.-C., *Du milieu à l'environnement – Pratiques et représentations du rapport homme/nature depuis la Renaissance*, Paris, Économica, 1992. – TISSIER J.-L., « La géographie dans le prisme de l'environnement », in ROBIC M.-C. éd., *Du milieu à l'environnement*, op. cit., 1992. – VARELA F.J., *Principles of Biological Autonomy*, New York, Oxford, North Holland, 1979. – VIDAL DE LA BLACHE P., *Principes de géographie humaine*, Paris, A. Colin, 1921. – Coll. : *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*, éd. F. Ramade, Éditions 1993. – *Dictionnaire Historique de la langue française*, éd. A. Rey, Paris, Robert, 1993.

Catherine LARRÈRE et Raphaël LARRÈRE

→ Biogéographie : Écologie ; Précaution.

ÉPIDÉMIE

La signification du mot épidémie n'a pas changé depuis le temps où Hippocrate l'utilisait pour désigner, par opposition aux maladies individuelles, les maladies générales qui atteignent un grand nombre d'habitants.

Toutes les définitions ultérieures reprennent celle du médecin de Cos : l'épidémie est une maladie qui s'abat sur le peuple ; elle touche, en un même lieu et simultanément, un grand nombre de personnes. Mais cette définition présente un inconvénient : elle pourrait faire croire qu'il existe un objet naturel qui serait toujours le même à travers les âges. Les sociétés ont entendu de manières très diverses la chose appelée peuple. Lorsqu'il s'abat sur le peuple-pêcheur, le fléau est une punition et sa raison première réside dans la volonté de Dieu. Quand elle touche le peuple comme population, la maladie est un phénomène naturel et sa cause se trouve dans l'environnement. À partir du moment où le peuple est perçu comme un ensemble de vivants, le complexe pathogène définit la chaîne épidémique. Il faut donc distinguer trois médecines : une médecine théologique, une médecine d'État et une médecine scientifique.

Le temps des fléaux

À cette époque, l'explication des pestilences renvoie au modèle du péché originel : les hommes contractent une maladie parce qu'ils ont commis une faute. Le repérage des causes naturelles impose le rappel de l'hippocratismes : les maladies dépendent des saisons et, dans le corps, elles se manifestent sous la forme d'un conflit des humeurs. La santé consiste dans l'harmonie des fluides composant la nature de l'homme : le sang, la pituite, la bile jaune et la bile noire. Relativement à quoi, la maladie se traduit par un déséquilibre des humeurs. Jérôme Fracastor, le premier, parle des semences douées de vie (*contagium animatum*). Ambroise Paré attribuait un rôle essentiel aux effluves nocives qui imprègnent les hommes et les choses. C'est le fait, massif, de l'épidémie qui impose l'idée d'un agent morbide transmis d'un individu à l'autre. Mais il suffit que les malades soient rassemblés pour que s'engendre un miasme nocif : le typhus suit les lignes de la pauvreté, comme la vermine, en sévissant chez les mendiants. La distinction si évidente, pour nous, entre causes prédisposantes et agents de transmission n'est pas perçue à cette époque. Un groupe social touché par la disette constitue un foyer de pestilences, et non un terrain favorable aux explosions épidémiques. De même, les parasites tels que les puces et les poux sont les comparses de la misère, et non pas les vecteurs des maladies infectieuses.

Le problème de l'identification de la maladie est crucial, puisque le sort du malade et la sécurité de la communauté en dépendent. D'où le recours à des examinateurs exerçant la fonction d'expert. En Europe, certaines léproseries sont réputées dans ce rôle (Gand, Valenciennes). Les bubons caractéristiques à l'aîne et sous les aisselles permettent d'identifier la peste. Mais, en cas d'échec, comment rendait-on l'invisible visible ? Les procédés utilisés s'apparentent au rituel de l'ordalie : une épreuve qui passait pour révéler la décision de Dieu. Dès cette époque, la provenance étrangère des fléaux était discutée. La lèpre était mise

au compte des invasions romaines et sarrasines. La peste, originaire de l'Asie centrale, aurait été conduite par les vaisseaux de la mer Noire jusqu'aux ports de la Méditerranée. L'épidémie de peste bubonique la plus connue est la peste dite de Justinien (531-580). La deuxième grande pandémie, qui apparaît vers 1346, envahit l'Europe tout entière : la plus meurtrière est la fameuse peste noire qui fit 25 millions de victimes entre 1348 et 1352. Le typhus, qui apparaît dans le sillage des guerres (guerre de Trente Ans), s'inscrit dans la ligne des grandes pestilences dont la plus célèbre est celle décrite par Thucydide : elle sévit dans l'Attique vers 430-425 avant J.-C.

Entraver la propagation des fléaux, c'est isoler, séparer et fixer des foyers de dangerosité : un individu s'il est lépreux ; une communauté tout entière quand pèse la menace de la peste ; le groupe des mendiants lorsqu'apparaît le typhus et celui des prostituées en cas de syphilis. À l'origine des pratiques de défense, donc, une fonction négative : il faut circonscrire et bloquer le mal en établissant des barrières. Mais les mesures de protection contre les fléaux sont loin d'être uniformes. D'abord, les pratiques de défense contre la lèpre s'appliquent aux individus et reposent sur un principe d'exclusion. Ensuite, on fait valoir contre la peste des mesures disciplinaires concernant l'ensemble de la communauté. C'est dans les ports que la peste a suscité des innovations. Les règlements relatifs à l'inspection des navires, l'isolement des personnes et la désinfection des marchandises définissent un tout premier dispositif de dépistage. Ce n'est qu'au XVI^e s. que les institutions sanitaires se donnent une législation sanitaire cohérente et relativement stable. Enfin, le typhus et la syphilis ont déterminé la mise en œuvre de mesures à mi-chemin de celles qu'on applique aux lépreux et aux pesteux, l'exclusion ou le cantonnement des malades dans des hôpitaux spéciaux.

Les maladies populaires

Au XVIII^e s., la pensée médicale substitue les catégories naturelles du pathologique aux catégories morales de la maladie. C'est la réorganisation des hôpitaux comme lieux de répartition, de comparaison et d'analyse des maladies qui a rendu possible l'ajustement des symptômes aux lésions repérées à l'autopsie. À la même époque, l'étude des phénomènes pathologiques collectifs change aussi de physiologie : apparaît une médecine de l'environnement et des conditions d'existence. Quand le foyer d'infection est engendré par un lieu malsain, ou par un rassemblement d'individus, l'atmosphère est le véhicule des miasmes. Les principes morbides du choléra, de la fièvre jaune, du typhus et des fièvres résident dans le milieu. En revanche, quand le foyer est constitué par un individu, le virus peut être transmis du malade à une personne saine soit directement ou indirectement. La dissémination de la fièvre typhoïde ou de la variole témoignait en faveur des chaînes de transmission. Faute d'une étiologie vérifiée, il était parfois possible d'établir des

corrélations significatives. En 1853, dans le sud de Londres, John Snow montrait que la mortalité cholérique dans les maisons alimentées en eaux puisées en aval de la Tamise a été neuf fois plus grande que dans celles qui étaient desservies en eaux puisées en amont.

Dès le début du XIX^e s., la question des épidémies est envisagée dans son rapport avec les impératifs de la production. Les exigences du capitalisme rendent compte d'une nouvelle préoccupation relative à la santé publique. En Allemagne, en France et en Angleterre l'élaboration d'une politique sanitaire est au cœur des préoccupations de l'État. La médecine comme instance de contrôle social se donne de nouveaux objectifs. D'un côté, veiller à la santé et au bien-être physique de la population ; de l'autre, assurer la baisse des taux de morbidité. Elle exerce son pouvoir sur une population qu'elle encadre de toute une série de prescriptions. Mais elle oriente surtout son intérêt en direction des classes démunies qui constituaient un danger pour la société et une menace pour l'espèce. Se profile un nouveau partage qui s'ordonne à la bipolarité du normal et du pathologique. La variole était considérée comme le fléau familial par excellence. C'est au XVI^e s. que le Nouveau Monde fit l'épreuve de cette maladie meurtrière qui décima les populations indiennes. Réciproquement, l'Ancien Monde découvrait la syphilis. Avec l'accroissement de la navigation, l'Europe fait aussi l'expérience de nouvelles maladies : le choléra originaire du Bengale et la fièvre jaune qui provient d'Amérique centrale et du Brésil.

La lutte contre les maladies populaires s'inscrit dans le programme d'une médecine politique et se confond avec l'hygiène publique. De même que la ville devenait objet de médicalisation, de même la population devenait objet d'assistance médicale. Non seulement la pauvreté définit un ensemble de conditions dégradantes qui exigent qu'on leur porte remède, mais elle est à l'origine des foyers de dangerosité. L'hygiène publique vise le contrôle des catégories sociales les plus exposées. La prophylaxie (le mot désigne l'action de garantir) vise à prévenir les maladies qui menacent les populations. Tous les efforts des hygiénistes portaient sur la prévention des maladies sinon curables du moins évitables. La vaccination est une technique qui s'inscrit dans ce mouvement par lequel on a cherché à organiser des soins médicaux autour de l'enfant. Avec la menace de la syphilis, l'autorité centre son attention sur les foyers de contamination. Les solutions proposées par Parent-Duchâtelet ressortissent à une prophylaxie préservatrice qui prend appui sur la police. Dans les ports, les législations sanitaires de 1848 et de 1850 officialisent les préoccupations du gouvernement au sujet des épidémies de choléra, de peste et de fièvre jaune. Il s'agit désormais d'ajuster les impératifs du commerce et ceux de la santé.

Les complexes pathogènes

Dans la seconde moitié du XIX^e s., Pasteur posait les bases de la microbiologie moderne : il réfutait la

génération spontanée, fondait la pratique de l'asepsie et ouvrait le chapitre de l'étiologie des maladies infectieuses. Le perfectionnement du microscope, l'emploi de colorants spécifiques tels que l'aniline et la préparation de milieux de culture solide ont joué un rôle considérable. À partir de 1880 de nombreux bacilles sont identifiés : ceux de la lèpre, de la tuberculose, de la diphtérie, du typhus et de la peste. À la même époque, la parasitologie découvrait une série d'agents qui s'apparentent au règne animal. Les protozoaires tels que les trypanosomes et l'agent du paludisme. À quoi il faut ajouter la découverte des helminthes, agents de l'ankylostomose et des bilharzioses. À partir de 1930, la mise au point de techniques de culture et de microscopie électronique a permis d'élucider les mécanismes complexes du parasitisme intracellulaire des virus. Mais l'identification des agents pathogènes est inséparable des questions relatives aux modes de propagation des épidémies. C'est le point de vue de la biologie qui a permis de renouveler et d'étendre le champ de l'épidémiologie en instaurant une science des vecteurs. L'intervention de comparses vivants tels que microbes, vecteurs et réservoirs de virus a imposé aux médecins la notion de « complexe pathogène ».

Le plus souvent, c'est l'examen bactériologique qui autorise le diagnostic. Mais l'invention des tests de dépistage fondait un nouveau partage qui rendait visibles des infections inapparentes. D'où la distinction entre individus séropositifs, qui peuvent présenter les apparences de la santé, et les séronégatifs. Le test Bordet-Wassermann, par exemple, était utilisé pour le dépistage de la syphilis dans les armées. Le dépistage systématique marque une volonté de règlement autoritaire des problèmes de santé publique en procédant à des clivages qui peuvent comporter l'exclusion sociale. Une autre ligne de partage passe entre les pays : elle sépare le Nord et le Sud, les pays riches et les pays en voie de développement. L'intérêt sans précédent pour les pathologies exotiques était indissociable d'une série d'enjeux politiques, économiques et commerciaux. La décolonisation a laissé une situation économique et sociale dont les conséquences sont dramatiques. L'Inde constitue le foyer principal de la lèpre avec 4 millions de malades. L'Afrique tropicale et subtropicale est largement atteinte. Le sida et la tuberculose, qui sont liés à la contamination interhumaine, suivent une courbe ascendante dans les statistiques de la démographie sanitaire en Afrique centrale, en Asie du Sud-Est et en Amérique du Sud. Dans ces pays, les cadres nosologiques reflètent l'état de misère des populations décimées par ces fléaux.

Il fallait que l'homme identifie ses agresseurs pour déjouer leurs stratégies et leur opposer celles qu'il a su inventer. Dès 1880, Pasteur et ses disciples ont mis au point un vaste programme de prophylaxie fondé sur la production de vaccins. La chimiothérapie suppose la découverte des affinités spécifiques entre les colorants et les éléments de la cellule. Mais le succès est décisif avec la pénicilline et les divers antibiotiques successivement

isolés. Il faut distinguer trois modalités de la prévention. D'abord, les campagnes de vaccination permettent de protéger les populations. Ensuite, faute d'un vaccin, le traitement curatif de maladies telles que la lèpre et la syphilis devient le premier acte de la prévention. Enfin, dans le cas où on ne dispose ni d'un vaccin ni d'un traitement curatif, la prévention consiste à placer les individus en situation de responsabilité. L'ensemble des mesures destinées à prévenir ou à combattre les maladies épidémiques définit la prophylaxie. Les actions préventives sont offensives lorsqu'elles s'opposent à une explosion épidémique. En revanche, elles sont de nature défensive lorsqu'il s'agit de réduire l'incidence d'un fléau, c'est-à-dire de limiter l'augmentation des cas de maladie. La lutte contre les affections contagieuses passe par les campagnes de vaccination massive. En ce qui concerne les affections hydriques, il faut s'opposer à la propagation des microbes en interrompant les chaînes de transmission.

Dans l'étude des phénomènes pathologiques collectifs, l'histoire met en évidence une série d'étapes qui semblent s'enchaîner suivant un ordre de complexité croissante. Depuis la Renaissance, on a vu ainsi apparaître à trois reprises une explication nouvelle des épidémies. D'abord, jusqu'au XVIII^e s., s'impose la pensée de l'origine surmaternelle des fléaux. Puis, à partir du XVIII^e s., un ordre intramondain est substitué au surmatériel : une série de phénomènes tels que le climat et les conditions d'existence suffisaient à rendre compte de l'apparition des épidémies. À partir de la fin du XIX^e s., les découvertes relatives à la biologie des micro-organismes et aux rapports qu'ils entretiennent avec d'autres vivants signalent l'émergence des complexes pathogènes. À cet échelonnement des causes allant de la plus lointaine aux plus proches, il fallait ajouter celui des techniques d'identification des maladies de plus en plus fines et des mesures de prévention allant aussi des plus élémentaires aux plus avancées. Mais la découverte de nouveaux vaccins, la recherche de médicaments efficaces et l'invention de méthodes de lutte inédites contre les vecteurs restent à l'ordre du jour.

► BIRABEN J.N., *Les hommes et la peste*, Paris, Mouton, 2 vol., 1976. — BOVET D., *Une chimie qui guérit. Histoire de la découverte des sulfamides*, Paris, Payot, 1988. — BULLOCH W., *The History of Bacteriology*, New York, Dover, 1977. — DAGOGNET F., *Méthodes et doctrines dans l'œuvre de Pasteur*, Paris, PUF, 1967. — DELAPORTE F., *Histoire de la fièvre jaune*, Paris, Payot, 1989 ; *Le savoir de la maladie, essai sur le choléra de 1832*, Paris, PUF, 1990. — FOUCAULT M., *Naissance de la clinique*, Paris, PUF, 1975. — GRMEK M., *Histoire du sida*, Paris, Payot, 1990. — JOUANA J., *Hippocrate*, Paris, Fayard, 1992. — MOULIN M., *Le dernier langage de la médecine*, Paris, PUF, 1991. — SALOMON-BAYET C., *Pasteur et la révolution pastoriennne*, Paris, Payot, 1986. — VIGARELLO G., *Le sain et le malsain*, Paris, Le Seuil, 1993.

François DELAPORTE

ÉPISTÉMOLOGIE

Avec la publication en 1962 du fameux livre de Thomas Kuhn sur *La structure des révolutions scientifiques*, le monde de la philosophie des sciences a commencé à basculer. Un physicien américain, docteur en physique depuis 1949, signalait sa reconversion à l'histoire des sciences d'un bref ouvrage qui s'en prenait avec brio à la façon dont on concevait les tâches et les procédures de la philosophie des sciences — ou épistémologie — dans la plupart des grandes universités des États-Unis. En s'appuyant sur des exemples tirés de l'histoire de la physique, il mettait en question non seulement l'image de la science qui y dominait, mais celle de la rationalité — et de la raison — qui y était présupposée.

Aux diverses variantes de l'empirisme qui présentaient la connaissance scientifique comme issue d'une série d'observations logiquement coordonnées, Kuhn objectait qu'il n'a jamais existé d'observation pure ; il montrait toute observation scientifique sous-tendue par une théorie. Il dénonçait comme un leurre le projet affirmé d'une « unification des sciences » soit par une méthodologie soit par un langage communs. Recourant à la vieille métaphore cosmologico-politique de la « révolution », il faisait de surcroît apparaître que le progrès scientifique n'est point cumulatif, qu'il comporte des « moments critiques » où se reconstitue sur de nouvelles bases l'ensemble des questions posées et des problèmes formulés, où se redéfinissent les procédures de leur solution. Pour rendre compte de cette allure discontinue du progrès dans la connaissance, il avançait une notion qui n'a cessé de faire fortune, sans doute à cause du flou qui entoure son usage : celle de « paradigme ». Selon une perspective sociologique, héritée du médecin polonais Ludwik Fleck, il désignait par là les règles admises et intériorisées comme « normes » par la communauté scientifique à un moment donné de son histoire pour délimiter et problématiser les « faits » qu'elle juge dignes d'étude. Qu'un paradigme règne sans partage, et les chercheurs s'affairent dans le cadre d'une « science normale », c'est-à-dire à la fois normalisée et normative. Au XVIII^e s. on s'emploiera ainsi à être « newtonien » en chimie, en histoire naturelle, en psychologie... Que ce paradigme se trouve remis en cause par une série d'anomalies, comme on le voit avec le second principe de la thermodynamique et les difficultés d'interprétation de l'électromagnétisme de Maxwell à la fin du siècle suivant, et l'on entre dans une période critique, laquelle s'achèvera avec la mise en place d'un nouveau paradigme. Kuhn n'hésite pas alors à montrer que l'attachement de ladite communauté scientifique à « son » paradigme se paie souvent d'une certaine imprécision des concepts et, à l'occasion, d'entorses à la rigueur déductive dans l'élaboration et la mise en œuvre des théories.

Trois ans avant ce livre, avait été publiée la traduction anglaise de l'ouvrage majeur de Karl Popper — dont la première version en langue allemande était

restée dans l'ombre depuis plus de vingt ans : *La logique de la découverte scientifique*. Kuhn se range à ses côtés pour combattre l'empirisme. Mais il s'en démarque sur tous les présupposés que Popper, à ses yeux, partage avec ses adversaires (qu'il existe une différence décisive entre observation et théorie ; que la croissance du savoir soit pour l'essentiel cumulative...) ainsi que sur les points où Popper croit pouvoir les battre sur leur propre terrain (la croyance en l'existence d'une logique scientifique ; le projet réaffirmé d'une unification des sciences).

L'immense retentissement de l'ouvrage de Kuhn a eu notamment pour effet d'ouvrir la voie à la réévaluation des travaux des historiens des sciences à l'échelle internationale. Faisant référence à un aphorisme du *Crépuscule des idoles*, Ian Hacking a pu écrire peut-être imprudemment : « Il ne nous arrivera plus de déshistoriciser la science pour lui prouver notre respect, comme nous le reprochait Nietzsche. »

Mais pour comprendre sa véritable portée, il convient de revenir en Europe au début du siècle. La philosophie des sciences y avait connu à Vienne un élan militant sans précédent, en marge des institutions académiques sinon contre elles, sous l'impulsion d'un groupe de scientifiques réunis, toutes disciplines confondues, autour du philosophe Moritz Schlick. Le *Manifeste* du Cercle de Vienne avait été publié en 1929. L'objectif dépassait de loin celui d'une réforme de l'« épistémologie ». Il s'agissait de promouvoir « la conception scientifique du monde » qui s'annonçait alors, en unifiant ce qu'on appelait alors dans les pays de tradition germanique les « sciences de l'esprit » avec les sciences de la nature. Ils relançaient sur de nouvelles bases et dans un sens résolument moderniste ce qu'Auguste Comte avait appelé en son temps sa grande « opération philosophique ». Le mot d'opération signifiant qu'il concevait la philosophie non comme contemplation, mais comme action susceptible de produire un effet maîtrisé. Comte joue en effet d'une double connotation militaire et chirurgicale. Action organisée contre un ennemi : l'esprit métaphysique d'ascendance théologique qui précipite l'Europe dans l'anarchie intellectuelle et morale depuis la Révolution française. Intervention douloureuse d'un thérapeute qui rétablit le sain développement de l'esprit — et facilite son accession à l'état positif en matière d'organisation sociale et politique.

Du positivisme ces Viennois crurent pouvoir retenir un mot d'ordre « Éliminer la métaphysique ! » Ce véritable slogan se présentait comme la traduction d'un leitmotiv du *Cours de philosophie positive* : la science renonce à s'interroger sur le pourquoi des phénomènes pour se contenter de décrire le comment de leurs enchaînements tels qu'ils peuvent être observés.

Le « positivisme logique » se présente ainsi comme un empirisme, il croit pouvoir soumettre l'ensemble des disciplines scientifiques à la représentation qu'il se fait de la physique : mise en correspondance d'observations sensibles simples et d'énoncés coordonnés par un calcul logique rigoureux. Ce projet prend l'appellation

de « physicalisme ». Du fait de l'exil où ses promoteurs se sont trouvés contraints par les nazis, la doctrine qui a subi, à Vienne même, plusieurs réaménagements, s'est implantée en Angleterre et surtout aux États-Unis, grâce en particulier au logicien d'origine allemande Rudolf Carnap qui enseigna d'abord à Chicago.

Supplantant les formes traditionnelles de l'empirisme anglo-saxon, cette philosophie, qui empruntait amplement à la logique mathématique pour mieux se présenter elle-même comme scientifique, était devenue aux États-Unis, depuis 1935, le ciment d'une professionnalisation universitaire de la philosophie. En bousculant la profession de l'extérieur, Kuhn ouvrait un champ de discussions nouvelles qui offrait la possibilité aux philosophes des sciences de retrouver à l'échelle internationale un langage commun, sur la base d'analyses historiques documentées. Vienne ne représentait en effet nullement toute l'Europe. L'école philosophique dont elle avait accouché en 1929 n'y avait à vrai dire, au contraire, nullement connu le succès qu'elle rencontra aux États-Unis. Si l'Angleterre empiriste et logicienne de Bertrand Russell lui avait d'abord naturellement fait bon accueil, elle n'avait pas tardé à s'en détourner par l'interprétation qu'elle crut pouvoir donner de l'enseignement de Ludwig Wittgenstein à Cambridge : la philosophie analytique dite du « langage ordinaire » ne placera plus la science au centre de ses intérêts. Au lendemain de la guerre, le néokantisme et la phénoménologie ont continué à occuper l'essentiel du terrain dans les universités allemandes. Même l'œuvre bien connue de Jurgen Habermas y trouve ses bases philosophiques essentielles via celle de Karl O. Apel, laquelle se présente comme la « reprise » du « tournant linguistique » de la philosophie anglaise dans le cadre d'un questionnement de type kantien sur les fondements absolus de la rationalité. L'Italie philosophique, longtemps dominée par la grande figure du Napolitain Benedetto Croce (1866-1952) avait trouvé dans son historicisme absolu une critique de la métaphysique et une théorie de la connaissance qui en venaient à poser la connaissance historique comme seule connaissance effective. L'ascendance hégélienne de l'« actualisme » de Giovanni Gentile (1875-1944) le situait, lui aussi, aux antipodes de tout empirisme.

En France, c'est paradoxalement la postérité d'Auguste Comte qui fit obstacle à l'implantation du positivisme logique. Même s'il l'adossait à une « logique naturelle » le fondateur du positivisme ancrant en effet solidement la philosophie des sciences dans leur histoire. C'est ce qu'en retinrent chacun pour soi dans la première moitié du siècle des philosophes aussi différents que Léon Brunschwig, Emile Meyerson et Gaston Bachelard. On a pu utiliser l'expression d'« épistémologie historique » pour désigner le résultat de cet ancrage. On pourrait qualifier d'« histoire épistémologique » l'histoire des sciences telle que la pratiquait au même moment Alexandre Koyré à l'École pratique des hautes études.

Faut-il invoquer le conservatisme de « traditions

nationales » résistant à un mouvement qui s'affichait d'emblée moderniste et cosmopolite ? Cette interprétation n'apparaît, à tout le moins, pas suffisante. Les points d'achoppement tels qu'ils se révèlent en 1934 à Prague puis en 1935 à Paris au cours de deux congrès internationaux portent sur le fond : sur la conception empiriste de la connaissance, sur le statut de la logique, sur le projet de refonte « physicaliste » de l'ensemble des disciplines scientifiques, à commencer par les sciences sociales et humaines naissantes.

Contrairement à ce qu'ils prétendaient, les positivistes ne renouvelaient pas la tradition empiriste en philosophie. Ils la radicalisaient, à un moment où les développements des sciences physiques semblaient exiger au contraire qu'on s'en libérât. La constitution de la théorie de la relativité, restreinte puis généralisée, qui avait remis la physique sur pieds depuis le début du siècle, reposait non sur la modestie ascétique d'observations répétées, mais, selon le mot d'Einstein, sur des « expériences de pensée » relevant d'une « féroce audace spéculative » d'abord destinée à résoudre une contradiction formelle affectant l'édifice de la physique. La « révolution des quanta » venait de réouvrir une crise durable en maniant des réalités inaccessibles à l'observation sensible au sens « visuel » où l'entendait l'empirisme. Il y avait tout lieu, comme l'indiquait Bachelard dès ses premiers textes, de réviser le concept classique d'observation.

La question du rôle des mathématiques en physique n'apparaît pas moins cruciale. Sans entrer dans le détail technique, il faut savoir que le Cercle de Vienne adopta la thèse que les mathématiques étaient « fondées » sur la logique, elle-même accessible à la symbolisation depuis le début du siècle grâce aux travaux de Russell, de Frege et de Wittgenstein. La partie de cette nouvelle logique, formelle, leur paraissait universelle. Opinion qui n'allait nullement de soi et se heurta tout de suite à une forte opposition. Dès 1926, le mathématicien philosophe suisse Ferdinand Gonseth, dans son grand ouvrage sur *Les fondements des mathématiques*, pose que « les règles de la logique ne paraissent pas avoir un domaine de validité illimité ; [et qu'] elles ne sont peut-être justes qu'en fonction de ce à quoi on les applique ». Le mathématicien et logicien italien Federico Enriques se rallie bientôt à l'idée que la logique serait « une physique de l'objet quelconque ». Le jeune philosophe et logicien français Jean Cavaillès va dans le même sens, rejoint par Bachelard. Les mathématiques ne sont pas un simple langage dont la rigueur serait garantie par un fondement logique, elles manifestent un pouvoir d'invention de formes ou de schémas mis en œuvre par les physiciens pour déterminer, c'est-à-dire prélever et délimiter, le réel qu'ils étudient. Ces positions s'accordaient visiblement mieux avec la démarche de physiciens contemporains comme Einstein ou Heisenberg.

L'ambition d'unifier les sciences sur la base du physicalisme visait, au premier chef, la biologie mais ne prenait son véritable sens qu'en s'appliquant aux sciences humaines et sociales. Le « behaviorisme »

américain naissant qui croyait pouvoir mesurer le comportement humain par observation extérieure pouvait lui accorder crédit. En revanche, cette ambition se heurtait en Europe aussi bien à la tradition allemande interprétative des « sciences de l'esprit » issue de Wilhelm Dilthey (1833-1911) qu'à la psychologie génétique que bâtissait Jean Piaget (1896-1980) à Genève ou encore aux développements de la psychanalyse freudienne.

L'ère de la grande remise en cause de ce schéma d'ensemble qui s'est ouverte du côté américain aboutit-elle aujourd'hui à un accord universel sur un objet de recherches et sur une méthodologie ? Rien n'est moins sûr. Les discussions passionnées qui se sont développées autour des thèses de Kuhn ont engagé de nombreux chercheurs américains sur deux voies essentielles : une « sociologie des sciences » de tonalité positive dont les travaux du sociologue Robert King Merton publiés sous ce titre en 1973 ont été les pionniers mais qui, souvent, perd délibérément de vue la spécificité de la pensée scientifique au bénéfice de la seule analyse des structures institutionnelles de la « communauté », une mise en cause radicale de la Raison à laquelle Paul Feyerabend a donné l'éclat de sa plume sarcastique et qui peut tirer parti d'un parallèle établi entre le « changement de paradigme » et la conversion religieuse.

La tentation d'unifier les sciences a connu une puissante relance ces dernières années du fait de l'expansion de la neurophysiologie. Au physicalisme s'est ainsi substitué un « matérialisme » auquel Herbert Feigl, l'un des premiers membres du Cercle de Vienne à s'être exilé aux États-Unis, avait ouvert la voie. En identifiant les « états mentaux » de la « psychologie ordinaire » (*folk psychology*) à des états cérébraux, l'impulsion initiale était donnée à ce qu'on appelle aujourd'hui le « cognitivisme », et spécialement à l'une de ses variantes les plus actives étiquetée comme « neurophilosophie » par les époux Churchland.

N'assiste-t-on pas à une résurgence, solidement instrumentée et abondamment financée, du programme positiviste ? La même tentation unifiante ne rend-elle pas compte des tentatives faites, par manière de réplique à la première, pour reconstituer une « philosophie de la nature » ? Comme en son temps le romantisme allemand, le romantisme écologiste déploie son discours à partir d'une critique du caractère « inhumain » de la science et de ses applications. Il puise dans les pensées médiévales et hermétistes l'idée d'une « âme de la nature » à laquelle il invite chacun à s'unir. Les pensées orientales lui viennent en renfort.

Du côté de l'épistémologie historique, les structures institutionnelles ont fait que les philosophes de profession s'étaient jusqu'à ces dernières années réservé une sorte de monopole en ces matières. De là un travers « conceptualiste » qui leur a été vivement, et parfois injustement, reproché par les sociologues et par les historiens des sciences formés aux disciplines historiques ; de là aussi un malaise qui n'a cessé de s'approfondir du fait de l'absence de formation

scientifique des philosophes en France. À la différence de Bachelard, ou de Canguilhem encore, qui n'ont pas hésité à entrer dans la discussion des plus brûlantes questions scientifiques de leur temps, ils ont eu prudence, par prudence, à se cantonner dans l'examen d'épisodes reculés de l'histoire des sciences. Ils perdaient ainsi le contact avec la science en train de se faire, au moment même où ils défendaient une conception « récurrente » de l'histoire des sciences, laquelle suppose qu'on soit mêlé à son présent le plus inventif.

Pourtant, sciences physiques et biologiques actuelles nous invitent à redécouvrir le motif philosophique qui anime la pensée scientifique fondamentale. Les recherches portant depuis trente ans sur l'évolution des systèmes en situation de « dépendance sensitive aux conditions initiales » – popularisées sous l'appellation un brin tapageuse de « théorie du chaos » – nous présentent à notre échelle des processus de type « quantique » qui nous invitent à nous défaire de l'interprétation déterministe de procédures de la pensée déterminante. Les interprétations données du scénario du big bang exigent que nous nous repositionons la question de savoir si la notion d'origine a sa place en physique. Ne s'avère-t-elle pas solidaire du présumé philosophique que le physicien pourrait acquérir sur le « tout » de l'univers un regard extérieur, analogue à celui d'un Dieu législateur ? Un regard sans horizon. La notion de « loi de la nature » perd de son évidence. L'étude du développement du système nerveux central avec les instruments de la biologie moléculaire remet en question la notion d'individualité, demande que l'on repense les rapports entre les notions d'évolution et de développement ; en faisant apparaître une plasticité neuronale qui affecte le cerveau adulte, les mêmes recherches amènent à repenser les notions de « inné » et de « acquis », tout en ébranlant les strictes analogies réductionnistes sur lesquelles s'appuient les versions réductionnistes du cognitivisme. Pour anticiper ce qui de l'inconnu est susceptible d'être acquis à la connaissance, la pensée scientifique doit inlassablement prendre le risque d'interroger le réel en fonction d'un possible dont elle sollicite les virtualités par la pensée et l'expérimentation. Et cette ferveur interrogative ne se satisfait d'aucune réponse apportée. La pensée scientifique se présente comme une pensée « déterminante » ; son motif philosophique relève de la pensée « infinitive ».

► BACHELARD G., *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 1928 ; *Étude sur l'évolution d'un problème de physique*, Paris, Vrin, 1928 ; *La valeur inductive de la relativité*, Paris, Vrin, 1929 ; *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne*, Paris, Vrin, 1932 ; *Les intuitions atomistiques*, Paris, Boivin, 1933 ; *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934 ; *La dialectique de la durée*, Paris, PUF, 1936 ; *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1937 ; *La psychanalyse du feu*, Paris, Gallimard, 1938 ; *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1938 ; *La philosophie du non*, Paris, PUF, 1940 ; *Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949 ; *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF,

1951 ; *Le matérialisme rationnel*, Paris, PUF, 1953 ; « La richesse d'inférence de la physique mathématique », *Scientia*, 1928 ; « Noumène et microphysique », *Recherches philosophiques*, I, 1931 (repr. in *Études*, Paris, Vrin, 1970) ; « Le Monde comme caprice et miniature », *Recherches philosophiques*, III, 1933 (repr. in *Études*, op. cit.) ; « Idéalisme discursif », *Recherches philosophiques*, IV, 1934 (repr. in *Études*, op. cit.) ; « Le surrationalisme », *Inquisitions*, n° 1, 1936 (repr. in *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972) ; « Lumière et substance », *Revue de métaphysique et de morale*, 1938 (repr. in *Études*, op. cit.) ; *Univers et réalité*, travaux du II^e Congrès des sociétés de philosophie à Lyon, 1939 (repr. in *L'engagement rationaliste*, op. cit.) ; *Discours du Congrès International de Philosophie des Sciences*, Paris, Hermann, 1949 (repr. in *L'engagement rationaliste*, op. cit.) ; « L'idonisme et l'exactitude discursive », *Études de philosophie des sciences*, Neuchâtel, Le Griffon, 1950 (repr. in *L'engagement rationaliste*, op. cit.) ; *L'actualité de l'histoire des sciences*, Paris, Éd. du Palais de la Découverte, oct. 1951 (repr. in *L'engagement rationaliste*, op. cit.) ; BRENNER A., *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, Paris, PUF, 2003 ; BRUNSCHWIG L., *De la vraie et fausse conversion. Philosophie de la matière*, Paris, PUF, 1950 ; *Écrits philosophiques* : I. *L'humanisme de l'Occident*, Paris, PUF, 1951 ; *Écrits philosophiques* : II. *L'orientation du rationalisme*, Paris, PUF, 1954 ; *Écrits philosophiques* : III. *Science, Religion*, Paris, PUF, 1958 ; CANGUILHEM G., *Études d'histoire et de philosophie des sciences* (1968), Paris, Vrin, 1994 ; COMTE A., *Œuvres*, Paris, Anthropos, 12 vol., 1968-1970 ; DUHEM P., *L'évolution de la mécanique* (1903), rééd., Paris, Vrin, 1992 ; *La théorie physique, son objet, sa structure* (1906), rééd. Paris, Vrin, 1989 ; *Études sur Léonard de Vinci : ceux qu'il a lus, ceux qui l'ont lu*, 3 vol., 1906, 1909, 1913 (rééd., Paris, Archives contemporaines, 1984) ; *Sozein ta phainomena. Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée* (1908) ; rééd. Paris, Vrin, 1990 ; *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, Paris, Hermann, 10 vol., 1913-1959 ; GONSETH F., l'ensemble de son œuvre, Paris, Blanchard, 1926-1974 ; KOYRÉ A., *Du monde clos à l'univers infini*, John Hopkins Univ. Press, 1957 (trad. fr. Paris, PUF, 1962) ; KUHN T., *The copernic revolution*, Cambridge, Harvard Univ. Press, 1957 (trad. fr., A. Hayli, *La révolution copernicienne*, Paris, Fayard, 1973) ; *The structure of scientific revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962 (trad. fr., *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1970 ; nouv. éd. 1983, avec J.L. Hebron, P.L. Forman & Lini Allen) ; *The essential tension selected studies in scientific tradition and change*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1977 (trad. fr. M. Biezunski, P. Jacob, A. Lyotard-May & G. Voyat, *La tension essentielle. Tradition et changement dans les sciences*, Paris, Flammarion, 1977 et Gallimard, 1990) ; LAKATOS I., *The methodology of scientific research programmes (Philosophical Papers, vol. I)*, chap. 1, 2 et 4, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1986 ; LATOUR D., *La science en action* (1989), Paris, Gallimard, 1995 ; LECOURT D., *L'épistémologie historique de Gaston Bachelard* (1969), rééd., Paris, Vrin, 1974 ; *Bachelard. Épistémologie, textes choisis* (1971), rééd., Paris, PUF, 1996 ; *Pour une critique de l'épistémologie*, Paris, Maspero, 1972 ; *La philosophie des sciences*, 2001, 3^e rééd., Paris, PUF/Que sais-je ? 2005 ; *Les philosophes et la science*, sous la direction de P. Wagner, Paris, Gallimard, 2002 ; PESTRE D., « Quelques commentaires sur les témoignages oraux », in *Cahier pour l'histoire du CNRS*, Éd. CNRS, vol. 2, 1989 ; PLANCK M., « Signification et limites de la science » (1941), *Autobiographie scientifique*, trad. fr. A. George, Paris, Flammarion, 1960 ; POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902 ; *La valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905 ; *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 1909 ; *Dernières*

pensées. Paris, Flammarion, 1913; *Œuvres de Henri Poincaré*. Paris, Ed. G. Darboux, 11 vol., 1916-1954. — POLANYI M., *Personal Knowledge* (1958, éd. révisée, 1962), Chicago, Univ. of Chicago Press, 1974. — POPPER K., *Misère de l'historicisme*, Paris, Plon, 1956 (rééd., Press Pocket, 1988); c'est sous forme d'article que paraît en 1944 et 1945 « The poverty of historicism », *Economica* 11, n° 42-43 et 12, n° 46 (1^{re} éd. angl., 1957, Londres, Routledge & Kegan Paul); *La logique de la découverte scientifique* (1934), Paris, Payot, 1973; *La connaissance objective* (1972), Bruxelles, Complexe, 1978; *La société ouverte et ses ennemis*, vol. I: *L'ascendant de Platon*, vol. II: *Hegel et Marx* (1945), Paris, Le Seuil, 1979 (en 1966 Popper augmentera la 5^e éd.); *La quête inachevée, autobiographie intellectuelle* (1974), Paris, Calmann-Lévy, 1981 (rééd., Presse Pocket, 1989); *L'univers irrésolu, plaidoyer pour l'indéterminisme* (1982), Paris, Hermann, 1984; *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique* (1963), Paris, Payot, 1985; *Le réalisme et la science. Post-scriptum à La Logique de la découverte scientifique, I* (1983), Paris, Hermann, 1990; *Un univers de propensions: deux études sur la causalité et l'évolution* (1990), Paris, L'Éclat, 1992; *La théorie quantique et le schisme en physique. Post-scriptum à La Logique de la découverte scientifique, III* (1962), Paris, Hermann, 1996. — POPPER K., ADORNO T. W., DAHRENDORF W., HABERMAS J., ALBERT H. & PILOT H., *De Vienne à Francfort la querelle allemande des sciences sociales* (1969), Bruxelles, Complexe, 1979. — WEBER M., *Essais sur la théorie de la science*, rééd. Paris, Plon, 1965. — WITTGENSTEIN L., *Investigations philosophiques* (1951), rééd., Paris, Gallimard, 1986; *Tractatus logico-philosophicus*, rééd. Paris, Gallimard, 1986. — Coll.: *Manifeste du cercle de Vienne et autres écrits*, A. Soulez, Paris, PUF, 1985.

Dominique LECOURT

→ Bachelard; Cercle de Vienne; Complexité; Continuité; Évidence; Fait; Feyerabend; Idonéisme; Instrument; Invention; Koyré; Kuhn; Maîtrise de l'erreur; Modèle; Objectivité; Paradigme; Piaget; Réalisme; Réductionnisme; Référentiel; Réfutabilité; Reproductibilité; Révolution scientifique; Rupture; Système; Théorie; Validation; Van Fraassen.

ÉQUATION

Les équations sont omniprésentes dans l'activité mathématique. Le terme n'ayant pas de définition formelle, il faut recourir à l'usage pour en repérer le sens. Si nous considérons les quatre expressions suivantes : (1) « l'équation d'une courbe »; (2) « résoudre une équation du second degré »; (3) « l'équation d'état d'un gaz est la relation qui lie sa densité, sa température et sa pression »; (4) « la fonction y vérifie l'équation aux dérivées partielles... », nous ne trouvons de commun entre elles que la présence d'une égalité. Cependant cette simple constatation nous donne une indication en vue de l'étude historique : il faudra se demander entre quels types d'objets il y a égalité. Dans (1) et (2) il s'agit de nombres, et la classe des nombres admissibles variera selon le contexte ; dans (3) il s'agit d'une fonction de grandeurs physiques. L'égalité entre fonctions affirmée dans (4) changera de sens à mesure que le concept de fonction s'affinera, passant de l'égalité entre les valeurs prises à celle des fonctions en tant qu'objets en soi.

Dans les exemples (2) et (4) l'équation apparaît comme un problème : les deux membres de l'égalité dépendent d'une variable (au sens logique du mot, dans (4) cette variable est une fonction) et il s'agit de chercher les solutions, valeurs de la variable pour lesquelles l'égalité a effectivement lieu. Ce sens plus restreint est le plus courant et c'est en nous y limitant que nous nous efforcerons de suivre le développement historique. D'ailleurs, dans les textes les plus anciens dont nous disposons, ce que nous pouvons identifier aujourd'hui comme équation est en général présenté comme problème.

À la question déjà posée de la nature de l'égalité, il faudra ajouter celle de la nature des objets admissibles comme solutions. Le sens du mot « résoudre » aura lui-même besoin d'être éclairci. La distinction la plus évidente se pose entre résolution exacte et résolution approchée. Nous verrons que le concept de résolution exacte lui-même a connu de nombreuses variations historiques. L'étude des propriétés des solutions prend à certains moments une aussi grande importance que la résolution, soit du point de vue mathématique, soit pour améliorer la connaissance d'une d'application.

La résolution d'équations remonte à la plus haute Antiquité comme en témoignent des tablettes sumériennes et babyloniennes. Les anciens mathématiciens indiens résolvaient aussi des équations.

Les équations chez les mathématiciens arabes et chinois

C'est dans le *Livre concis du calcul de la « jabr »* et la « *muqā-bala* » d'al-Khwarizmi (début du IX^e s.) que nous trouvons le premier exposé d'une théorie des équations, à savoir des équations du premier et du second degré. Il est indiqué dès le départ que les solutions seront des nombres (sous-entendu positifs) et les solutions se font par les opérations arithmétiques et l'extraction de la racine carrée. On sait que c'est du titre de ce livre qu'on a tiré le mot « algèbre » ; le mot *jabr* désigne dans la langue usuelle la réduction d'une fracture et il est difficile de donner un équivalent français pour *muqā-bala* (rencontre, ou mise face à face). Il y a lieu de noter que ces deux termes techniques désignent les opérations qui permettent de ramener les équations à des formes canoniques pour chacune desquelles est donné alors l'algorithme de résolution. La validité de cet algorithme est démontrée par la géométrie qui apporte une méthode de preuve incontestée. Elle comporte la désignation de points et de segments par des lettres, alors que tout symbole spécial est absent de la partie algébrique des textes arabes. La théorie exposée, al-Khwarizmi explique comment y ramener toute une série de problèmes concrets, tant géométriques qu'arithmétiques.

Il faut attendre al-Khayyām (1048-1123) pour que soit exposé le projet d'une théorie analogue pour les équations de degré au plus trois. Cependant aucune résolution par radicaux n'apparaît ici ; il fallait recourir à la géométrie, c'est-à-dire aux intersections de coniques, procédé déjà employé par les Grecs dans un

cadre purement géométrique et pour des cas particuliers. C'est al-Ṭūsī qui donnera le premier vers 1180, pour toutes les équations du troisième degré, la construction des solutions par intersection de coniques, la démonstration de leur existence ou non et leur calcul. Mais il s'agit cette fois d'un calcul approché du type de ce qu'on appelle maintenant la méthode de Newton. Entre-temps était apparu, à défaut d'un symbolisme algébrique proprement dit, l'usage de tableaux rectangulaires qui permettaient la description et la mise en œuvre d'algorithmes beaucoup plus raffinés qu'avant.

Ce type de méthodes d'approximation était apparu chez les mathématiciens chinois au XI^e s., sans qu'on sache s'il a pu y avoir transmission. Un retour en arrière s'impose ici. Les *Neuf Chapitres des procédures mathématiques*, ouvrage anonyme du I^{er} s. de notre ère, sont un recueil de problèmes. Pour chacun, l'énoncé est suivi de la solution puis de la procédure employée, sans justification. Les problèmes résolus par équations sont concrets, mais en général sans aucune utilité pratique. Exemple : « Plusieurs personnes font un achat en commun. Si chacun paie 8, il y a un surplus de 3. Si chacun paie 7, il y a un déficit de 4. Quels sont, respectivement, le nombre de personnes impliquées et le prix de la chose achetée ? » Les procédures sont générales, mais décrites chaque fois dans les termes concrets du problème. Dès le III^e s., un commentateur (Liu Hui) inclura des justifications des procédures.

Les chapitres VII et VIII résolvent ainsi systématiquement des systèmes linéaires à deux et trois inconnues (à coefficients fractionnaires). Le chapitre IX contient des cas d'équations du second degré. Une grande partie de la littérature mathématique chinoise postérieure consiste en commentaires de ce classique.

Dans les *Neuf Chapitres des procédures mathématiques*, déjà, il est expliqué comment les calculs sont faits dans des tableaux rectangulaires. Cependant, la pratique du calcul dans ces tableaux est très différente de celle qui apparaît beaucoup plus tard chez les Arabes. Ces derniers inscrivaient les nombres à l'encre, quitte à faire plusieurs tableaux si nécessaire. Les Chinois, eux, calculaient avec des bâtonnets, de sorte qu'ils remplaçaient à certaines étapes du calcul le contenu d'une case par un autre. On peut comparer le procédé à l'usage des variables en informatique : celles-ci sont aussi repérées par l'adresse d'une mémoire dont le contenu (la valeur de la variable) peut changer au cours du calcul.

Dans les *Neuf Chapitres des procédures mathématiques* les systèmes linéaires sont résolus par une variante de la méthode d'élimination dite de Gauss. Les données des problèmes et leurs solutions sont des grands positifs, du moins dans un premier temps. Mais, avec certaines valeurs numériques, l'algorithme conduit à introduire des coefficients soustractifs ou négatifs (on emploiera l'un ou l'autre terme selon qu'on en a une interprétation minimaliste ou maximaliste). L'auteur est conscient qu'il y a là une difficulté comme le montre la progression selon laquelle il

introduit les problèmes, en commençant par ceux dont l'énoncé ne comporte pas de terme soustractif. Les commentateurs n'ont pas manqué d'y revenir. Nous trouvons là une autre différence avec les algébristes arabes. Les équations du second degré sont traitées par ceux-ci de telle façon que l'apparition de ce que nous appellerions un nombre négatif montre que le problème n'a pas de solution. L'apparition de coefficients soustractifs dans les mathématiques chinoises est le premier exemple que nous rencontrons d'un schéma fréquent dans l'histoire des mathématiques : la résolution d'un certain type de problème met en jeu des objets mathématiques nouveaux, dépourvus d'une légitimité théorique qu'ils n'acquerront que plus tard.

Ces quelques indications mettent en évidence deux difficultés particulièrement redoutables auxquelles se heurte l'histoire conceptuelle des mathématiques chinoises : l'exposé par problèmes « concrets » et le développement par commentaires successifs du classique. Il y a tout lieu de penser que ces caractéristiques ne peuvent être comprises qu'en tenant compte du contexte culturel.

De la Renaissance à la théorie de Galois

Passons à la renaissance des mathématiques en Europe. Nous savons très mal quelle partie de l'algèbre arabe a été connue des mathématiciens européens. Deux points retiendront notre attention : la mise au point du symbolisme algébrique et la résolution par radicaux des équations du troisième et du quatrième degré.

La *doxa*, grande amatrice de simplifications et de culte de la personnalité, attribue le premier à Viète ; la réalité est incomparablement plus complexe. Il y a lieu de distinguer trois classes de symboles : le signe d'égalité, les signes d'opérations et l'usage de lettres pour désigner les quantités. On observe du XV^e au XVII^e s., sur tous ces points, des avancées et des reculs dont nous allons donner une idée sommaire. De plus il semble bien que des notations efficaces soient souvent apparues d'abord dans des documents à usage personnel, des notes marginales et des lettres. Des abréviations apparaissent chez des mathématiciens arabes du XV^e s. pour l'inconnue, son carré et son cube, la soustraction et l'égalité. D'ailleurs Léonard de Pise (~ 1170-apr. 1240) utilise déjà quelques abréviations en particulier pour la racine carrée, Oresme (~ 1320-1382) un système sophistiqué de notation des fractions et des racines qui n'a pas survécu. On trouve dans des lettres de Regiomontanus (1436-1476) des calculs utilisant le signe -, le même symbole que Léonard de Pise pour la racine carrée (mais dans le même calcul *radix quadrata* en toutes lettres), la barre de fraction pour des rapports de polynômes, des symboles spéciaux pour l'inconnue et son carré. Luca Pacioli reprend une partie de ces notations dans une note marginale de sa *Summa de arithmetica, geometria, proportioni et proportionalita* (1494). Il utilise aussi un symbole pour l'égalité (un trait), qui sera repris par

d'autres auteurs. La nouveauté la plus importante est l'introduction d'un symbole spécial pour une inconnue secondaire intervenant dans la résolution du problème. En 1585, Stevin introduit une notation systématique pour les puissances (l'exposant dans un rond), mais celles de l'inconnue uniquement. L'étape décisive franchie par Viète est d'introduire systématiquement des lettres pour toutes les quantités qui interviennent, qu'elles soient connues ou inconnues. Pour le reste, ses notations ne sont pas plus perfectionnées que celles des algébristes italiens antérieurs. Elles seraient plutôt plus lourdes, lourdeur qui est d'ailleurs en partie le prix à payer pour le progrès accompli puisqu'on ne dispose pas de symbole pour les puissances autres que celles de l'inconnue et que celle-ci n'a plus de notation privilégiée. Il faudra attendre la *Géométrie* de Descartes (1637) pour voir apparaître et utiliser systématiquement l'exposant pour noter les puissances, du moins entières, de toute quantité. Encore écrit-il toujours aa et xx pour les carrés et \sqrt{C} pour la racine cubique, pour laquelle Bombelli utilisait vers 1560 un symbole faisant apparaître le nombre 3. Mais le plus important est la transformation des symboles de simples abréviations en un instrument efficace de calcul. L'histoire semble bien avoir pris des siècles, elle nous échappe encore largement.

La formule de résolution par radicaux des équations du troisième degré est due à Scipione del Ferro (1465-1526), auteur dont aucun écrit ne nous est parvenu. On la trouve dans l'*Ars magna* de Cardan (1545), ainsi qu'une résolution d'équation du quatrième degré due à Ferrari. Bombelli, dans son *Algèbre* (1557-1560) donne un exposé systématique de ces résolutions. La résolution des équations du troisième degré a fait apparaître un problème nouveau. Elle consiste à décomposer l'inconnue en somme (ou différence, selon les variantes) de deux inconnues auxiliaires dont les cubes vérifient une équation du second degré. Si l'équation proposée a une seule racine réelle, la méthode fonctionne sans difficulté, sinon sans complication. Mais si elle en a trois, l'équation auxiliaire du second degré n'a pas de racine réelle. On s'est assez rapidement aperçu que si on calculait formellement avec ces solutions inexistantes comme si elles existaient on obtenait en fin de compte une solution de l'équation proposée. C'est l'apparition des nombres imaginaires dont on allait se servir encore souvent, avant d'en faire une théorie au début du XIX^e s.

Ces formules sont sans intérêt pratique, les résolutions approchées étant plus efficaces. Cependant elles ouvraient la voie à des développements de la plus haute importance. Le problème se posait de lui-même de trouver des formules du même type pour les équations de degré supérieur. Rétrospectivement, il nous apparaît comme évident que dans un premier temps cette recherche ne pouvait aboutir qu'à une impasse puisque de telles formules n'existent pas. Il fallait donc d'abord que suffisamment de tentatives infructueuses fassent naître l'idée que le problème pouvait être insoluble. Pour que cela soit démontré, il fallait des concepts

nouveaux. Il fallait aussi des outils techniques adéquats faute desquels les concepts eussent été inopérants. Et en mathématique les concepts ne naissent que quand les chercheurs sont en état de les mettre en œuvre.

Après un certain nombre de ces tentatives infructueuses, trois mémoires paraissent en 1770-1771. Dus à Waring, Van der Monde et Lagrange ils relèvent d'un point de vue nouveau. Au lieu de chercher de nouvelles méthodes de résolution, ils s'efforcent de comprendre pourquoi les méthodes connues réussissent dans le cas des équations de degré quatre au plus. Le travail de Lagrange est le plus complet. Avant d'en donner une idée sommaire, il est utile de décrire les acquis progressivement accumulés depuis le XVII^e s. dont ces auteurs disposaient. Le concept de fonction est apparu explicitement. Les polémiques qu'il suscite n'ont pas de conséquence dans le domaine algébrique. L'utilisation du symbolisme algébrique est désormais bien rodée. On sait qu'une équation algébrique a un nombre de racines, éventuellement imaginaires, égal à son degré. Même si un flou persiste quant à la nature de ces solutions imaginaires, on n'hésite pas à les faire intervenir dans les calculs. En particulier, on connaît les relations entre coefficients et racines, on sait que toute fonction des coefficients est une fonction des racines invariante par les permutations de celles-ci, et on est même persuadé qu'une telle fonction des racines, si elle est rationnelle, peut toujours s'exprimer rationnellement en fonction des coefficients. Ce point est essentiel et Lagrange le démontre rigoureusement dans le mémoire qui nous intéresse. On dispose de la division des polynômes, qu'il applique avec beaucoup de maîtrise à l'élimination d'une inconnue entre deux équations.

Il remarque que si une fonction des racines d'une équation de degré m peut prendre, par permutation des racines, n valeurs distinctes, elle vérifie une équation de degré n . À titre d'exemple, soient a, b, c, d , les racines d'une équation du quatrième degré. L'expression $ab + cd$ prend par permutation des racines les deux autres valeurs $ac + bd$ et $ad + bc$, elle vérifie donc une équation du troisième degré seulement. Sachant résoudre une telle équation, on peut calculer $ab + cd$. Deux résolutions d'équations du second degré permettent d'en déduire les solutions de l'équation proposée. Sur la base de telles idées, il donne une analyse très précise des méthodes disponibles pour résoudre les équations du troisième et quatrième degré. Il en résulte que les méthodes connues sont vouées à l'échec pour le cinquième et au-delà, et leurs éventuelles variantes très probablement aussi. Une dernière partie, la plus novatrice, reprend la question d'un point de vue plus général. Le résultat le plus important est le suivant. Soient t et y deux fonctions des racines de l'équation, rationnelles (égales au rapport de deux polynômes). Supposons que les permutations des racines qui laissent invariante y laissent aussi invariante t et que par celles qui laissent invariante t , y puisse prendre s valeurs distinctes. Alors y vérifie une

équation de degré s dont les coefficients s'expriment rationnellement à l'aide de t et des coefficients de l'équation proposée. On peut vérifier ainsi, en revenant à l'exemple ci-dessus, que $a + b$, qui peut prendre par permutation six valeurs distinctes, se calcule à partir de $ab + cd$ par résolution d'une équation du second degré (l'autre solution est naturellement $c + d$). Lagrange exprime sa conviction que ces considérations renferment la « vraie métaphysique » de la résolution des équations algébriques. Il déclare aussi ne pas pouvoir se prononcer sur la possibilité du problème.

Nous passerons sur les contributions de Ruffini et Abel pour nous arrêter sur l'œuvre de Galois qui donne une réponse définitive à la question. Du moins la donnera-t-elle quand d'autres mathématiciens l'auront comprise, Liouville le premier, sans doute au début des années 1840. La biographie d'Évariste Galois est aussi célèbre dans ses grandes lignes que mal connue dans les détails. Citons Liouville, dans l'avertissement qu'il a mis en tête de la publication des œuvres de Galois : « Le géomètre ingénieux et profond, dont nous donnons ici les œuvres, est mort ayant vingt ans à peine ; et encore a-t-il dépensé stérilement, dans les agitations de la politique, au milieu des clubs ou sous les verrous de Sainte-Pélagie, la plus grande partie des deux dernières années d'une vie si courte » (« Œuvres mathématiques d'Évariste Galois », *J. Math. Pures et Appl.*, XI, 1846, p. 381). L'appréciation sur la politique peut surprendre de la part d'un républicain futur député, mais ce qui nous importe ici c'est l'interférence entre les données biographiques et l'analyse technique de l'œuvre, sachant qu'un manuscrit au moins est perdu et que sur le plus complet de ceux qui nous restent, des lacunes dans les démonstrations sont signalées par des notes qui semblent bien avoir été écrites dans la nuit précédant le duel où l'auteur savait qu'il trouverait la mort.

Ce mémoire occupe seize petites pages du *Journal de mathématiques pures et appliquées* et commence par presque deux pages de définitions qui sont en fait des explications. Lues rétrospectivement, elles éclairent les deux points qui font le progrès essentiel par rapport à l'analyse de Lagrange. D'abord le sens du mot rationnel ou de l'expression « rationnellement connu ». Il désigne désormais, outre les nombres rationnels eux-mêmes, toute fonction rationnelle des coefficients s'ils sont littéraux et éventuellement de quantités dites adjoinctes à l'équation. Cette opération d'adjoinction est dans le langage d'aujourd'hui une extension de corps. Le deuxième point est la distinction entre permutations et substitutions. Dans le langage de l'époque, une permutation de lettres (ici celles qui désignent les racines de l'équation), ce sont les mêmes lettres écrites dans un ordre différent ; la substitution est l'opération qui fait passer d'une permutation à une autre. On a vu que les permutations jouaient un rôle clef dans l'analyse de Lagrange ; Galois insiste sur le fait que seules les substitutions importent. C'est là que le mot « groupe » apparaît pour la première fois dans son sens mathématique : « Comme il s'agit

toujours de questions où la disposition primitive des lettres n'influe en rien dans les groupes que nous considérerons, on devra avoir les mêmes substitutions, quelle que soit la permutation d'où l'on sera parti. Donc, si dans un pareil groupe on a les substitutions S et T , on est sûr d'avoir la substitution ST » (*ibid.*, p. 419). Dans un autre manuscrit, inachevé, Galois définit les classes à gauche et à droite modulo un sous-groupe et dégage la notion de sous-groupe invariant (pour employer le vocabulaire de notre époque). Pour revenir au manuscrit le plus complet, il y démontre que les fonctions rationnellement connues sont celles qui sont invariantes par un certain groupe, appelé groupe de l'équation, puis il indique comment une adjoinction diminue ce groupe. La possibilité d'une résolution de l'équation par radicaux est ainsi complètement dégagee de tout procédé particulier. En effet, une formule de résolution par radicaux consiste en une suite de calculs de fonctions rationnelles et d'extractions de racines. Ces dernières définissent des adjoinctions d'un type spécial et on peut voir comment elles diminuent le groupe de l'équation. Galois peut alors s'appuyer sur des résultats de Gauss et de Cauchy pour caractériser les groupes des équations résolubles par radicaux. Il conclut à l'impossibilité de cette résolution pour toute équation générale de degré au moins cinq.

Mais il a fait plus puisqu'il a donné des conditions générales de résolubilité. Ses travaux trouveront naturellement de nombreuses applications. Il peut être utile de mettre ici un avertissement à un lecteur hypothétique qui, ayant appris la théorie de Galois, déciderait de lire les œuvres de son auteur : il fait agir les groupes sur les permutations des racines, pas sur les corps de décomposition. L'œuvre de Galois est un élément important de ce grand chantier conceptuel que sont les mathématiques autour de 1830, mais la mise en ordre des structures n'interviendra que bien plus tard.

Équations différentielles et aux dérivées partielles

Dès les années 1630, Fermat et Florimond de Beaune avaient posé, au moins dans des cas particuliers, le problème inverse des tangentes : trouver les courbes dont les tangentes ont une propriété donnée. Mais c'est avec la constitution du calcul infinitésimal que le problème est algébrisé et posé sous sa forme générale. Le calcul intégral apparaît d'emblée comme la recherche des fonctions dont les différentielles vérifient une relation donnée ; la recherche des primitives n'en est que le cas particulier le plus simple. Newton pense en donner la solution générale en montrant comment trouver le développement en série de puissances de la variable indépendante des solutions d'une équation différentielle. La méthode s'applique à toute équation analytique. Mais, outre qu'il ne se préoccupe pas de la convergence des séries obtenues, la lourdeur des calculs est rédhibitoire dans la plupart des cas, et il est très rare qu'on arrive ainsi à identifier les fonctions trouvées. Une fois de plus la question se pose du sens du mot « résoudre ». Leibniz le précise à propos des

quadratures : « Mais comme je m'aperçois que beaucoup n'ont pas bien saisi ce qu'on cherchait réellement, précisons qu'on peut considérer quatre Quadratures, c'est-à-dire quatre manières de convertir un cercle en un carré égal, ou en une autre figure rectiligne dépendant du rapport entre le cercle et le carré construit sur le diamètre : par le calcul, par un tracé de lignes, et dans les deux cas soit rigoureusement soit de manière approchée. J'appelle *Analytique* la Quadrature résultant d'un calcul rigoureux, *Géométrique* celle résultant d'une construction rigoureuse ; le calcul approché fournit une *Approximation*, une construction approchée un *Mécanisme* » (« De vera proportione circuli... », *Acta Eruditorum* II 82 et *Mathematische Schriften* V 118-122). En ce qui concerne les équations différentielles, entre la résolution explicite (la solution analytique de Leibniz) et la solution approchée, s'introduit la réduction aux quadratures, expression des solutions sous forme d'intégrales. Cette distinction peut apparaître comme artificielle, puisque le calcul des intégrales ne peut alors s'effectuer que de façon approchée. Mais il ne faut pas oublier que si des méthodes générales et efficaces de calcul approché des intégrales ont été développées dès les premières décennies du calcul infinitésimal, les progrès des méthodes de calcul approché des solutions d'équations et de systèmes différentiels ont été beaucoup plus lents. Une grande partie de ces équations venant des applications et nécessitant des réponses numériques, on saisit l'importance de la distinction.

Au cours du XVIII^e s., la conviction s'est forgée chez les mathématiciens que la solution d'un système de n équations du premier ordre existait, qu'en général on ne pouvait pas l'expliquer et qu'elle dépendait de n paramètres, qu'elle était déterminée par sa valeur pour une valeur donnée de la variable indépendante. Il a fallu attendre Cauchy pour disposer d'une démonstration de ces points, plus exactement deux démonstrations. La première, longtemps perdue, consistait à démontrer la convergence de la méthode d'approximation dite d'Euler, encore qu'elle ait été employée avant lui. Étant donnée l'équation $y' = f(x, y)$ et la condition $y(x_0) = y_0$, elle consiste à approcher $y(x_0 + nh)$ par y_n défini de proche en proche par $y_{n+1} = y_n + hf(x_0 + nh, y_n)$. Cauchy fait tendre h vers 0. Dans la deuxième méthode, il démontre la convergence du développement en série entière de la solution. Les mathématiciens de l'époque ne semblent pas avoir accordé une grande attention à ces démonstrations qui ne sont passées dans l'enseignement qu'à la fin du siècle. Cependant, dans la deuxième moitié du siècle, les équations différentielles en variable complexe se constituent en un domaine autonome. À la même époque on reconnaît l'importance, tant en variable réelle qu'en variable complexe, des groupes d'invariance des équations.

L'étude qualitative des solutions, outre son intérêt intrinsèque, est souvent décisive pour les applications. Dès 1734, Clairaut s'était intéressé aux points où une équation de la forme $f(x, y, y') = 0$ ne peut pas être

résolue par rapport à y' . Ces points forment dans le cas général une courbe qui peut être le graphe d'une solution particulière, dite singulière, enveloppe de la famille constituée par les autres solutions. Elle peut aussi être formée de points de rebroussement des solutions. Mais c'est à Poincaré que revient le mérite d'avoir entrepris le premier une étude du comportement qualitatif global des solutions des systèmes différentiels. Ce problème est actuellement l'objet d'un effort de recherche intense.

L'histoire des équations aux dérivées partielles est encore à écrire. Il est vrai que l'entreprise présente des difficultés considérables dont la moindre n'est pas la multiplicité des délimitations à effectuer, du côté de la physique, mais aussi de la géométrie, de la théorie du potentiel, de celle des fonctions de variables complexes... Le cas des équations du premier ordre est à mettre à part. Sophus Lie, travaillant surtout dans le cadre géométrique, en a donné une solution générale au début des années 1870. À partir de l'équation $f(x_i, u, p_i) = 0$ où p_i désigne la dérivée partielle de u par rapport à x_i , on forme un système différentiel dans l'espace des (x_i, u, p_i) avec une variable indépendante auxiliaire ; ses trajectoires sont appelées caractéristiques. Une fonction u est alors solution si la variété engendrée par $u(x_i, u, \partial u/\partial x_i)$ lorsque x varie est aussi engendrée par des caractéristiques. Cette construction avait été trouvée par Lagrange dans des cas particuliers, progressivement étendus par la suite. Elle met en évidence des variétés engendrées par les caractéristiques qui ne sont pas des graphes de fonctions dérivables. On les a appelées solutions au sens de Lie.

L'étude des équations aux dérivées partielles du second ordre s'est faite jusqu'à la fin du XIX^e s. à partir de problèmes posés par la physique. En mettant de côté celle de Schrödinger, qui est un hapax, ces équations venant de la physique se classent en trois types. Les équations d'évolution fondamentales (équations d'Einstein, de Maxwell et de Dirac principalement) sont de type hyperbolique. On peut les caractériser par le fait que si la solution, et sa dérivée par rapport au temps, s'annulent à un instant en dehors d'un ensemble borné, il en sera de même à tout autre instant. C'est le phénomène de propagation à vitesse finie. Les équations de diffusion, dont l'exemple le plus important est le premier historiquement est celui de la chaleur, sont du type parabolique. La propagation est ici instantanée. Dans l'équation, la dérivée seconde par rapport au temps ne figure pas (mais ce n'est pas suffisant comme le montre l'exemple de l'équation de Schrödinger). Les équations elliptiques sont celles qui vérifient les solutions indépendantes du temps, tant dans le cas hyperbolique que dans le cas parabolique.

Une théorie générale des équations aux dérivées partielles n'a été envisagée que très tard. Cauchy a démontré en 1842 l'existence et l'unicité pour le problème aux données initiales (qui porte maintenant son nom) analytique. Mais c'est seulement quand Sofie Kowalewski le redémontre en 1875 que ce résultat attire l'attention de quelque autre mathématicien. Au

tourant du XX^e s., on démontre que les solutions des équations elliptiques et paraboliques possèdent un très haut degré de régularité, les premières sont toujours analytiques. Il n'en va nullement de même des équations hyperboliques pour lesquelles, même dans des situations simples, apparaissent des singularités telles qu'on ne peut plus légitimement parler de solutions au sens classique du terme. Nous avons d'ailleurs vu qu'il en était ainsi pour les équations du premier ordre. Il a donc fallu définir des objets nouveaux, généralisant les fonctions. Ces objets sont les distributions, définies à cet effet en 1935 par Sobolev. Il a encore fallu attendre douze ans pour que la synthèse de Laurent Schwartz, qui ne connaissait d'ailleurs pas ce travail de Sobolev, les fasse sortir de ce cadre limité pour en faire un objet fondamental de l'analyse.

► GALOIS E., *Œuvres mathématiques publiées en 1846 dans le Journal de Liouville*, Paris, Gabay, 1989. — RASHED R., *Entre Arithmétique et Algèbres : Recherches sur l'Histoire des Mathématiques arabes*, Paris, Les Belles Lettres, 1984. — VAN DER WAERDEN B.L., *A History of Algebra from Al-Khwarizmi to Emmy Noether*, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, Springer, 1985.

Martin ZERNER

→ Analyse complexe ; Analyse diophantienne ; Analyse non standard ; Cardan ; Extension ; Géométries ; Groupes et symétrie ; Local et global ; Propagation ; Transformation géométrique.

ÉQUIVALENCE (Principe d')

Newton, déjà, avait perçu ce qu'a de remarquable le fait qu'une masse inertielle m_0 , telle que la définit la deuxième loi du mouvement $F = m_0 a$, et son poids W sont proportionnels l'un à l'autre. Il vérifia cette proportionnalité de diverses façons, avec une précision de un millième (10^{-3}). Si l'on définit la masse gravitationnelle d'un corps au moyen de la loi newtonienne de l'attraction gravitationnelle, $F_g = (M_1 g M_2 g) / (r_{12})^2$, la remarque de Newton signifie que la masse gravitationnelle et la masse inertielle sont numériquement égales (avec le même système d'unités) ; cette égalité est aujourd'hui vérifiée avec une précision de 10^{-12} . De cette égalité découle que tous les corps lâchés dans le champ de gravitation tombent avec la même accélération en chaque point du champ, indépendamment de leurs masses — procurant ainsi un étayage théorique aux observations effectuées par Galilée. Newton avait fait remarquer que les mouvements relatifs d'un ensemble de corps soumis à la même accélération sont identiques à ceux qu'ils auraient en l'absence de cette accélération commune (*Principia*, Corollaire VI des Loix du Mouvement). La combinaison de ces deux résultats fait apparaître que c'est l'égalité de la masse gravitationnelle et de la masse inertielle qui explique qu'il ne soit pas nécessaire, lors de la résolution des problèmes mécaniques à la surface de la Terre, de tenir compte de l'attraction qu'exerce le Soleil sur la Terre — résultat

dont l'importance pratique en ce qui concerne l'applicabilité de la mécanique newtonienne ne saurait être surestimée. Mais un examen un peu plus attentif de ce résultat fait apparaître qu'il introduit un sérieux problème dans la distinction, pourtant essentielle en dynamique newtonienne, entre systèmes de référence (ou référentiels) inertiels et non inertiels. Newton, après avoir dans un premier temps introduit un espace et un temps absolus en vue de donner un sens à ses lois du mouvement, s'aperçut que ces lois ne permettaient pas d'établir une distinction entre mouvement par rapport à l'espace absolu (mouvement absolu) et mouvement par rapport à n'importe quel référentiel rigide animé d'un mouvement de translation uniforme par rapport à l'espace absolu (mouvement relatif) (*Principia*, Corollaire V des Loix du Mouvement). Il résolut la difficulté en postulant que l'espace absolu coïncide avec le référentiel dans lequel le centre de masse du système solaire (qu'il appelle le « Système du Monde ») est au repos. Lorsque fut appréciée à sa juste valeur la relative insignifiance du système solaire au sein du cosmos, le caractère arbitraire de la solution adoptée par Newton apparut clairement ; on comprit alors qu'il valait mieux accepter l'idée que la dynamique de Newton ne singularise pas un référentiel absolu, mais bien toute une classe de référentiels non accélérés, où s'applique la première loi du mouvement (loi d'inertie, selon laquelle un corps qui n'est soumis à aucune force extérieure se déplace en ligne droite à vitesse constante). Ces référentiels portent le nom de « référentiels inertiels ». Dans un référentiel non inertielle, en accélération, la deuxième loi de Newton ne s'applique pas, du moins dans sa formulation originale : il faut introduire, en plus des forces extérieures, des forces fictives, dites inertielle (il serait plus exact de les qualifier de « non inertielle ») destinées à compenser l'accélération du référentiel. Or, de ce qui a été dit plus haut, il résulte que, dans un champ uniforme de gravitation, la deuxième loi de Newton doit s'appliquer dans sa formulation originale dans un référentiel dont l'accélération (par rapport à l'ensemble des référentiels inertiels) serait la même que celle produite par le champ. Comment distinguer ces référentiels linéairement accélérés dans un champ de gravitation des véritables référentiels inertiels ? Newton qui avait construit sa théorie, bien avant que n'apparaisse le concept de champ, sur l'action à distance, n'aurait pas été embarrassé pour répondre à la question. Il suffit de chercher quelles sont les sources pouvant produire des effets gravitationnels ; s'il n'y en a pas, le référentiel est inertielle. L'intérêt du concept de champ est précisément d'obliger à changer de point de vue, à passer d'un point de vue global, celui de l'action à distance, à un point de vue local, incitant à regarder ce qui se passe dans une région limitée de l'espace. Or si l'on adopte ce point de vue local, la réponse à la question posée est qu'il n'y a aucun moyen d'établir une distinction absolue entre un référentiel inertielle où règne un champ de gravitation constant et un référentiel accéléré où il n'y a pas de champ de gravitation (ce ne sont là évidemment que

deux cas extrêmes ; on peut imaginer toute une gamme de référentiels accélérés mêlant dans des proportions quelconques accélération et champ uniforme de gravitation, avec cette seule condition que la somme reste la même). Bien que l'interprétation en termes de champ ait été développée dans le courant du XIX^e siècle et que le point de vue du champ soit devenu dominant à la suite des travaux de Maxwell, unifiant en une théorie du champ électricité, magnétisme et optique, ce n'est qu'en 1907 qu'Einstein prit conscience de cette particularité du champ de gravitation. Évidemment, dans le cadre de la mécanique newtonienne, force est de reconnaître que l'on ne peut pas établir la distinction en question au moyen de phénomènes mécaniques ; si, par ailleurs, on considère que la mécanique fournit l'explication ultime de tous les phénomènes (conception mécaniste du monde), alors il est inutile d'aller chercher plus loin. Mais dès 1908, les tentatives en vue d'expliquer les phénomènes optiques et électromagnétiques en termes mécaniques (grâce à des modèles d'éther) avaient été à peu près toutes abandonnées. Einstein entreprit donc de formuler ce qu'il appela très rapidement le principe d'équivalence : il n'est pas possible de distinguer au moyen de phénomènes, *quels qu'ils soient*, un référentiel inertiel avec un champ de gravitation uniforme d'un référentiel accéléré sans champ de gravitation. Bien qu'il ne soit pas encore, à l'époque, parvenu à une théorie relativiste de la gravitation (voir RELATIVITÉ), il fut en mesure de prévoir, à partir de ce principe, deux nouveaux phénomènes physiques : le décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle et la courbure des rayons lumineux dans un champ de gravitation (avec comme conséquence la possibilité d'effets de lentille gravitationnelle).

Einstein installa le principe d'équivalence au cœur même de sa recherche d'une théorie relativiste de la gravitation. Il apparut vite qu'une telle théorie devrait aller plus loin que la théorie de la relativité restreinte et autoriser, outre les transformations d'un référentiel inertiel à un autre, les transformations vers au moins certains référentiels accélérés (au moins vers ceux considérés dans l'énoncé du principe d'équivalence). Einstein aboutit alors à l'idée que le contenu physique du principe d'équivalence pouvait être résumé en disant que la gravitation et l'inertie sont « *wesengleich* » – essentiellement les mêmes. La distinction entre les forces dites inertielles introduites dans le cas d'un référentiel accéléré (voir ci-dessus) et la force de gravitation n'a rien d'absolu (au sens où elle serait indépendante du référentiel). Il nota alors que cette conception n'était pas sans rappeler sa propre interprétation de la distinction entre champ électrique et champ magnétique dans le cadre de la relativité restreinte. Il n'existe qu'un champ électromagnétique (absolu) ; la manière dont il se partage en champ électrique et champ magnétique dépend de l'état de mouvement du référentiel dans lequel s'effectue ce partage. De la même façon, il n'existe qu'un champ inertio-gravitationnel (absolu) ; la manière dont il se partage

en forces inertielles et gravitationnelles dépend de l'état de mouvement du référentiel utilisé. La seule différence, essentielle, c'est que la manière dont se divise le champ électromagnétique dépend de la vitesse du référentiel choisi, alors que dans le cas du champ inertio-gravitationnel c'est son accélération qui intervient. Einstein rencontra de sérieuses difficultés mathématiques lorsqu'il entreprit de formaliser cette intuition physique. Jusqu'alors les champs dynamiques avaient tous été décrits à l'aide de tenseurs. Un tenseur est un objet mathématique qui jouit de la propriété suivante : si, dans un certain référentiel, il est nul en un point donné, il est nul en ce point dans tous les référentiels. Le champ inertio-gravitationnel ne peut pas être de nature tensorielle, dans la mesure où un champ inertio-gravitationnel qui n'est pas nul dans un certain référentiel peut toujours être rendu nul en un point (en réalité, le long d'une ligne d'univers du genre temps) par un changement adéquat de référentiel. De fait, la nature du champ inertio-gravitationnel est celle d'une certaine espèce de connection affine, dont le concept mathématique n'a été développé que plus tard, en réponse directe aux exigences de formulation de la théorie de la relativité générale. Assurément, l'identification du champ inertio-gravitationnel à une connexion doit être considérée comme la conséquence la plus fondamentale du principe d'équivalence, puisque cette identification vaut à la fois en théorie newtonienne (dans sa formulation quadri-dimensionnelle) de la gravitation et en relativité générale.

L'importance heuristique de la formulation einsteinienne du principe d'équivalence dans l'établissement d'une théorie de la relativité généralisée à la gravitation ne fait guère de doute. Son importance, une fois la théorie établie, en revanche, a fait l'objet de controverses portant sur l'applicabilité du principe ; les diverses versions qui en ont été formulées sont équivalentes dans le cadre conceptuel de la théorie générale. D'autres conséquences du principe d'équivalence sont examinées à l'entrée GRAVITATION.

► FRIEDMAN M., *Foundations of Space-Time Theories*, Princeton, Princeton University Press, 1983, chap. V, section 4. – NORTON J., « What was Einstein's Principle of Equivalence », *Studies in History and Philosophy of Science*, Pergamon Press, 16, 1985.

John STACHEL
(trad. Françoise Balibar)

ERREUR → Maîtrise de l'erreur

ESPACE : LA CRITIQUE DE MACH

La pensée de l'espace développée par le physicien et philosophe Ernst Mach porte d'une part sur la genèse de cette notion à partir des sens (« l'espace physiologique ») et sur sa conceptualisation par la connaissance

scientifique qui lui ôte son caractère subjectif pour lui donner des propriétés universelles, les mêmes pour tous (« l'espace géométrique »), et d'autre part sur la critique de l'espace tel que le concevait la physique de son temps, c'est-à-dire celui de la mécanique newtonienne. Cette critique, exposée dans *La Mécanique* (1883), eut une influence considérable sur les conceptions ultérieures, et notamment sur la genèse de la théorie de la relativité d'Einstein. Elle est étayée sur les études physiologiques – expérimentales et théoriques – que Mach effectua dès ses premiers travaux de recherche, et qu'il exposa de manière systématique dans *l'Analyse des sensations* (1887). Mach approfondit ses conceptions épistémologiques sur la genèse et la constitution de la notion d'espace, et sur les caractères de l'espace géométrique, dans plusieurs textes publiés au tournant du siècle (voir *Space and Geometry*, 1906) et repris dans *Erkenntnis und Irrtum (La connaissance et l'erreur)*, 1905, éd. en allemand et en anglais). Ses conceptions sur la constitution de l'idée d'espace à partir des sens, tout en lui étant propres, sont voisines de celles de Helmholtz, et Poincaré s'inspira des deux dans ses réflexions sur le même sujet. Les remarques de Mach sur la nature des géométries non euclidiennes rejoignent à leur tour celles développées antérieurement par Poincaré.

L'espace physiologique

Si Mach a reçu de Kant l'idée que le temps et l'espace ne sont pas dans les choses mais en nous, qu'ils sont des modes de perception nécessaires pour l'observation et la connaissance du monde, ce ne sont pas pour lui des formes d'intuitions pures (*a priori*) selon la définition kantienne, mais des données d'origine empirique, dues aux perceptions sensorielles. Ses premières recherches portaient sur la psychophysologie des sensations, où il trouva, comme von Helmholtz dans ses études sur la perception, les éléments de référence de ses conceptions épistémologiques sur l'origine des concepts scientifiques, qui marque ses effets sur la nature de ces derniers.

Dans ses *Contributions à l'analyse des sensations*, qui prolongent des études plus anciennes, Mach examine la manière dont les sens contribuent à former la notion d'espace : cet espace est l'espace physiologique, variété multiple de la sensation, qui comprend les espaces visuel, auditif et tactile, l'espace visuel étant, selon lui, le plus précis et le plus ample des systèmes de sensations spatiales, qui conditionnent la reconnaissance des figures. Ces sensations sont produites par l'appareil moteur de l'œil et reliées aux autres processus moteurs du corps (muscles), par compensations réciproques des mouvements. Les sensations spatiales produites par les différents sens ont entre elles des relations, voire des analogies (par exemple, vision binoculaire et audition bi-auriculaire donnant la perception du relief), mais sans s'identifier. La diversité des espaces physiologiques permet une

meilleure précision dans la localisation ; elle permet aussi de pallier, par l'éducation, le défaut de l'un des sens (le sens spatial des aveugles peut être développé).

L'espace physiologique est une représentation qualitative, non quantitative ni métrique, différente pour chaque individu, au contraire de l'espace géométrique que l'on forme à partir de lui, homogène et isotrope, métrique et le même pour tous, dont le premier est une espèce de perspective en relief. Pour Mach, l'origine des trois dimensions de l'espace (physiologique comme géométrique) tient aux trois directions cardinales de l'orientation des corps (haut-bas, avant-arrière, gauche-droite).

L'espace géométrique

Pour Mach, la source des concepts géométriques se trouve dans l'expérience, en ce qui concerne tant la genèse individuelle de la notion d'espace que le développement historique de la géométrie. Les sensations, qui sont à l'origine de la connaissance, demandent à être prolongées par des expériences sur les corps pour que l'entendement puisse élaborer ses théories, en l'occurrence la géométrie, qu'il voit comme une physique de l'espace. « Les concepts géométriques résultent de l'idéalisation de l'expérience *physique* de l'espace », espace dont nous avons formé la notion à partir de notre organisme physiologique, et « les systèmes de géométrie ont leur origine dans la classification des matériaux conceptuels ainsi obtenus » (*Space and geometry*). Les propriétés de l'espace étant rapportées aux corps, il s'ensuit que toutes les relations spatiales sont relatives.

Sa conception physique de la géométrie, qu'il retrouvait d'ailleurs dans la géométrie de Riemann, développée dans la filiation de Gauss, ne l'empêchait pas d'admettre des représentations symboliques très abstraites telles que l'espace comme variété dans le sens riemannien (anticipant même sur la notion de fibré) et lié au temps, et de reconnaître toute l'importance des géométries non euclidiennes, dont la découverte lui paraissait liée au soupçon (entretenu aussi bien par Gauss, Lobatchevski et Bolyai) du caractère empirique de certaines hypothèses de la géométrie. Bien que ces géométries soient plus éloignées de notre expérience, elles sont importantes pour la pensée mathématique, en ce qu'elles suppriment des barrières traditionnelles dressées contre la pensée.

Critique de l'espace absolu de Newton

Pour le phénoménalisme empirico-critique de Mach, toutes les propositions empiriques, qui constituent le contenu d'une science, devraient être réductibles, en dernier ressort, à des propositions sur les sensations. Cette considération guide son analyse de la mécanique de Newton, et notamment sa critique radicale des concepts d'espace et de temps absolus sur lesquels ce dernier fondait sa dynamique (*La Mécanique*, 1883).

L'espace et le mouvement absolu ne sont pas donnés par l'expérience : ils sont une extension abstraite hors de l'expérience et que rien ne légitime, sinon le besoin de rapporter les accélérations à l'espace absolu (par exemple, la force centrifuge dans un mouvement de rotation). Mais le mouvement d'un corps se détermine uniquement en relation à d'autres corps, et l'on doit s'en tenir à cela : il est possible, selon Mach, d'expliquer parfaitement de telle forces en gardant l'idée du seul mouvement relatif.

Il le fit en considérant l'expérience mentale d'un seau tournant rempli d'eau : la force centrifuge apparente est éveillée par le mouvement relatif par rapport au centre de la Terre et aux autres corps célestes, qui nous donne approximativement le référentiel des étoiles fixes. Il en va de même pour la loi de l'inertie : « Dire qu'un corps conserve sa vitesse et sa direction dans l'espace, est simplement une manière abrégée de s'en référer à l'univers entier. » La masse d'inertie des corps elle-même doit être définie en étant rapportée non à l'espace absolu mais à l'ensemble des corps de l'univers, ce qu'Einstein dénommera principe de Mach.

La critique par Mach de l'espace et du temps absolus de Newton fut utile à Einstein dans la redéfinition de ces concepts qu'il proposa avec sa théorie de la relativité restreinte, et le principe de Mach l'aida dans la formulation du problème de la théorie de la relativité générale (covariance généralisée). « Pour moi, écrivait Mach dans un texte de 1910 (cf. *Die Leitgedanken*, Leipzig, 1918), la matière, le temps, et l'espace sont [...] des problèmes vers la solution desquels [...] des physiciens comme Lorentz, Einstein et Minkowski s'approchent progressivement. » Quant à Einstein, il devait écrire : « Mach, au dix-neuvième siècle, a été le seul à penser sérieusement la possibilité d'éliminer le concept d'espace, en cherchant à le remplacer par la notion d'espace des distances instantanées entre les points matériels. Il fit cette tentative pour parvenir à une compréhension satisfaisante de l'inertie » (Einstein, *La relativité et le problème de l'espace*, 1954).

► BRADLEY J., *Mach's philosophy of science*, Londres, Athlone Press, 1971. — COHEN R. & SEEGER R.J. éd., *Ernst Mach, physicist and philosopher*, Dordrecht, Reidel, 1970. — EINSTEIN A., « Relativity and the problem of space », in EINSTEIN A., *Ideas and opinions*, New York, Crown, 1954 (Dell Publ., 1973, 1981). — MACH E., *La mécanique* (1883), trad. fr. E. Bertrand, Paris, Hermann, 1904, 1923 ; *Beiträge zur Analyse der Empfindungen*, Léna, 1886 ; *Contributions to the analysis of the sensations*, trad. C.M. Williams, Chicago, Open Court, 1897 ; *Popular scientific lectures*, trad. T.J. McCormack, Chicago, Open Court, 1898 ; *Erkenntnis und Irrtum*, Leipzig, Barth, 1905 ; *La connaissance et l'erreur*, trad. fr. M. Dufour, Paris, Flammarion, 1908, 1922 ; *Knowledge and error*, trad. T.J. McCormack & P. Foulkes, Dordrecht, Reidel, 1976 ; *Space and geometry, in the light of physiological, psychological, and physical inquiry*, trad. T.J. McCormack, Chicago, Open Court, 1906 ; *Die Leitgedanken*, Leipzig, 1918.

Michel PATY

→ Einstein ; Mach ; Newton ; Relativité.

ESPACE-TEMPS

L'idée que l'espace et le temps sont intimement liés ne date pas d'hier. La cinématique, c'est-à-dire la description du mouvement, les fait intervenir l'un et l'autre. De fait, le concept d'espace-temps, tel que nous le comprenons aujourd'hui, incorpore plusieurs idées développées auparavant, à savoir essentiellement :

- 1) la représentation des intervalles de temps par des longueurs ;
- 2) la combinaison d'intervalles spatiaux et temporels sous forme de diagrammes à deux dimensions ;
- 3) l'assignation de coordonnées aux points de l'espace euclidien à trois dimensions à l'aide de trois axes mutuellement orthogonaux, chaque système de coordonnées étant lié aux autres par une rotation ;
- 4) la généralisation du concept d'espace aux espaces à plus de trois dimensions ;
- 5) la formulation du concept d'espaces affines ; auxquelles il faut ajouter, pour décrire l'espace-temps de Minkowski, un sixième concept ;
- 6) une géométrie non euclidienne, satisfaisant à l'axiome des parallèles, homogène mais non isotrope.

Historique

Retraçons succinctement dans quelles circonstances ont été introduits ces six concepts.

1) J. Høyrup, situé aux alentours de 1800 avant notre ère, « la première occurrence attestée de représentation » d'une grandeur d'un autre type par une longueur, sur des tablettes d'argile mésopotamiennes. « Une longueur est censée représenter quelque chose d'autre qu'elle-même, en l'occurrence une aire... [Étant donné que] dans des textes babyloniens (légèrement postérieurs) des longueurs et des largeurs sont utilisées pour représenter des nombres, des prix ou des expressions arithmétiques complexes, on peut parler de franchissement d'une étape et pas de simple hasard. » Toujours selon Høyrup, « le pas ainsi accompli est immense, l'un des plus grands qu'aie connu l'histoire des mathématiques ; ceux que le progrès intellectuel ne laisse pas indifférent doivent ici ressentir un véritable frisson ». (« The antecedents of algebra » in A. Garcia-diego, éd., *Encyclopedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences*, vol. 2).

Selon H.-J. Waschkies, « l'application du concept de continu au temps et aux processus semble ne pas être apparu avant le milieu du IV^e siècle avant notre ère » (« Mathematical Continuum and Continuity of Movement » in *La Physique d'Aristote*, F. de Gandt et P. Souffrin éd., Paris, Librairie Philosophique Vrin, 1991, p. 151-179). C'est Aristote qui, analysant le mouvement dans sa *Physique*, introduit pour la première fois ce que l'on a appelé plus tard « la représentation spatiale du temps » (H. Bergson, *Durée et simultanéité*, Paris, 1922) ou encore « la spatialiséation du temps » (E. Meyerson, *La déduction relativiste*, Paris, 1925). Aristote utilisait une représentation géométrique de l'espace et du temps par des intervalles de

longueur et comparait les intervalles de temps à des intervalles d'espace (à une dimension) (*Physique*, Livre VI, chapitre 2). Archimède utilise de semblables diagrammes dans les Propositions I et II de son livre sur les spirales (« Des spirales », in *Les Œuvres Complètes d'Archimède*, trad. P. van Eecke, vol. 1, Paris, Blanchard, 1960 ; p. 244 et 245). Ni l'un ni l'autre, cependant, ne combinent les intervalles de temps et les intervalles d'espace en un unique diagramme à deux dimensions.

2) Il semble bien que ce soit N. Oresme qui, le premier, ait fait figurer le temps sur un diagramme à deux dimensions. Mais Oresme porte sur les axes qu'il utilise le temps et la vitesse et non pas le temps et l'espace (on trouvera un exposé de l'histoire de cette représentation dans M. Clagett, éd. *Nicholas Oresme and the Medieval Geometry of Qualities and Motions*, Madison, U. of Wisconsin Press, 1969 ; voir aussi le chapitre 6, intitulé « The Application of Two-Dimensional Geometry to Kinematics », du livre de M. Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages*, Madison, U. of Wisconsin Press, 1961). Descartes, lui, utilise des diagrammes où les points d'une courbe sont référés à deux axes orthogonaux, en 1637, dans « La Géométrie » (C. Adam et P. Tannery, éd., *Œuvres de Descartes*, nouvelle éd. Vrin, vol. 6, *Discours de la Méthode et Essais*). Mais l'idée de combiner sur un seul diagramme le temps et l'espace est apparue bien après le développement de la géométrie analytique.

Néanmoins, on trouve chez Descartes une définition de la dimension, qui a ouvert la route à la possibilité de représenter n'importe quelle grandeur quantifiable d'un système : « Par dimension, nous n'entendons rien d'autre que le mode et la raison selon laquelle on considère que quelque sujet est mesurable : en sorte que non seulement la longueur, la largeur, et la profondeur sont des dimensions du corps, mais encore que la gravité est la dimension, selon laquelle les sujets sont pesés, que la vitesse est la dimension du mouvement, et une infinité d'autres de cette sorte (*Regulae ad directionem ingenii*, C. Adam et P. Tannery éd., Paris, Vrin, vol. 10, règle 14. La règle 14 a été rédigée aux alentours de 1628 mais les *Regulae* n'ont été publiées qu'après la mort de Descartes. Traduction J. L. Marion, *Règles utiles et claires pour la direction de l'esprit en la recherche de la vérité*, La Haye, Nijhoff, 1977). La discussion qui suit cette définition explique en quoi le temps est bien une dimension.

P. Varignon, à la fin du XVII^e siècle, utilisa une représentation graphique bidimensionnelle d'un mouvement unidimensionnel, où la distance et le temps étaient portés le long de deux axes de coordonnées orthogonaux (« Règle générale pour toutes sortes de mouvements de vitesses quelconques variées à discrétion », mémoire lu à l'Académie Royale des Sciences dans sa séance du juillet 1698, in M. Blay, « Quatre mémoires inédits de Pierre Varignon consacrés à la science du mouvement », *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, 1989, 218-248). En 1707, Varignon note que

« l'espace et le temps étant des grandeurs hétérogènes, ce n'est point proprement elles qu'on compare ensemble dans le rapport qu'on appelle vitesse, mais seulement les grandeurs homogènes qui les expriment, lesquelles sont ici, et seront toujours dans la suite, ou deux lignes ou deux nombres, ou deux telles autres grandeurs homogènes qu'on voudra » (Mémoire du 6 juillet 1707, « Des mouvements variés à volonté, comparés entre eux et avec les uniformes »). Quarante ans plus tard, d'Alembert est encore plus explicite : « On ne peut comparer ensemble deux choses d'une nature différente, telles que l'espace & le tems : mais on peut comparer le rapport des parties du tems avec celui des parties de l'espace parcouru. Le tems par sa nature coule uniformément, & la Méchanique suppose cette uniformité. Du reste, sans connoître le tems en lui-même & sans en avoir de mesure précise, nous ne pouvons représenter plus clairement le rapport de ses parties, que par celui des portions d'une ligne droite indéfinie. Or l'analogie qu'il y a entre le rapport des parties d'une telle ligne, & celui des parties de l'espace parcouru par un Corps qui se meut d'une manière quelconque, peut toujours être exprimée par une Équation : on peut donc imaginer une Courbe dont les abscisses représentent les portions du tems écoulé depuis le commencement du Mouvement, les ordonnées correspondantes désignant les espaces parcourus durant ces portions de tems : l'Équation de cette Courbe exprimera, non le rapport des tems aux espaces, mais si on peut parler ainsi, le rapport du rapport que les parties du tems ont à leur unité, à celui que les parties de l'espace parcouru ont à la leur » (*Traité de Dynamique*, Paris, 1743).

3) Descartes n'utilisait que des diagrammes bidimensionnels et suggérait que les courbes à trois dimensions soient étudiées au moyen de leurs projections orthogonales sur deux plans mutuellement orthogonaux. « Car les extrémités des ces perpendiculaires décrivent deux autres lignes courbes, une sur chacun de ces plans, desquelles on peut... déterminer tous les points & les rapporter à ceux de la ligne droite qui est commune à ces deux plans : au moyen de quoi, ceux de la courbe qui a trois dimensions sont essentiellement déterminés » (*ibid.*, p. 440). En termes modernes, on dira que Descartes proposait de paramétrer la courbe spatiale au moyen d'une coordonnée, disons x , le long de la ligne commune aux deux plans, et de considérer ensuite les deux courbes planées $y(x)$, $z(x)$. Leonhard Euler semble avoir été le premier à décomposer les forces et les mouvements en leurs composantes le long de trois axes mutuellement orthogonaux (« Recherches sur le mouvement des corps célestes en général », *Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin* [3] (1747) 1749, p. 93-113, et « Découverte d'un nouveau principe de mécanique », *Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin* [6] (1750) 1752, p. 93-113, in *Opera Omnia*, Deuxièmes Séries, vol. 25, p. 93-113, in *Opera Omnia*, Deuxièmes Séries, vol. 25, p. 93-113, resp., Orell Füssli, Turin, 1960, et Lausanne, 1965, resp.). Euler montra également que le choix de ces axes pouvait être arbitraire et que deux de ces

reliés d'axes ayant la même origine pouvaient être reliés par une transformation orthogonale.

4) A peu près à la même époque, d'Alembert introduisit l'idée du temps comme quatrième dimension : « J'ai dit plus haut qu'il n'étoit possible de concevoir plus de trois dimensions. Un homme d'esprit de ma connoissance croit qu'on pourroit cependant regarder la durée comme une quatrième dimension, & que le produit du temps par la solidité seroit en quelque sorte un produit de quatre dimensions... » (article « Dimension » de *L'Encyclopédie*, Tome Quatrième, Paris, 1754).

Lagrange est encore plus précis lorsque, un demi siècle plus tard, il affirme que « on peut regarder la Mécanique comme une Géométrie à quatre dimensions, et l'Analyse mécanique comme une extension de l'Analyse géométrique » (*Théorie des Fonctions Analytiques*, 1797, cité à partir de la troisième édition, Troisième Partie, Chapitre 1, p. 43). L'apparition de l'idée d'espaces abstraits à quatre dimensions (ou plus) a certainement été facilitée par l'usage que fait Euler de six coordonnées pour la description du mouvement d'un corps rigide (*Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum*, 1765), ainsi que par l'introduction, par Lagrange, d'ensembles de coordonnées abstraites correspondant au nombre de degrés de liberté nécessaire à l'élimination des contraintes dans la résolution des problèmes relatifs au mouvement de plusieurs corps dont les mouvements sont soumis à un certain nombre de contraintes imposées par leurs relations mutuelles (*Mécanique analytique*, 1788).

5) Du côté des mathématiques pures, Grassmann, en 1844, inventa le concept de géométrie affine dont il entreprit la généralisation à un nombre arbitraire de dimensions dans sa théorie de l'extension linéaire (*Die lineare Ausdehnungslehre*, 1844), ce qui lui permit, grâce à l'emploi de techniques multi-dimensionnelles de simplifier un grand nombre de problèmes mécaniques. Ce n'est pourtant que beaucoup plus tard que fut établie la relation entre la première loi de Newton (loi d'inertie) et les espaces affines à quatre dimensions (voir H. Weyl, *Raum-Zeit-Materie*, 1^{re} éd., Berlin, Springer, 1918 : p. 120).

6) En 1887, Poincaré décrit une « quatrième géométrie [à deux dimensions] aussi cohérente que celles d'Euclide, Lobachewsky et Riemann » (H. Poincaré, « Sur les hypothèses fondamentales de la géométrie », *Bulletin de la société mathématique de France*, 15, 1887 : 203-216 : la citation est extraite du chapitre « Géométries non euclidiennes » de *La science et l'hypothèse*, Flammarion, 1902). Dans cette géométrie, l'axiome des parallèles est maintenu, mais l'isotropie de l'espace est abandonnée. Le concept de rotation est remplacé par celui de pseudo-rotation où les lignes droites ne sont pas toutes équivalentes, mais se répartissent en trois classes : pour deux d'entre elles, il est possible d'amener, à l'aide d'une pseudo-rotation, une droite d'une classe en coïncidence avec chaque droite de la même classe, aucune pseudo-rotation ne pouvant amener une droite d'une classe à coïncider avec

une droite de l'autre ; la troisième classe ne comporte que deux droites qui séparent les deux autres classes l'une de l'autre ; chacune reste inchangée par n'importe quelle pseudo-rotation et est orthogonale à elle-même. Bien que ni Poincaré ni aucun de ses contemporains ne l'aie remarqué, il est évident, après coup, que l'espace de Minkowski à deux dimensions obéit aux axiomes qui définissent la « quatrième géométrie » de Poincaré. Tous les concepts nécessaires à l'établissement du concept d'espace-temps de Minkowski, espace-temps de la relativité restreinte, étaient donc en place dès cette époque.

Description physico-mathématique

Commençons par décrire le concept d'espace-temps galiléen, associé à la cinématique et la dynamique newtoniennes, lequel du point de vue logique précède l'espace-temps de la relativité restreinte — même si historiquement c'est l'inverse qui s'est passé. Cette inversion de l'ordre historique par rapport à l'ordre-logique est due en partie au fait que la structure mathématique de l'espace-temps galiléen fait intervenir de façon cruciale le concept d'espace affine. Bien que ce concept ait été introduit dans le courant du XIX^e siècle, par Grassmann (voir ci-dessus), l'importance de son rôle en physique ne fut comprise que longtemps plus tard. Comme le montre à l'évidence la citation de d'Alembert donnée plus haut, en physique pré-relativiste, la combinaison des dimensions spatiales et temporelle partageait avec la combinaison de dimensions hétérogènes telles que la pression, le volume et la température, couramment utilisée en thermodynamique pour visualiser les relations thermodynamiques, la caractéristique suivante : alors que des coordonnées spatiales peuvent être mélangées entre elles par l'ensemble des rotations rigides (technique déjà utilisée, comme on l'a vu, par Euler pour bâtir sa dynamique du corps solide indéformable), il n'en va pas de même des coordonnées spatiales et temporelle qui ne peuvent pas plus être mélangées entre elles que ne le peuvent la pression, le volume et la température dans les diagrammes thermodynamiques.

La situation n'est plus la même lorsqu'il s'agit des transformations qui permettent de passer d'un référentiel à un autre en mouvement relatif. Par exemple, les transformations de Galilée liant entre elles les coordonnées cartésiennes spatiales de deux référentiels inertiels en mouvement uniforme l'un par rapport à l'autre caractérisé par la vitesse V , mélangent effectivement les coordonnées spatiales et temporelles : la vitesse (relative), dans la mesure où elle a les dimensions d'une longueur sur un temps, joue le rôle de facteur de conversion d'unités temporelles en unités spatiales (et inversement). Et de fait, la transformation de Galilée est de la forme

$$r' = r - Vt,$$

où r et r' sont les vecteurs qui repèrent la position par rapport aux origines des deux référentiels inertiels, et

où t est le temps absolu. (On suppose que les deux systèmes de coordonnées spatiales et temporelle ont même origine au temps $t = 0$ et que les unités d'espace et de temps sont les mêmes dans les deux référentiels.) Évidemment, en cinématique classique, galiléonewtonienne, le temps est absolu et, pour que cela soit bien clair, il faut ajouter la relation $t' = t$ aux équations de la transformation galiléenne. Alors que l'espace est relatif à un référentiel inertiel, le temps reste absolu. La combinaison des coordonnées spatiales et temporelle, en vue de former l'espace-temps classique, peut être décrite du point de vue géométrique de la façon suivante : le temps est caractérisé par une foliation unique (absolue) de cet espace-temps, c'est-à-dire par une famille d'hyper-surfaces planes et parallèles entre elles (plates), et à chacune d'elles correspond une valeur du temps absolu. L'espace relatif à un référentiel inertiel est caractérisé par une certaine fibration du genre temps (non unique) de l'espace-temps — autrement dit par une famille de droites parallèles situées en dehors des hyperplans de la foliation du temps. Le passage d'un référentiel inertiel à un autre est décrit comme la transformation d'une fibration à une autre.

Revenons à l'espace-temps de Minkowski de la relativité restreinte. En cinématique relativiste (restreinte), il n'y a plus de temps absolu ; en revanche il y a une constante universelle c , souvent appelée « vitesse de la lumière » mais qu'il vaudrait mieux appeler « vitesse fondamentale ». Cette constante universelle intervient, en même temps que la vitesse relative V , dans le mélange des coordonnées spatiales et temporelle. Les transformations, dites de Lorentz, entre référentiels inertiels sont de la forme :

$$r' = \gamma(r - Vt) + (1 - \gamma)[r - (V.r)V/V^2]$$

$$t' = \gamma[t - (V.r)/c^2]$$

avec $\gamma = [1 - (V/c)^2]^{-1/2}$. En 1905, peu de temps après que Lorentz eut introduit ces transformations (en 1904), Poincaré comprit qu'elles permettaient de donner une toute autre signification aux diagrammes d'espace-temps : les coordonnées spatiales et temporelle relatives à un référentiel inertiel sont désormais mélangées lors de la transformation d'un référentiel à un autre, en sorte que la visualisation géométrique de ces transformations implique de traiter l'espace-temps en quatre dimensions. Ni Lorentz ni Poincaré ne prirent vraiment la mesure de l'importance de ces formules du point de vue cinématique. Ils tentèrent l'un et l'autre de les interpréter à l'intérieur de l'horizon délimité par l'électrodynamique de Maxwell-Lorentz indissociable du référentiel de l'éther, cherchant à distinguer entre coordonnées « apparentes » dans un référentiel en mouvement, données par les transformations de Lorentz, et coordonnées spatiales et temporelle « vraies », définies dans le référentiel de l'éther. C'est Einstein qui, en 1905, prit conscience le premier de la nécessité de remplacer la cinématique classique par une nouvelle cinématique fondée sur l'équivalence de tous les référentiels inertiels, d'où toute référence au

référentiel de l'éther soit bannie, et où les coordonnées spatiales et temporelle intervenant dans les transformations de Lorentz soient interprétées comme de véritables coordonnées spatiales et temporelle dans chacun des deux référentiels (la simultanéité à distance étant définie dans chaque référentiel inertiel de telle façon qu'elle ne dépende pas de la position de l'événement considéré dans ce référentiel). Einstein, ignorant pour l'essentiel les résultats récents de Lorentz et Poincaré, formula ses résultats en des termes où l'espace et le temps restent séparés. C'est Minkowski qui en 1907 adapta les vues d'Einstein au formalisme quadri-dimensionnel introduit par Poincaré. Il affubla, de façon un peu grandiloquente, l'espace-temps de la relativité restreinte ainsi construit du nom d'« univers » (*die Welt*) ; on préfère aujourd'hui parler d'espace-temps de Minkowski. Il démontra que si la coordonnée de temps était rendue imaginaire, les transformations de Lorentz pouvaient être interprétées géométriquement comme des rotations dans un espace euclidien à quatre dimensions. Aujourd'hui, on préfère utiliser un temps réel et parler de pseudo-rotations dans l'espace-temps de Minkowski. De la même façon que les rotations autour d'un axe spatial sont décrites par un angle, les pseudo-rotations autour d'un axe temporel dans l'espace de Minkowski sont décrites par un pseudo-angle, les fonctions hyperboliques remplaçant les fonctions trigonométriques dans la description de ces pseudo-rotations. La vitesse relative V associée à une pseudo-rotation d'un référentiel inerte! à un autre est liée au pseudo-angle η défini par $V/c = \tanh \eta$. Les diagrammes géométriques dans l'espace de Minkowski facilitent la représentation visuelle de certains effets relativistes et même la résolution de certains problèmes physiques. L'espace des vitesses relatives en est un exemple frappant. Dans l'espace-temps classique, toutes les vitesses relatives sont situées sur un hyperplan à trois dimensions qui peut être identifié avec l'une des hyper-surfaces de simultanéité temporelle. La composition des vitesses obéit à la loi d'addition vectorielle habituelle. Dans l'espace de Minkowski, l'espace des vitesses relatives se confond avec l'hyperboloïde unité centré sur l'origine, dont on montre facilement qu'il a la géométrie d'un espace de Lobachevski à trois dimensions, c'est-à-dire un espace de courbure constante négative auquel s'applique la pseudo-trigonométrie. La composition des vitesses en relativité restreinte se réduit donc à une construction de triangles pseudo-sphériques. De même, il est possible de montrer qu'un vecteur transporté le long d'un certain trajet dans l'espace-temps de telle sorte qu'il garde toujours la même direction dans son référentiel instantané (c'est-à-dire le référentiel inertiel dans lequel il est à chaque instant au repos), fait l'objet d'un transport parallèle le long de la courbe correspondante dans l'espace des vitesses relatives. Étant donné que l'espace des vitesses relatives de la cinématique classique est un espace euclidien à trois dimensions, on en déduit que si le vecteur est transporté le long d'un trajet fermé, sa direction reste inchangée. Dans la mesure où

le spin est un vecteur de ce type, on s'attend, sur la base du résultat classique, à ce que la direction du spin reste inchangée. Mais c'est oublier que l'espace des vitesses relatives de la relativité restreinte n'est pas plat (voir ci-dessus) et présente une courbure constante négative. Il en résulte qu'un vecteur de spin transporté le long d'un trajet fermé dans l'espace des vitesses change de direction ; ce qui explique un certain nombre de résultats empiriques, en particulier la précession (dite de Thomas) du spin d'un électron lorsque celui-ci décrit une orbite autour du noyau.

L'existence d'une vitesse absolue permet de combiner les dimensions temporelle et spatiales de manière à produire un nouvel invariant, généralement noté Δs et appelé « intervalle ». Généralisation à quatre dimensions de la distance Δr séparant deux points de l'espace, l'intervalle Δs est l'invariant fondamental de l'espace-temps de Minkowski. L'intervalle entre deux points de l'espace-temps est donné par la relation : $(\Delta s)^2 = (\Delta r)^2 - c^2 (\Delta t)^2$. Alors que la distance entre deux points de l'espace est toujours du genre espace ($(\Delta r)^2 > 0$), l'intervalle entre deux points de l'espace-temps peut être soit du genre espace ($(\Delta s)^2 > 0$), mesurable à l'aide d'une règle, soit du genre temps ($(\Delta s)^2 < 0$), mesurable au moyen d'une horloge, souvent appelé « temps propre », soit encore nul ($(\Delta s)^2 = 0$), lorsque les deux extrémités de l'intervalle peuvent être reliées par un rayon lumineux. Le lieu de tous les points séparés d'un point donné par un intervalle nul forme le cône de lumière dont ce point est le sommet. Le cône de lumière trace une limite entre les points séparés du sommet par un intervalle du genre temps (à l'intérieur du cône) et ceux qui en sont séparés par un intervalle du genre espace (à l'extérieur). On voit que l'idée généralement répandue selon laquelle, en relativité restreinte, la distinction entre espace et temps se trouve abolie, n'est pas juste. Le groupe des transformations actives de l'espace-temps de Minkowski qui laissent invariant l'intervalle séparant deux événements quelconques (son groupe d'invariance) est le groupe de Poincaré à dix paramètres ; il est formé du groupe de Lorentz (six paramètres, trois pour les rotations spatiales et trois pour les pseudo-rotations autour d'un point quelconque de l'espace-temps) et du groupe à quatre paramètres des translations spatiales et temporelles, agissant de façon transitive sur les points de l'espace-temps. Les transformations de Lorentz peuvent être divisées en transformations orthochroniques, propres, connectées de façon continue à l'identité pour former un sous-groupe, et en réflexions spatiales et temporelles, discontinues. Pendant longtemps, on a cru que les interactions physiques étaient universellement invariantes par toutes ces transformations. À chaque invariance est liée une loi de conservation : l'invariance par translation spatiale, resp. temporelle est liée à la conservation de la quantité de mouvement (ou impulsion), resp. de l'énergie ; l'invariance par rotation propre, à la conservation du moment angulaire et celle par les transformations de Lorentz propres à la conservation du vecteur position du centre de masse.

L'invariance par les transformations impropres joue un rôle important en mécanique quantique : les réflexions spatiales sont associées à la conservation des valeurs propres de l'opérateur parité P, et le renversement du temps à la conservation des valeurs propres de l'opérateur T, auquel on ne donne en général pas de nom. Dans les années 50 du siècle dernier, il est apparu que les interactions dites faibles ne sont pas totalement invariantes par les opérations P ou T. Mais le théorème dit CPT impose que toute théorie du champ relativiste (au sens restreint) soit invariante par la combinaison CPT, où C désigne l'opérateur « conjugaison de charge » – ce qui établit une relation jusqu'alors impensée entre la charge électrique et les transformations spatio-temporelles impropres. Ainsi, par exemple, et pour surprendre que cela paraisse, si une certaine expérience est possible, son image dans un miroir, où les vitesses sont de signe inverse, doit elle aussi être possible, à condition de remplacer les particules par leurs anti-particules. Il faut donc être très prudent dans l'énoncé des propriétés de l'espace-temps de Minkowski. Il est possible de l'identifier à l'espace quotient du groupe de Poincaré par son sous-groupe de Lorentz. Si les seules symétries universellement valides sont celles engendrées par le groupe, sous-groupe des transformations de Lorentz orthochroniques propres, l'espace-temps de Minkowski correspondant est orienté et orienté dans l'espace et dans le temps.

De nombreux formalismes mathématiques peuvent être utilisés en théorie de la relativité restreinte, reposant sur l'existence de diverses représentations des groupes de Poincaré et Lorentz. Sommerfeld, et d'autres, ont mis au point une analyse en termes de vecteurs et de tenseurs bien adaptée à l'espace-temps de Minkowski ; plusieurs versions de l'analyse en termes de spineurs furent développées par Weyl, van der Waerden *et al.*, lorsque, grâce au travail de Dirac, fut mise en évidence l'importance physique des représentations spinoriales du groupe de Lorentz.

Dans tout ce qui précède, on a implicitement utilisé deux structures d'espace-temps, inhérentes à la fois à l'espace-temps classique et à l'espace-temps de la relativité restreinte : la structure chrono-géométrique, qui détermine le comportement des règles idéales (géométrie) et des horloges idéales (chronométrie), d'une part ; et d'autre part, la structure inertielle, qui gouverne le comportement des particules libres (c'est-à-dire qui ne sont soumises à aucune force extérieure), lesquelles suivent les géodésiques du genre temps de l'espace-temps (trajectoires inertielles) ; ce sont des droites dans l'espace-temps classique comme dans l'espace-temps de la relativité restreinte. La structure inertielle définit le concept de parallélisme pour deux vecteurs en des points voisins de l'espace-temps et une géodésique est la courbe la plus « droite » en ce sens que le vecteur tangent (on suppose que la courbe est paramétrée de façon adéquate) reste parallèle à lui-même lors de son déplacement le long de la courbe. En cinématique classique, comme on l'a dit, la chronométrie est indépendante de la géométrie ; mais dans

l'espace-temps de la relativité restreinte, chronométrie et géométrie ne forment plus qu'une seule et même structure chrono-géométrique, représentée mathématiquement par sa pseudo-métrique. Les deux structures sont compatibles entre elles : les extrémales définies par la pseudo-métrique (les chemins les plus courts pour les courbes du genre espace et les plus longs pour les courbes du genre temps) sont aussi les chemins les plus « droits » définis par la structure inertielle ; les deux structures, par ailleurs, sont plates, au sens où aucune courbure gaussienne n'est associée aux hyperplans définis par la pseudo-métrique de même qu'aucune courbure riemannienne n'est associée au transport parallèle d'un vecteur de l'espace-temps de Minkowski. Tout vecteur subissant un transport parallèle le long d'une courbe fermée coïncide avec lui-même au moment où il rejoint son point de départ.

L'espace-temps de la relativité restreinte a permis d'analyser tous les phénomènes physiques où la gravitation peut être négligée ; il convient de le modifier si l'on veut prendre en compte la gravitation. Comme il a été déjà expliqué ailleurs (voir l'entrée PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE), il est préférable de considérer la gravitation newtonienne non pas comme une force extérieure agissant sur les corps, mais comme une modification de la structure inertielle de l'espace-temps (jusqu'ici considérée comme fixe) en en faisant une structure dynamique : le champ inertio-gravitationnel. La structure inertielle était plate ; la structure inertio-gravitationnelle ne l'est plus au sens où la courbure riemannienne associée à ce champ décrit des forces de marée gravitationnelles. La chrono-géométrie newtonienne n'est pas modifiée, mais les deux structures restent quand même compatibles au sens que les règles idéales et les horloges idéales le restent lorsqu'elles sont déplacées dans le champ inertio-gravitationnel. Ceci, ne vaut que pour la gravitation et la chrono-géométrie newtoniennes. Pour rendre compatible le champ inertio-gravitationnel avec la chrono-géométrie de la relativité restreinte, il faut modifier cette dernière. La pseudo-métrique doit devenir un champ dynamique, non plat ; il joue un double rôle. Outre qu'il détermine la chrono-géométrie, il agit aussi comme potentiel déterminant de façon unique la connection inertio-gravitationnelle (voir l'entrée RELATIVITÉ).

L'interprétation du formalisme de l'espace-temps a suscité de nombreuses controverses d'ordre philosophique. S'agit-il d'un outil mathématique utile, permettant de représenter (et même dans sa forme géométrique de visualiser sous forme de diagrammes) les relations spatio-temporelles entre événements et processus – très semblable, tout compte fait, aux diagrammes pression-volume-température dont l'utilité en thermodynamique n'est plus à démontrer ? Ou bien, faut-il ontologiser (les adversaires de ce point de vue diraient « réifier ») l'espace-temps, de sorte que le devenir dans l'espace à trois dimensions soit remplacé par l'être dans un espace-temps à quatre dimensions, le changement n'étant alors qu'une illusion subjective ?

► CARTAN Élie, « Sur les variétés à connection affine et la théorie de la relativité généralisée », *Annales de l'École Normale Supérieure*, 40 : 325-412, Paris, 1923. – EARMAN John, *World Enough and Space-Time*, Cambridge, Ma, MIT Press, 1989. – KOPCZYNSKI W. et TRAUTMAN Andrzej, *Spacetime and Gravitation*, Varsovie, PWN, New York, Wiley, 1992. – WEYL Hermann, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton, Princeton University Press, 1949.

John STACHEL
(trad. Françoise Balibar)

ESPÈCE

BIOLOGIE

Dans la diversité animale ou végétale le profane peut observer et le spécialiste établir l'existence de groupements d'individus en espèces dont la reconnaissance est parfois évidente ; ainsi, le chamois et le bouquetin coexistant dans les Alpes s'imposent comme deux espèces distinctes : ils ne se ressemblent pas (critère morphologique) ; ils engendrent des jeunes semblables aux parents (critères d'interfécondité intraspécifique et de reproduction à l'identique) ; ils ne s'hybrident pas (critère de non-interfécondité interspécifique).

La distinction entre espèces n'est généralement pas aussi évidente et la recherche d'un principe d'unité dans la diversité des organismes pose, depuis l'Antiquité, des problèmes. Peut-on définir un concept général d'espèce et en inférer la réalité de regroupements d'individus en ensembles homogènes ou ne voir, dans la nature, que les individus ? Sur quels critères rassembler des individus dans une espèce et la distinguer de ses voisines ? Comment nommer les espèces ? L'espèce est-elle immuable ou mutable ? L'espèce d'Aristote ne peut être celle des naturalistes actuels car l'idée d'évolution établira une coupure entre deux visions, pré-évolutionniste et évolutionniste.

L'espèce comme concept

La thèse nominaliste (qui remonte au XI^e s.) n'accorde de réalité qu'à l'individu ; tout regroupement ne serait qu'abstraction de l'esprit humain. Cette position est facilement réfutée par l'observation du vivant : à la reproduction, des individus se reconnaissent sans erreur possible comme membres de la même espèce, soit directement s'ils s'accouplent, soit indirectement par leurs produits sexuels émis dans le milieu. L'espèce est une réalité pour les habitants de la Nouvelle-Guinée qui, sans culture zoologique, distinguent presque autant d'espèces d'oiseaux que peut le faire un ornithologiste de métier.

La thèse essentialiste (terme de Popper) qui remonte à Platon, postule l'existence d'une « essence » transcendante de l'espèce, dont les organismes, tels que nous les observons, ne sont que des copies imparfaites. Ainsi, dans une collection, l'essence d'une espèce pourra être matérialisée par le choix, arbitraire, d'un

spécimen privilégié comme type de référence (conception typologique).

Déjà préfiguré dans l'œuvre de Buffon, largement accepté aujourd'hui, le concept biologique définit l'espèce comme « une communauté interféconde de populations, reproductivement isolées d'autres populations et qui occupent dans la nature une niche écologique spécifique » (E. Mayr, 1982). Dans cette conception : 1) L'espèce n'existe que sous la forme de population(s), communauté(s) reproductrice(s) d'individus plus ou moins différents, interféconds. La population est l'unité biologique. 2) La variabilité individuelle, loin d'être un accident de copie, est un attribut essentiel de l'espèce et, de ce fait, aucun individu ne peut être privilégié comme type ; ce terme n'est plus alors utilisé que pour désigner un échantillon « porte-étiquette » de la description qu'en fit tel auteur en telle année. 3) L'interfécondité rassemble dans l'espèce tous les individus qui partagent, plus ou moins totalement, un certain nombre de caractères héréditaires. La morphologie n'est pas prise en compte. 4) Des mécanismes d'isolement reproducteur (non-interfécondité) séparent les espèces. 5) L'espèce n'est pas reconnue par ses seules propriétés intrinsèques, mais également par ses relations avec d'autres espèces et avec l'environnement (habitat, place dans la chaîne alimentaire). Ces caractères qui ne font référence à aucun organisme définissent l'espèce comme une catégorie dans une classification hiérarchisée (espèce, genre, famille, etc.).

Le taxon est un ensemble concret d'organismes décrit par des caractères qui lui assignent une catégorie et permettent de lui attribuer un nom particulier (d'espèce, de genre, de famille, etc.).

L'espèce comme réalité

Aristote établissait l'espèce (*eidos*) sur la ressemblance et la reproduction à l'identique. S'il admettait des hybridations et même des transformations elles ne relevaient que de la fiction, jamais de l'observation.

Les naturalistes travailleront ensuite sur une conception de l'espèce que l'on pourrait qualifier de « biblique ». Chaque espèce vivante (les fossiles ne sont pas encore considérés) est création divine, dérivée d'un couple (ou d'un hermaphrodite) originel. L'espèce est immuable et il ne peut apparaître de formes nouvelles. Toute espèce occupe une fonction déterminée dans l'« économie de la nature ». « Il y a autant d'espèces que furent créées de formes différentes au commencement » écrira Linné en 1736. Avant lui, J. Ray avait donné en 1686 la définition de l'espèce – unité systématique – en privilégiant, dans tous ses représentants, des invariants (même en cas de dimorphisme sexuel), qui en constituent les caractères spécifiques. Toutefois, il soulignait que plutôt que leur ressemblance c'est l'interfécondité de ses membres qui garantit l'identité spécifique. « Tout ce que donne la semence d'une même plante est de même espèce » ; jamais une espèce « ne naît de la semence d'une autre »

(voir aussi Augustin de Candolle). Dès le début de son *Histoire naturelle*, Buffon refusera la nomenclature et la classification de Linné ; pour lui, genre, ordre, classe ne sont que des produits de notre imagination ; la Nature ne compte que des individus (1749) ; pourtant il admet la réalité de l'espèce comme succession d'individus semblables qui se reproduisent entre eux tandis que leurs hybrides sont stériles. Ce critère de reproduction, complété de données écologiques, éthologiques, géographiques et historiques, amorce la définition biologique de l'espèce (réduite ici aux seuls quadrupèdes). Ne reconnaitre que des individus mais, en même temps, traiter de regroupements en espèces serait paradoxal si, plus tard (1765), il n'assimilait l'espèce à un individu « être permanent, indépendant du nombre et du temps ».

Nommer l'espèce

La nomenclature d'Aristote est incertaine ; l'espèce y est désignée par un nom commun qui peut englober des formes différentes (*Batrachos* est à la fois grenouille et baudroie). Ses successeurs n'établiront pas de règles de nomenclature : le nom vernaculaire, dorénavant stabilisé, persistera, accompagné d'une description plus ou moins succincte ; ainsi le houblon est *Convolvulus heteroclitus perennis floribus foliaceis strobili instar*. Linné substituera à ce système, souvent complexe et confus, un système rationnel, par l'emploi d'un état-civil, connu comme « binôme linnéen » (1753, pour les plantes) qui identifie sans équivoque toute espèce. L'année de publication de la dixième édition du *Systema Naturae* (1758), deviendra l'an 0 de la nomenclature. Ainsi dans *Scomber thynnus*, le nom d'espèce *thynnus* individualise le grand thon rouge parmi des espèces affines (maquereau, bonite, etc.) regroupées dans le genre *Scomber* (aujourd'hui *Thunnus*). L'identité de l'organisme naît de l'association des deux termes qui, isolés, peuvent n'avoir aucune valeur descriptive. Buffon n'emploiera que le nom vernaculaire.

Stabilité ou mutabilité ?

Jusqu'à l'avènement de l'idée d'évolution, les auteurs, en majorité, adoptaient le dogme de la fixité des espèces ; pourtant, certains entrevoyaient de possibles changements par hybridation ou transformation spontanée (Aristote, J. Ray, Adanson, etc.). Linné, d'abord fixiste, fut conduit, par l'observation chez une plante (*Peloria*) d'un mélange des caractères de deux autres espèces, à tempérer sa position première et à admettre l'apparition d'espèces nouvelles par hybridation, chez les plantes (et les animaux ?). Quelle est, sur ce problème, la position de Buffon ? Annonce-t-il le transformisme comme cela a été parfois avancé ? La stabilité du « moule intérieur », guide d'assemblage des « molécules organiques » en un organisme, met en question la possibilité d'apparition d'espèces nouvelles. Dans l'interrogation « L'âne est-il un cheval

dégénéré ? » (1753) dégénération pourrait signifier soit un changement de « genre » dans la nature (les deux animaux dérivant d'un même souche) soit une dégénérescence (sens actuel du terme) sous l'action de l'homme. Mais, en se refusant à admettre que l'œuvre de la nature puisse être modifiée, Buffon ne peut être rangé parmi les précurseurs réels du transformisme.

L'idée de transformation spontanée (le futur transformisme) exprimée, çà et là, au cours du XVIII^e s. (Mauvertius, par exemple) s'affirmera au XIX^e et fera surgir de nouveaux problèmes. L'étude du monde fossile a prouvé que les espèces ne furent pas toujours les mêmes ; provenaient-elles alors de créations répétées (Cuvier) ou de transformations continues (Lamarck) ? Le rejet des notions de création unique et d'invariance aurait dû entraîner l'abandon du concept biblique, et pourtant la problématique nouvelle continuera, longtemps encore, à maintenir un concept d'espèce proche de la tradition. Ainsi, dans sa *Flore française* Lamarck décrit des espèces réelles, fixes, bien séparées, comme le faisaient ses prédécesseurs. Sa conception de l'espèce changera radicalement autour de 1800. Devenu le descripteur des « Animaux sans vertèbres », il se trouvera placé devant une contradiction puisque l'idée de changement, à laquelle il est parvenu, retirera à l'espèce le statut d'invariant. Contrairement à ce qui est parfois avancé, Lamarck n'adopta pas une conception nominaliste mais énoncera qu'il « n'y a pas d'espèces constantes » ; elles sont mutables et ont une histoire, ayant été engendrées des plus simples vers les plus complexes et ne sont donc pas aussi vieilles que le monde (contre Buffon).

Darwin s'intéressera avant tout aux processus de diversification spatio-temporelle de l'espèce, non à celui de sa définition. Toutefois, après avoir douté de la validité du concept (« définir l'indéfinissable », *in* lettre à Hooker, 1856) il lui apportera sa contribution : l'espèce a une histoire (transformisme, cf. Lamarck), une organisation structurale (population, cf. Buffon) et spatiale (distribution, cf. Buffon).

Quelques problèmes

Le terme d'espèce peut-il conserver la même acception dans toute l'étendue du monde organique, depuis les bactéries (sans parler des virus) jusqu'aux animaux et végétaux dits supérieurs ? Un seul type d'espèce ou plusieurs ?

Le concept biologique définit l'espèce, en général, hors de l'espace et du temps (espèce non dimensionnelle). Le naturaliste qui décrit des espèces particulières doit prendre en compte leur répartition, éventuellement leur histoire (espèce dimensionnelle). Quels critères peut-il mettre en œuvre ? Celui de ressemblance, immédiatement accessible, est souvent mis en défaut sur le vivant : des individus dissemblables morphologiquement, mais interféconds, seront de même espèce (mâle et femelle dans le dimorphisme sexuel) ; à l'inverse, des individus morphologiquement

très proches, mais non interféconds, seront d'espèces différentes, dites jumelles.

Si les critères d'interfécondité intraspécifique et de noninterfécondité interspécifique sont, en théorie, les plus pertinents pour définir l'espèce, en sont-ils pour autant indiscutables, en théorie comme en pratique, du fait qu'ils sont fondés sur la reproduction sexuée, biparentale ? L'affirmation de la stricte non-interfécondité entre populations (ou espèces) exige que celles-ci viennent au contact, même sur une aire limitée. Souvent difficile à établir pratiquement, la non-interfécondité entre individus, gardienne vigilante de la pureté spécifique, est contredite par les cas d'hybrides féconds, surtout rencontrés dans le monde végétal. Ces critères perdent toute signification dans les cas d'autofécondation (plantes) ou de parthénogénèse (chez des espèces des groupes animaux).

La distribution des espèces dans l'espace fait surgir, à côté de problèmes de structure des populations – qui ne seront pas examinés ici – celui, fondamental, d'appartenance au même groupe spécifique pour des populations disjointes, soit sur un continent, soit entre continent et îles. Des solutions peuvent être proposées, à partir de données tirées de la morphologie, ou de croisements en élevages qui peuvent renseigner sur le degré de proximité, ou d'éloignement des génomes.

L'introduction du facteur temps, avec la perte de signification des critères reproductifs, pose un difficile problème : « Qu'est-ce que l'espèce fossile ? » Selon Simpson : « Une espèce évolutive est une lignée (une séquence généalogique ancêtres-descendants) de populations évoluant séparément d'autres séquences et selon son rôle évolutif et ses tendances propres. » Semblable formulation englobe les critères de la définition biologique avec l'interfécondité intraspécifique (séquence généalogique), et la non-interfécondité interspécifique (séparation des séquences) ; elle y ajoute la dimension du temps (ancêtres-descendants) mais laisse ouvert le problème de la délimitation temporelle de l'espèce. Les générations successives issues d'une forme-souche A sont bien liées entre elles par la continuité reproductive, mais, après plusieurs dizaines de milliers d'années, qu'est devenue A ? S'est-elle maintenue ou s'est-elle transformée en une nouvelle espèce B, et, s'il y a eu transformation, où et comment placer la coupure entre A et B ? Il faut alors faire appel à la notion de degré (?) de ressemblance, avec ses incertitudes et, dans la mesure du possible, mettre en œuvre un traitement de caractères mesurables par les méthodes de la statistique.

Pour les bactéries, où toute sexualité est exclue, force est de recourir à une définition particulière de l'espèce. Elle est ici un faisceau de lignées dérivées chacune d'un unique « parent » (*clones*). L'identité spécifique du faisceau est maintenue par la cohésion, dans l'ensemble des clones, d'un type de génome particulier assurant l'isolement vis-à-vis d'autres faisceaux. La description de l'espèce fait appel à des caractéristiques de cytologie, de physiologie métabolique, de biochimie, de pathogénie.

En résumé l'étude de l'espèce, dans sa généralité pose des problèmes de deux types : 1) contingents, qui relèvent de l'appartenance à une même espèce, comme c'est le cas, par exemple, des isolats continentaux ou insulaires ; 2) fondamentaux, qui portent sur la nature même de l'espèce. Dépendant du seul mode de reproduction sexuée biparentale, le critère biologique ne peut, vraisemblablement, définir un seul type d'espèce pour la totalité du monde organique, et il faudrait plutôt envisager l'existence de plusieurs types d'espèces.

► DEVILLERS C. & TINTANT H., *Questions sur la théorie de l'évolution*, Paris, PUF, 1996. — MAYR E., « Espèce », in TORT P. dir., *Dictionnaire du Darwinisme et de l'Évolution*, Paris, PUF, 1996. — ROGER J., *Buffon*, Paris, Fayard, 1989. — ROGER J. & FISCHER J.L., *Histoire du concept d'espèce dans les sciences de la vie*, Colloque International de la Fondation Singer-Polignac, Paris, 1985.

Charles DEVILLERS

→ Cellule ; Classification [BOTANIQUE] ; Créationnisme ; Cuvier ; Darwinisme ; De Vries ; Évolutionnisme ; Hybride ; Lamarckisme ; Loi biogénétique fondamentale ; Mayr ; Sélection ; Taxinomie ; Théorie ; Vivant (Théorie du).

ÉTHÉR

PHYSIQUE

Les éthers qu'on rencontre dans l'histoire de la physique sont des substances subtiles distinctes de la matière, servant à fournir ou à transmettre des effets entre les corps. L'air, par exemple, transmet des ondes sonores mais n'est pas un éther, parce qu'il n'est pas subtil. Les particules de lumière, quant à elles, sont subtiles mais ne constituent pas un milieu de transmission.

Au XVIII^e s., la nature de la lumière était sujette à des spéculations théoriques. René Descartes (1596-1650) y voyait une pression transmise instantanément à travers un milieu composé de minuscules « globules » transparents. Les orbites planétaires étaient dues aux tourbillons d'éther, ou à ce qu'il appelait la « matière subtile », qui comprenait les globules transparents. Robert Hooke (1635-1703) décrit la lumière comme une pulsation sphérique produite par un corps lumineux, et se propageant à travers un milieu homogène avec une vitesse finie. La réfraction de la lumière, selon Hooke, dépendait de la densité relative des corps transparents traversés. En démontrant que les phénomènes optiques de réfraction et de réflexion interne s'expliquent par un changement de vitesse de propagation dans le corps réfractant, Christiaan Huyghens (1629-1695) améliora la notion de lumière en tant que vibration d'un milieu. Selon lui, ce changement était dû à l'interaction entre l'éther et les particules des corps transparents. À la même époque, Isaac Newton (1642-1727) identifiait – non sans hésitation – la lumière à des corpuscules de tailles différentes émis par les corps lumineux. Chaque corpuscule transmettait une oscillation à l'éther, et les différentes couleurs

étaient liées aux vibrations ainsi produites. Chez Newton encore, la réflexion interne et la réfraction de la lumière étaient une fonction du changement de vitesse qui avait lieu lors du passage de la lumière entre deux corps transparents, mais ce changement de vitesse s'effectuait dans le sens inverse de celui proposé par Huyghens, et à l'aide des forces répulsives des particules d'un milieu élastique, dont la densité était variable. Selon Newton, l'hypothèse ondulatoire devait avoir pour conséquence la diffraction autour des obstacles, comme cela arrivait aux ondes sonores. L'éther que Newton dévoilait dans son *Opticks* (1717) concernait aussi bien la gravitation que l'optique ; il était distinct de la matière ordinaire soumise aux principes énoncés auparavant « sans hypothèses » dans les *Principia Mathematica* (1687), parce qu'il influençait la matière d'une façon active, alors qu'elle était ordinairement passive, et soumise à l'action à distance de la force attractive de la gravitation. L'éther d'ailleurs a été associé au concept de Dieu par les scolastiques, grâce à des attributs tels que l'omniprésence et l'omnipotence. Le rôle actif de l'éther signifiait chez Newton l'intervention de Dieu sur le monde naturel, et les savants seront nombreux à reprendre cette interprétation dans les siècles à venir. La notion d'éther actif n'a pas connu de développement par les newtoniens avant 1740, date à laquelle il s'est un peu confondu avec le concept du « feu » de Hermann Boerhaave (1668-1738). Le feu de Boerhaave était une substance impondérable pénétrant l'espace et tous les corps, dont le pouvoir répulsif agissait en même temps que le pouvoir attractif de la matière ordinaire.

Les éthers invoqués au XVIII^e s. en explication des phénomènes liés à l'électricité, au magnétisme, à l'optique, la chaleur et la chimie se fondaient souvent sur les idées de Newton et de Boerhaave. Benjamin Franklin (1706-1790) proposa une théorie de l'électricité qui expliquait l'électrification et la décharge électrique des corps par la présence d'un fluide subtil dont les particules étaient attirées par la matière ordinaire et se repoussaient mutuellement. John Canton (1718-1772) étudia comme Franklin les phénomènes liés à l'induction ; tous les deux remarquèrent que le fluide électrique ne réagissait pas à distance, mais semblait être présent dans l'air adjacent aux corps électrisés. Chez Canton, c'était l'air lui-même qui, en tant que milieu porteur de fluide électrique, permettait aux corps électrisés d'interagir à distance. Au vu de la découverte par Hans Christian Ørsted (1777-1851) d'une force magnétique produite d'une façon circulaire autour d'un conducteur de courant électrique, André-Marie Ampère (1775-1836) imaginait de réduire les aimants aux courants électriques dans les plans perpendiculaires à leur axe. Selon Ampère, l'explication de la force pondéromotrice entre les circuits du courant électrique se trouvait dans la réaction d'un éther universel (composé de deux électricités de signes opposés) ébranlé par le courant. Non seulement les effets électromagnétiques, mais aussi les phénomènes lumineux

trouvaient ainsi une explication, à travers les mouvements de ce fluide impondérable.

En 1801, l'hypothèse selon laquelle la lumière est un mouvement ondulatoire réapparait en Angleterre dans la théorie de Thomas Young (1773-1829), qui rendait compte de plusieurs phénomènes liés à la diffraction, à l'aide d'un éther universel et de son principe d'interférence des ondes. D'autres éthers universels furent proposés par Humphry Davy (1778-1829) en électrochimie, et par Benjamin Thompson (Count Rumford, 1753-1814) dans sa théorie de la chaleur ; aucun des trois ne fit intervenir les fluides impondérables. À son début, la théorie de Young ne compta que peu d'adeptes en Angleterre, et il est vrai que la polarisation y restait inexplicable, ainsi que la nature quantitative du milieu de propagation des ondes lumineuses. En France, la théorie de Young n'attira pas non plus l'intérêt des savants, à quelques exceptions près. Elle devait faire face à une pratique théorique dans laquelle les divers phénomènes tels que les réactions chimiques, l'action capillaire, la cohésion des solides et la réfraction optique s'expliquaient par une force attractive exercée entre les particules de matière. La théorie des phénomènes gazeux envisagée par Pierre-Simon de Laplace (1749-1827), par exemple, utilisait un fluide impondérable appelé calorique, qui entourait les particules de matière et servait à moduler la force attractive des particules par sa force répulsive. Cette démarche comptait des succès en optique. Laplace, par exemple, avec son élève Étienne-Louis Malus (1775-1812), montra que les lois de la double réfraction de Huyghens sont compatibles avec l'hypothèse corpusculaire, éliminant ainsi l'avantage de la théorie ondulatoire dans ce domaine. Néanmoins, l'hypothèse ondulatoire commença une percée à la suite d'Augustin Fresnel (1788-1827), qui réussit à prendre en compte aussi bien la diffraction que la polarisation de la lumière. Young avait montré que si la lumière polarisée n'interfère pas, alors les vibrations lumineuses se produisent dans un sens normal à la direction de propagation. Adoptant ce point de vue, Fresnel dut faire appel aux propriétés dynamiques des particules d'un éther capable de transmettre des vibrations transversales. Par conséquent, l'éther lumineux devenait solide et élastique.

Jusqu'à la fin du XIX^e s., la propagation des ondes à travers l'éther solide élastique sera un thème de recherche, d'abord en optique physique, ensuite dans l'électromagnétisme. Vers 1830 la théorie de Fresnel dominait le domaine de l'optique, prévoyant de nombreux effets inattendus, comme la polarisation circulaire après deux réflexions internes dans un rhombe, et la réfraction conique déduite par William Rowan Hamilton (1805-1865). L'éther solide suscita une floraison de développements mathématiques, avec les travaux d'Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) sur la théorie de l'élasticité, et ceux de George Green (1793-1841) et James MacCullagh (1809-1847) en mécanique analytique. En 1830, avec les équations de mouvement d'un solide élastique, Cauchy trouva une expression pour la vitesse de propagation des

ondes transversales. MacCullagh déduisit les lois de l'optique cristalline à partir d'une certaine fonction de Lagrange de l'éther, évitant ainsi de faire appel aux hypothèses sur la structure de l'éther lumineux. Le nombre de ces hypothèses augmentait rapidement, dans l'espoir de trouver un accord entre les propriétés connues de la lumière et les propriétés théoriques attribuées aux ondes qui se propageaient à travers un solide élastique.

L'éther lumineux donna lieu d'ailleurs à des critiques par les tenants de l'empirisme inspiré des principes baconiens, dont John Stuart Mill (1806-1873) se faisait le porte-parole. Se plaçant au niveau méthodologique, Mill considérait qu'une investigation scientifique devait procéder par l'inférence inductive, qui va du fait particulier au fait particulier. Il rejeta l'éther de la théorie ondulatoire parce qu'on ne pouvait l'inférer de cette façon ; étant dépourvu de toute qualité sensible, le concept d'éther restait inductivement hors d'atteinte. Au-delà de la théorie ondulatoire, la critique de Mill visait la philosophie des sciences de William Whewell (1794-1866). Ce dernier soutenait non seulement que la méthode inductive est sans fondement rationnel, mais que l'introduction d'hypothèses abstraites (à quoi Mill s'opposait) trouve sa justification dans l'histoire des sciences. Se posait alors pour Whewell le problème de la vérité des hypothèses. Il le réglait en disant ceci : lorsqu'une hypothèse scientifique rencontre une confirmation empirique inattendue, de sorte qu'il y a coïncidence d'inductions, sa vérité est assurée. L'histoire, affirma Whewell, regorgeait de coïncidences de ce genre – notamment la découverte de la rotation du plan de polarisation – qui montraient la supériorité de la théorie ondulatoire par rapport à la théorie de l'émission.

En exprimant sa préférence pour la théorie ondulatoire, Whewell ne cacha pas une difficulté majeure : l'éther solide devait permettre aux planètes de le traverser sans rencontrer de résistance mesurable. Son collègue à Cambridge, George Gabriel Stokes (1819-1903), observa que l'éther pouvait satisfaire à cette exigence s'il avait une plasticité suffisante pour laisser les corps le traverser lentement, tout en étant suffisamment rigide pour transmettre des ondes transversales, un peu comme la cire de cordonnier. Stokes avait cherché auparavant à expliquer l'aberration stellaire en supposant que l'éther pénétrait par l'avant les corps en mouvement, se mélangeait avec l'éther propre à ces corps, avant de sortir par l'arrière. De cette façon, Stokes retrouvait le coefficient d'entraînement partiel de l'éther par les milieux réfringents, proposé par Fresnel en 1818 pour rendre compte de l'aberration. La valeur du coefficient fut vérifiée en 1851 à l'issue d'une célèbre expérience d'Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896).

L'effet réciproque à celui d'Ørsted – la création d'un courant électrique par le magnétisme – fut mis en évidence par Michael Faraday (1791-1867), avec l'idée que la force magnétique et l'induction électrique sont ondulatoires, et se propagent avec une vitesse finie.

Dans ses recherches sur l'électricité, Faraday décrit l'action électrique par des lignes de force qui traversent tout l'espace, ce qui conduisit James Clerk Maxwell (1831-1879) vers une nouvelle théorie mathématique des phénomènes électromagnétiques. L'action électrique à distance était supprimée en faveur des répulsions et des attractions des conducteurs provenant des pressions et des tensions sur la matière pondérable, qui se transmettaient à travers la matière diélectrique. Au début, Maxwell présenta sa théorie sans modèle des actions électrodynamiques, mais bientôt il exposait sa conception d'un éther composé de tourbillons moléculaires entourés de roues libres, dont le mouvement était analogue au courant électrique.

D'autres physiciens avant Maxwell construisirent des modèles de l'éther, inspirés par l'idée que le magnétisme a un caractère rotatoire ; c'est le cas notamment de Hermann Helmholtz (1821-1894) et de William Thomson (1824-1907). Mais Maxwell, sur la base de l'analogie – formelle et empirique – entre la propagation de la lumière dans un milieu isotrope et la propagation de l'action électrique, tira la conclusion que la lumière consiste dans des oscillations transversales du milieu même de production des phénomènes électriques et magnétiques. La théorie électromagnétique de la lumière était à construire. Après avoir étudié la théorie de Maxwell, George Francis Fitzgerald (1851-1901) vit que parmi les éthers solides élastiques proposés dans le cadre de l'optique ondulatoire, seul celui de MacCullagh (1839) présentait des parallèles significatifs. Fitzgerald étendit le domaine de la théorie électromagnétique de la lumière à l'optique cristalline, en montrant l'analogie double entre le courant de déplacement et la force magnétique de Maxwell d'une part, et la torsion et le déplacement spatial de l'éther isotrope de MacCullagh d'autre part. L'inertie des éléments de l'éther impliquait leur élasticité rotatoire, de sorte que les diverses parties de l'éther tendent à conserver leur orientation. La théorie de Maxwell devint ainsi une concurrente à part entière des théories de l'éther solide élastique lumineux, même si l'analogie entre la théorie de Maxwell et celle de MacCullagh restait incomplète. Malgré les efforts considérables des savants, la modélisation mécanique de la théorie électromagnétique de Maxwell ne réussit jamais à prendre en compte tous les effets connus de l'optique et de l'électromagnétisme, même dans le cas le plus simple des corps stationnaires. Toutefois, pour certains la réalité de l'éther électromagnétique semblait être établie par les expériences de Heinrich Hertz (1857-1894) montrant que les ondes électromagnétiques se plient aux lois de la diffraction, de la polarisation et de la réfraction. Les théoriciens du champ électromagnétique s'intéressèrent alors au sujet de l'optique des corps en mouvement. D'après l'expérience (1887) d'Albert A. Michelson (1852-1931) et Edward W. Morley (1838-1923), le mouvement terrestre n'avait pas d'influence sur la diffraction de la lumière, jusqu'au deuxième ordre d'approximation dans le rapport de la vitesse de la Terre à celle de la

propagation de la lumière dans l'éther ; ce résultat contredisait les prévisions de toutes les théories optiques.

Selon Hertz, les équations différentielles fondamentales de la théorie de Maxwell devaient avoir la priorité sur les différentes images mécaniques qu'on pourrait avoir d'elles. Cette tendance vers l'abstraction s'affirma dans les théories de l'électron de Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) et de Joseph Larmor (1857-1942), où l'on prenait en compte l'interaction entre la matière pondérable et l'éther. L'électron larmorien (un centre de tension rotatoire) et lorentzien (une particule électrisée de forme variable) traversait l'éther stationnaire, alors que les corps se composaient d'agglomérations d'électrons. La théorie de Lorentz (1892) tenta de rendre compte de l'expérience de Michelson-Morley, en supposant que la longueur d'un corps en mouvement de translation par rapport à l'éther diminue en fonction de sa vitesse ; il rendait cette contraction plus plausible en avançant l'hypothèse de l'origine électromagnétique des forces moléculaires.

Au début du xx^e s., les avis sur la réalité de l'éther électromagnétique étaient partagés. Pour les physiciens théoriciens rompus avec les images mécanistes de l'ancienne physique les quantités dynamiques appartenaient au champ électromagnétique, et l'éther, s'ils s'en servaient, ne représentait qu'un artifice mathématique de plus. Les autres – beaucoup plus nombreux – croyaient qu'un jour on finirait par mettre l'éther en évidence. En 1905, Albert Einstein (1879-1955) annonça qu'il n'était nul besoin en physique d'un concept d'éther. D'après la théorie de la relativité d'Einstein, et la théorie des électrons de Lorentz améliorée par Henri Poincaré (1854-1912), les lois de la physique devaient garder la même forme par rapport à tous les systèmes en mouvement uniforme de translation. Ces deux théories furent fusionnées en quelque sorte dans la théorie de l'espace-temps de Hermann Minkowski (1864-1909), qui remplaçait l'espace absolu de la cinématique newtonienne par le « monde absolu » à quatre dimensions. Désormais le champ électromagnétique se comprenait sans l'aide d'un milieu substantiel ; on assignait des états aux points d'une variété quadridimensionnelle, passant ainsi à la physique moderne du champ pur.

La notion d'éther reste admise par les physiciens au xx^e s., même si l'extension du mot est restreinte par rapport à son usage au siècle précédent. En 1920, Einstein, avançant que dans une région de l'espace-temps vide de matière et d'énergie ($T^{\nu\nu} = 0$) il y a des potentiels de gravitation, fit un parallèle avec l'éther de Lorentz, qui existait en l'absence de tout champ. C'est aussi un éther de ce genre que prévoit la théorie du champ quantique. Si on prend en considération une portion de l'espace-temps où règne le vide absolu, alors il y aura toujours des fluctuations, comme l'exige le principe d'incertitude.

► BALIBAR F., *Einstein 1905 : De l'éther aux quanta*, Paris, PUF, 1992. – CANTOR G.N. & HODGE M.J.S. éd., *Conceptions of*

Ether : Studies in the History of Ether Theories, 1740-1900, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1981. – HARMAN P.M., *Energy, Force, and Matter : The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1982. – WHITTAKER Sir E., *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Londres, Thomas Nelson, 2 vol., 1951-1953.

Scott WALTER

→ Champ ; Lumière ; Michelson ; Propagation.

EUCLIDE, 365 (?) - 300 (?) av. J.-C.

D'après Proclus, Euclide vécut sous le premier Ptolémée qui régna sur l'Égypte au iii^e s. avant J.-C. Entre les mathématiciens de l'Académie (Platon meurt en 347) et les débuts d'Archimède, l'œuvre d'Euclide apparaît comme un moment capital dans l'histoire des mathématiques car il se situe chronologiquement au milieu d'une période d'intense activité (Thalès vs s. av. J.-C. Pythagore, Eudoxe iv^e s. av. J.-C. Apollonius iii^e siècle av. J.-C.). Et elle consiste essentiellement en une systématisation des acquis qui défiera les siècles.

Les Éléments ne porte pas seulement sur la géométrie sinon à entendre géométrie comme synonyme de mathématique. Appartiennent en propre à Euclide les treize premiers livres. Les quatre premiers sont consacrés essentiellement à la géométrie plane, le livre V contient la théorie des proportions entre les grandeurs et le livre VI applique cette théorie à la géométrie plane. Les livres VII, VIII, IX contiennent ce que l'on considère comme la théorie des nombres. Le mot nombre désigne en grec les entiers naturels supérieurs ou égaux à 2. À l'exclusion de toute autre entité que nous modernes appellerions nombre. Le 1 est appelé l'unité et il n'y a pas de concept de zéro. Dans ces livres figure la théorie des rapports entre nombres entiers ainsi que des proportions entre ces nombres qui conduit à celle des puissances d'entiers et de leurs rapports. Le livre X est entièrement consacré à l'étude des lignes droites commensurables ou incommensurables entre elles. Il porte également de façon plus spécifique sur les lignes irrationnelles ainsi que sur les aires rectilignes rectangulaires ou carrées qui leur correspondent. Ce livre présuppose les acquis de la géométrie plane et de la théorie des proportions et des livres arithmétiques. Le livre XI présente la généralisation à la dimension 3 de la géométrie des livres I à VI et les propriétés de solides élémentaires relevant de ce que les Grecs appellent la Stéréométrie. Le livre XII présente les résultats concernant la mesure du cercle, de la pyramide, du cône et de la sphère qui ne peuvent être acquis que par une méthode spéciale, légitimée aux Livres V et X considéré comme une première forme de calcul intégral dans l'histoire des mathématiques, la méthode d'exhaustion. Le livre XIII est consacré à la construction des cinq polyèdres réguliers inscrits dans la sphère ce qui suppose notamment des résultats du livre X. Proclus considère que la fin de l'ouvrage est précisément la

construction des cinq polyèdres. Le livre XIV est l'œuvre d'Hypsicles, astronome de renom postérieur à Apollonius, il reprend des résultats déjà obtenus par ce dernier, le livre XV nettement inférieure étudie la possibilité d'inscrire d'autres polyèdres, le nombre des arêtes et des angles solides, la détermination des angles dièdres entre les faces. L'auteur a pu en être Isidore de Milet architecte de Sainte-Sophie de Constantinople (532 apr. J.-C.). Le corpus euclidien se divise en deux groupes : les œuvres consacrées à la Géométrie et celles consacrées aux Mathématiques au sens grec, c'est-à-dire au sens large. Œuvre moins connue d'Euclide, *Les données* contiennent des propositions énonçant que si certains éléments sont donnés dans une figure d'autres éléments ou d'autres relations sont alors données, de tel ou tel point de vue. C'est plutôt une sorte de livre d'exercices d'introduction à l'analyse.

Dans le traité *Sur les divisions*, traité perdu en grec, une version arabe existe, il s'agit de partager une figure donnée au moyen d'une ou plusieurs lignes droites assujettis à des contraintes. *Les arguments fallacieux* est un traité perdu qui montre selon Proclus comment des conséquences erronées peuvent apparaître à partir de raisonnements faux en partant de principes vrais. *Les Porismes* est un traité qui fut également perdu. Il s'agit de prouver la possibilité de trouver une certaine proposition mais sans la construire. *Les coniques* œuvre qui est à la base des coniques d'Apollonius qui a ajouté 4 livres à ses 4 livres. Il faut citer *Les Lieux rapportés à la surface*, certainement portant sur des surfaces cylindriques coniques ou sphériques ou de révolution.

Parmi les ouvrages non mathématiques on note *Les phénomènes* traité de petite astronomie que l'on voit sur la sphère céleste. *L'optique*, traité de perspective, *La section du canon*, traité arithmétique des intervalles musicaux et des *Fragments de mécanique* attribué à Euclide.

Les Éléments portent bien leur nom : l'ordre des propositions qui y figurent est synthétique et l'ensemble de ces propositions est conçu comme un réservoir dans lequel puiser pour établir d'autres connaissances. Par exemple une proposition peut y figurer qui est à la base d'une méthode de calcul. Tous les commentaires antiques entendent par éléments les propositions elles-mêmes et non pas les livres comme ce sera le cas à la Renaissance. De plus, chaque proposition peut être élément d'une autre qui figure dans la suite, une proposition donnée à éventuellement une postérité, et on peut lui trouver des ancêtres d'où l'importance de l'ordre des *Éléments*.

Il existe une tradition des commentaires d'abord grecs : Héron d'Alexandrie (i^e s. apr. J.-C.) animé par un souci de compléter les *Éléments*, Porphyre (iii^e s. de notre ère) remarquable surtout par ses analyses des modes de raisonnement, Pappus (iii^e s. également), connu par un commentaire au livre X mais aussi à d'autres livres et Simplicius (vi^e s.). Le commentaire le plus important est celui de Proclus qui laisse une précieuse analyse du Livre I dont la perspective est

philosophique : les mathématiques ont un rôle philosophique propre préparant l'accès aux universaux et à la dialectique. Il faut encore citer Eudème de Rhodes, disciple d'Aristote, auteur d'une histoire de l'Arithmétique, une histoire de l'Astronomie et de la Géométrie.

Enfin pour l'histoire de la géométrie des *Éléments* rappelons qu'Apollonius de Perge (III^e s. av. J.-C.) a voulu modifier les *Éléments* et leur donner une origine expérimentale. Cette œuvre a fait l'objet de traductions latines et arabes, d'éditions jusqu'au XVIII^e s. À partir du XIX^e s. le commentaire émigre dans des discussions logiques des mathématiciens et chez les historiens et philologues pour parvenir à Hilbert qui en a transformé profondément la teneur mathématique.

Ce qui caractérise la forme euclidienne c'est la forme démonstrative qui expose les raisons pour lesquelles les résultats de la science sont nécessairement vrais. Cette forme se trouve avoir été discutée par Aristote. On dira à sa suite qu'il faut des hypothèses pour les existences, des définitions pour les essences et des axiomes comme générateur du raisonnement.

Les définitions sont posées par le géomètre pour fixer le sens des termes et sont en attente de la démonstration de l'existence du défini par construction. Euclide assigne également des contraintes à la définition scientifique : l'extension du sujet est l'intersection de celles des attributs qui entrent dans la définition.

Parmi ces contraintes, rappelons celle énonçant que les termes qui entrent dans la définition du « définendum » doivent être mieux connus que lui. Les définitions ont de plus un caractère constructif elles décrivent le processus d'une genèse.

Les *Éléments* comportent comme tout traité de mathématique des théorèmes et problèmes. La forme théorème est propre à la mathématique grecque. La distinction entre les deux est l'objet de débats à partir de positions opposées. Un problème d'après ce que rapporte Proclus avec ses conditions ouvre sur certaines possibilités mais il doit en exister d'autres. Pour certains la recherche portant sur les prédicats ou propriétés est caractéristique du théorème celle sur les conditions d'existence du problème. La preuve d'existence est importante dans le problème. Dans la discussion sur les deux formes de proposition se cache un débat sur la conception de l'activité mathématique qui pour les uns consiste à résoudre des problèmes et pour les autres en la mise en forme théorique des résultats.

Les *Éléments* sont ainsi restés un modèle du raisonnement mathématique : le raisonnement mis en œuvre est lui aussi spécifié. Le rôle de l'hypothèse y est évidemment souligné. On prouve par hypothèse en usant du raisonnement par l'absurde et l'analyse. Celle-ci pousse la recherche d'étape en étape jusqu'à rejoindre une proposition dûment établie. Elle raisonne par hypothèse car supposant établie la propriété sous étude elle en dérive les conséquences jusqu'au connu. Le connu figure comme condition nécessaire de la situation hypothétique. Cette condition atteinte il faut montrer qu'elle est aussi une condition suffisante. On effectue alors la démarche inverse ou synthèse du

théorème ou du problème. Si l'analyse mène à une condition qui est contradictoire l'hypothèse doit être rejetée. Le raisonnement par l'absurde est un raisonnement souvent employé dans les *Éléments*. Si on prend la contradictoire de la proposition à démontrer comme hypothèse on est conduit à une absurdité. Cette méthode de raisonnement est l'un des éléments constitutifs de la méthode d'exhaustion qui prouve l'égalité de deux grandeurs A et B par l'absurde résultant de la supposition de leur inégalité. La supposition se dédouble en deux cas A plus grand que B et B plus grand que A. Mais il consiste également à montrer l'absurdité d'un grand nombre d'hypothèses à l'exclusion desquelles nous parvenons à la bonne.

Le sort de l'œuvre d'Euclide est très remarquable : sa géométrie et partiellement son arithmétique ne cesse de faire le fond de notre enseignement des mathématiques, et elle a été totalement intégrée, placée au sein du corpus des mathématiques. La géométrie euclidienne après avoir constitué une base des développements mathématiques jusqu'aux débuts du XVIII^e s. a été d'abord dissoute en partie dans l'analyse et l'algèbre puis est devenue un cas particulier de géométrie parmi toutes les géométries possibles.

● EUCLIDE, *Les Éléments, Vol. 1 Introduction générale Livre I à IV*, éd. M. Cavering et B. Vitrac, Paris, PUF, 1990. — *Œuvres, trad. des Éléments et des Données*, éd. F. Peyrard, Paris, 1819, rééd. Introd. Jean Itard, Paris, 1966 ; *Optique et Catoptrique*, trad. P. Ver Eecke, Paris, 1959 ; *Les livres arithmétiques*, trad. et commentaires Jean Itard, Paris, Hermann, 1961.

► HEATH Th. L., *A History of Greek Mathematics*, Oxford, Clarendon Press, 1921, réimpr. New York, Dover, 1960. — KNORR W. R., *The Ancient Tradition of Geometric Problems*, Boston, Birkhauser, 1986. — TANNERY P., *La Géométrie grecque* (1887), réimpr., Paris, Éditions Jacques Gabay, 1986. — MUGLER Ch., *Dictionnaire historique de la terminologie géométrique des Grecs*, 2 vol., Paris, Klincksieck, 1958-1959. — PAPPUS, *The Commentary of Pappus on Book X of Euclid's Elements*, éd. G. Junge & W. Thomson, Cambridge, Harvard University Press, 1930 ; Réimpr., New York/London, Johnson repr. C., 1968. — PROCLI DIADOCHI, *In primum Euclidis Elementorum librum Commentarii*, éd. G. Friedlein, Lipsiae, in aed. B. G. Teubner, 1875, trad. P. Ver Eecke Bruges.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Axiomatization et formalisation ; Démonstration ; Géométrie ; Infini ; Méthodes infinitésimales ; Vision.

EUGÉNISME

Sir Francis Galton crée le terme d'« eugénique » en 1883 pour désigner une science devant permettre de modifier l'hérédité de l'espèce humaine (en anglais, *eugenics*, construit sur le grec pour « bien naître »). Le terme le plus souvent utilisé en français est celui d'« eugénisme », créé en 1888 par Georges Vacher de Lapouge pour désigner le résultat de l'eugénique. Son sens a ensuite évolué vers celui d'un parti pris en faveur de l'eugénique (suggéré par la terminaison en

-isme), voire, après l'expérience nazie, celui d'une utilisation criminelle de la biologie.

Trois questions accompagnent l'histoire de l'eugénique. La première est de savoir quels intérêts doit servir un progrès des techniques reproductives : ceux de l'État, ceux des parents d'un enfant à naître, ou ceux de l'enfant lui-même ? La deuxième est de savoir quelle autre humanité est éventuellement plus souhaitable que celle que nous connaissons. La troisième concerne les moyens d'intervention sur la reproduction, c'est-à-dire non seulement leur base scientifique, mais aussi leur coût en souffrances. L'ensemble de ces questions est conditionné par les prémisses de l'eugénique. Rien ne caractérise autant ce mouvement pendant la période qui va de 1869 (premier livre de Galton, *Hereditary Genius*) à la Seconde Guerre mondiale que la crainte d'une « dégénérescence » de l'espèce humaine et la conviction qu'il faut d'urgence y porter remède. Produit de la troisième révolution industrielle, l'eugénisme réalise une combinaison singulière des obsessions du siècle face à la science, au progrès technique, au fatalisme social, et au déterminisme héréditaire. Avec la théorie darwinienne de la sélection naturelle (1859), l'homme ne se conçoit plus comme une créature issue du plan divin, mais comme un produit de la transformation des espèces. Reconnaisant très tôt la justesse de cette théorie, Galton (1822-1911) s'intéresse à ses conséquences futures. Convaincu que le génie comme le crime sont déterminés par l'hérédité, il pense que la grandeur et la décadence des nations dépendent des qualités héréditaires de leurs membres. Or, la théorie darwinienne suggère qu'avec l'émergence de la société s'interrompt le processus de sélection naturelle chez l'homme. Galton et les eugénistes accuseront la civilisation d'être « dysgénique », c'est-à-dire de contrecarrer le jeu spontané d'élimination des déficiences héréditaires : la médecine et la charité sociale qui aident les faibles, la guerre qui envoie les plus braves et les plus valeureux à la mort, agiraient dans le sens d'un « affaiblissement de la race ». Il ne faut pas confondre l'eugénisme avec le courant dit du « darwinisme social », qui développait à la fin du XIX^e s. un biologie approximatif clamant que tout allait pour le mieux et qu'une certaine dose de lutte pour l'existence était le prix inévitable du progrès. Ce sont au contraire deux mouvements rivaux. L'eugénisme, inquiet de l'avenir, cherche des outils scientifiques et non des discours. Pour leur projet, les eugénistes devaient connaître les lois de l'hérédité et de la démographie. Ils accusaient les classes pauvres d'avoir trop d'enfants, et les classes instruites d'en avoir trop peu. Promouvant l'idée de contrôle des naissances, inventeurs d'un système d'allocations familiales basées sur le mérite, ils créèrent des concepts qui paraissent aujourd'hui des conquêtes de la liberté individuelle, comme la contraception, mais qui furent d'abord les éléments d'une machine destinée à organiser la reproduction différentielle des classes moyennes et éduquées, lesquelles formeront la base sociale de l'eugénisme au début du XX^e s.

L'intérêt de la société prime aux yeux des eugénistes. Au nom du bien-être des générations futures, il leur faut dessaisir les individus du contrôle de la reproduction. Galton n'est certes pas le premier à avoir proposé que la reproduction relève d'une politique d'État. Dans *La République*, Platon suggère que la Cité favorise les enfants des « hommes et femmes d'élite » et défavorise en secret celle des autres. Thomas More imagine d'organiser la rencontre des femmes et des hommes à marier dans des démonstrations où ils comparaitraient nus, afin de se choisir mutuellement sur la base de la santé et non de critères futiles. Galton diffère de ses prédécesseurs en associant une volonté technique à ses utopies. Lorsqu'il crée l'eugénisme, les lois de l'hérédité restent un grand mystère, mais la possibilité d'agir sur l'hérédité est démontrée par les techniques sélectionnistes des agronomes. Le premier nom qu'il avait trouvé à l'eugénique, « viriculture », était explicite. La référence agronomique inspire la définition qu'il donne de l'eugénique en 1883 : une « science de l'amélioration de la lignée, qui n'est aucunement confinée à des questions de choix judiciaires, mais qui, tout particulièrement dans le cas de l'homme, prend appui sur tous les facteurs [...] susceptibles de conférer aux races ou souches les plus convenables une plus grande chance de prévaloir rapidement sur celles qui le sont moins ».

L'eugénisme a distingué deux formes d'eugénique. L'eugénisme négative était l'évitement de la reproduction de certains individus. Les eugénistes admettaient que beaucoup de traits jugés déficients (maladies mentales, handicaps physiques de naissance, alcoolisme) étaient déterminés par l'hérédité. L'eugénique négative se voulait une action conservatrice contrebalançant la tendance à la « dégénérescence » de la souche. L'autre forme d'eugénique, dite positive, devait favoriser la reproduction des individus présentant les traits souhaitables. Les individus méritants et instruits avaient le défaut de se reproduire tard et de ne faire que peu d'enfants. Il fallait les encourager à la procréation, notamment par des allocations familiales. Se voulant une force novatrice, l'eugénique positive interpelle notre définition de l'espèce humaine. Au nom de quels principes devrions-nous œuvrer à produire une humanité différente de sa forme présente ? Les quelques peintures de cette humanité idéale que nous ont laissées les eugénistes sont de grotesques stéréotypes. Au seuil de sa mort, Galton griffonna une utopie, *Kantsaywhere*, illustrant l'aboutissement souhaité de plusieurs générations de sélection de surdoués élevés dans la religion de l'amélioration de la race : des hommes brillants aux tests psychologiques — un préalable pour se marier —, des femmes devenues « véritablement mamiliennes », et des exclus voués au célibat dans des camps de travail. De l'Allemagne nazie, chacun connaît l'idéal du surhomme : Germain des origines recréé de la même façon que des vétérinaires avaient reconstitué un bœuf genevois (*Ur-ochse*, ou *auroch*), en croisant des races de bovins de savante façon. Le nazisme tenta l'eugénique positive dans l'institution

Lebensborn qui recueillait le fruit de conceptions réalisées sous contrôle d'État.

L'eugénisme et la génétique

Les chimères de l'eugénisme ouvrirent paradoxalement un grand chapitre de l'histoire des sciences, car elles favorisèrent le développement des statistiques et de la génétique. Ses relations avec cette dernière, devenues conflictuelles, survécurent néanmoins à l'expérience nazie et ne se modifièrent vraiment qu'avec l'apparition de nouveaux moyens d'intervention sur le génome. Dès le début, l'eugénisme sut attirer les meilleurs talents mathématiques, avec notamment Karl Pearson et Ronald Fisher. En quelques décennies, l'école de Biométrie mit au point l'ensemble du dispositif des statistiques et créa de nombreux concepts encore utilisés de nos jours, notamment en agronomie (coefficients de corrélation et de régression, χ^2 , analyse de variance, maximum de vraisemblance). L'eugénisme allait de pair avec une haute idée de la science, développée chez Pearson dans un esprit philosophique empiriocriticiiste (selon lequel la science est une recherche de relations entre perceptions dénuée d'hypothèses sur la matière) inspirant sa « loi de l'hérédité ancestrale ». Scientifique intègre, Pearson osa braver le reste du mouvement eugéniste quand il découvrit et proclama que l'alcoolisme n'était pas héréditaire. Le créateur du mot de « génétique » (1905), William Bateson, ne croyait pas non plus à un support matériel de l'hérédité. Proche de l'eugénisme par son étymologie, la génétique n'était pas d'abord conçue comme une science des gènes (le concept de gène fut créé par Johannsen en 1909), mais comme une science du développement. Néanmoins, la biométrie, science descriptive du quantitatif, et la génétique, science expérimentale du discontinu, parurent d'abord incompatibles. Galton dut arbitrer leur conflit au sein du Comité de l'Évolution de la Royal Society, finalement gagné par Bateson lorsque de Vries généralisa à l'ensemble des espèces en 1900 les Lois de Mendel qui montraient que l'hérédité avait une base « particulière ». Les biométriciens acceptèrent de mauvais gré la génétique, qui avait mis en évidence un phénomène pour eux détestable, la récessivité. Par ce mécanisme, une déficience génétique n'est souvent exprimée que chez les individus ayant reçu un gène mutant de leurs deux parents, alors que de nombreux porteurs, extérieurement sains parce que ne l'ayant reçu que d'un seul parent, continuent de la transmettre. Punnett démontra en 1917 que la récessivité rendait la sélection eugénique inopérante. Si p est la fréquence d'un gène déficient et q celle de son équivalent « normal », les gènes sont plus nombreux chez les porteurs que chez les individus atteints dans la proportion q/p . Ainsi, lorsque la fréquence de la déficience est de 1 %, les porteurs transmettent cent fois plus de gènes que les malades. Il était illusoire d'agir rapidement sur l'hérédité par sélection des individus atteints. Les programmes eugéniques devinrent des plans millénaires.

La génétique allait-elle pourtant rompre son lien avec un programme dont l'écho social avait été longtemps source de prestige, voire de crédits de recherche ? Peu de généticiens s'impliquèrent désormais directement dans l'eugénisme, mais la plupart s'y montraient favorables. Pendant la montée du nazisme, les plus en vue d'entre eux publièrent un manifeste clamant la compatibilité de l'eugénisme avec une société humaniste. Mais tout mouvement progressiste n'était-il pas alors favorable à l'eugénisme ? La confiance des généticiens en l'eugénisme survécut à la Seconde Guerre mondiale. En 1950, Jean Sutter, de l'INED, envisageait encore des programmes de sélection s'étalant sur quatre siècles. Certains généticiens s'orientèrent cependant vers le « conseil génétique », pratique médicale préventive de la naissance d'enfants handicapés, préoccupée du bien-être familial et sans implication eugéniste. La référence à l'eugénisme ne disparut vraiment que lorsque la découverte de l'ADN (1953) puis des biotechnologies moléculaires (conférence d'Asilomar, 1975) firent entrevoir des possibilités d'intervention sur le génome sans recours à une politique des croisements. Les généticiens devinrent alors les procureurs de l'eugénisme. Le discrédit de la sociobiologie de Wilson (1975), aux théories pourtant assez anodines sur l'évolution des sociétés animales, tint moins à ses critiques d'extrême-gauche du groupe Science for the People qu'au désaveu orchestré par la communauté des biologistes moléculaires qui créèrent pour elle le qualificatif de « pseudoscience ».

L'eugénisme en acte

Dans les villes de la fin du XIX^e s., un important mouvement populaire s'empara de l'idée eugéniste jusqu'alors confinée à des cercles universitaires. Ce militantisme reposait sur des associations, des fondations de recherche en génétique humaine, et l'intervention auprès des autorités civiles. De 1907 à 1940, trente-cinq États des États-Unis, deux provinces canadiennes, l'Allemagne, l'Estonie, le Danemark, la Finlande, la Norvège, la Suède et la Suisse promulguèrent sous son influence des lois de stérilisation de personnes affectées de maladies présumées héréditaires : maladies mentales, tendances jugées socialement dangereuses, déviations sexuelles ou délits sexuels. La stérilisation pouvait être volontaire ou imposée. Autre grand moment d'eugénisme, la Première Guerre mondiale vit la totalité des conscrits américains soumis à des tests qui constituèrent une mine de statistiques et d'arguments pour les années suivantes. L'*Immigration Act* de 1924 régla l'immigration aux États-Unis en fonction de l'origine des immigrants, au prétexte que les immigrants de fraîche date (venus d'Europe centrale et méditerranéenne) réussissaient moins bien aux tests psychologiques. Après la défaite du nazisme, les lois de stérilisation furent discrètement abrogées ou finirent oubliées. Il n'existe pas d'estimation fiable des personnes qui furent mutilées, de gré, de force ou à leur insu, mais toujours en vain. Le comble du gigantesque

engouement statistique que fut l'eugénisme est de n'avoir laissé aucune comptabilité de ses actes.

Le grand legs de l'eugénisme au XXI^e s. est le racisme. Ce mot apparaît dans la langue en 1930 pour désigner les thèses national-socialistes. L'auteur de *Mein Kampf* s'était inspiré de l'évolutionnisme anthropologique de Vacher de Lapouge et de Gobineau, ainsi que de l'eugénisme de Ploetz, qui avait fondé en 1895 la Société allemande pour l'hygiène raciale. Hitler avait lu le traité de biologie raciale des biologistes Baur, Fischer et Lenz, qui deviendront les dignitaires de l'anthropologie nazie. Ils sont les fondateurs oubliés du racisme, concept du XX^e s. qui exprime tant la haine à l'état brut qu'il fait oublier les justifications religieuses qu'alléguait les forfaits ethniques passés de l'Occident (croisades, conquête de l'Amérique, pogroms antisémites). La biologie ayant à tout jamais fait de l'homme un produit de l'évolution, le racisme a su laïciser la haine. S'il est souvent à la recherche de preuves scientifiques de l'inégalité des races ou de l'hérédité de l'intelligence, c'est qu'il est né d'un argumentaire de forme scientifique. Quant à l'eugénisme, elle non plus, hélas, n'appartient pas au passé, mais à l'être moderne de l'homme biologique. Ayant incarné pendant un siècle le mythe de la « bonne naissance », elle pourra encore, avec quelques approximations étymologiques, incarner dans le monde de l'ADN celui du « bon gène ».

- GALTON F., *Hereditary genius, an inquiry into its laws and consequences*, Londres, Macmillan, 1865 ; *Inquiries into human faculties and its development*, Londres, Dent & Sons, 1883 ; *Natural inheritance*, Londres, Macmillan, 1889. — GAYON J., « L'Eugénisme », in FENGOLD J., FELLOUS M. & SOLIGNAC M. éd., *Précis de Génétique Humaine*, Paris, Hermann, 1998. — PAUL D.B. & SPENCER H.G., « The hidden science of Eugenics », *Nature*, 374, 1995, 302-304. — PEARSON K., *The grammar of science*, 2^e éd. rev., Londres, Adams Black, 1900 ; *The life, letters, and labours of Francis Galton*, vol. IIIA, *Correlation, personal identification and eugenics*, Cambridge Univ. Press, 1930. — SUTTER J., *L'Eugénisme, problèmes, méthodes, résultats*, Paris, PUF, 1950. — VEUILLE M., *La Sociobiologie*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1986.

Michel VEUILLE

→ Darwinisme ; Race ; Sélection.

ÉVIDENCE

Évident se dit en allemand *selbstverständlich* : ce qui se comprend de soi-même. L'évidence aurait la fonction d'amener les échanges d'opinions contradictoires sur un terrain susceptible d'accorder les esprits, et de mettre un terme à l'errance dans la recherche de la vérité en toutes choses. Descartes a illustré les deux aspects de cet idéal. Concevoir toute vérité humaine comme probable, approchée, comme « opinion », c'est admettre que la « dispute » — littérale-ment : « estimer différemment » — est le seul jeu qui

soit adapté au régime de la mise en commun des efforts vers le vrai. Aristote, à l'opposé du dialogue platonicien, a pratiqué la recherche de la vérité comme un inventaire des opinions, inventaire dont ressort une vérité médiane. L'exercice scolastique de la *disputatio* pratiqué encore au temps de Descartes retient cette leçon pragmatique.

Descartes constate très tôt qu'il est un domaine où le conflit des opinions n'a pas cours et ne constitue pas la règle de mise en commun des efforts de vérité : ce sont les mathématiques. « Je me plaisais surtout aux mathématiques, à cause de la certitude et de l'évidence de leurs raisons... » (*Discours de la méthode*, première partie, p. 7, l. 24-25, éd. Gilson). À l'opposé, il conçoit la philosophie comme un domaine où il ne se trouve « aucune chose dont on ne dispute, par conséquent qui ne soit douteuse » (*ibid.*, p. 8, l. 21-22). Il avait déjà généralisé la question dans la règle II : « Toute science est une connaissance certaine et évidente [...] nous rejetons toutes les connaissances qui ne sont que probables, et nous décidons qu'il ne faut donner son assentiment qu'à celles qui sont parfaitement connues et dont on ne peut douter » (*Règles pour la direction de l'esprit*, Gallimard, 1953, p. 39). Il en ressort que l'évidence est la marque de toute vérité, quels que soient l'objet ou la discipline concernés. Il pose en principe que la connaissance vraie est la connaissance évidente, et qu'elle est possible. Les sciences mathématiques ne sont pas le tout de la science, elles ne sont que le modèle et l'exemple de toute connaissance, qui peut et doit passer de l'errance (désaccord des esprits) à l'évidence qui les accorde.

L'évident s'oppose au « conjectural », dont la vérité est incertaine. L'évident est « ce dont la vérité apparaît immédiatement à l'esprit » (Gilson, p. 197), c'est-à-dire ce qui n'a besoin d'aucune autre médiation, en particulier, d'aucun autre acte de l'esprit que celui par lequel elle est saisie. Descartes distingue les deux actes fondamentaux de l'esprit en les nommant intuition et déduction, étant entendu que les perceptions sensibles et les imaginations ne sont pas des actes du seul esprit et impliquent le corps. Mais des deux actes celui de l'intuition est premier, puisque pour déduire il faut enchaîner des pensées vraies, des intuitions. Les intuitions sont des actes de l'entendement, de la pure pensée, simples, infaillibles (on peut se tromper en raisonnant, mais non en saisissant une évidence), et elles s'appliquent à tout ce qui tombe sous cet acte simple : jugements, relations entre jugements. L'intuition est « la conception d'un esprit pur et attentif » (règle III, p. 43), « qui naît de la seule lumière de la raison » (p. 44). C'est elle qui saisit les vérités premières comme « Je pense, je suis, j'existe » ou « le triangle n'a que trois côtés », ainsi que « $2 + 2 = 3 + 1$ » (*ibid.*). Cette conception radicale de l'évidence comme vérité a pour conséquence de poser un savoir absolu, et non relatif, ainsi que de distinguer un tel savoir de tout ce qui n'est que probable. La rupture avec le pragmatisme scolastique est nette.

Cette fondation de la vérité sur l'évidence, ou clarté

de l'idée saisie par un acte d'intuition, est antérieure à l'œuvre métaphysique de Descartes, et n'en dépend pas. Les *Méditations* mettront en doute l'évidence même, définie à partir de la connaissance mathématique, mais pour en approfondir la vérité : l'évidence seule du « Je pense » donne accès à la réalité même de ce moi qui pense, à son existence, ce qui ouvre la voie à la « preuve ontologique » de l'existence de Dieu par l'idée claire que j'ai de Sa perfection. Descartes élargit le champ de la science aux existants, en métaphysique et en physique.

La critique leibnizienne

La distinction, reconnue par Gilson, entre l'origine mathématique et l'application métaphysique d'une philosophie de l'évidence sera lourde de conséquences pour la reprise critique qu'en fera Leibniz. Il met en cause cette double et successive direction, notamment dans une lettre à la princesse Élisabeth (1678), où il recommande de ne faire « des arguments qu'*in forma* », autrement dit : l'évidence seule ne nous garantit pas de tomber dans l'erreur, et un raisonnement doit conclure par la force de la forme, ce que Descartes n'exige pas lorsqu'il soumet le raisonnement à la donnée préalable de l'intuition.

Leibniz s'en prend, dans les *Nouveaux Essais* (IV, 7, § 10), à l'exemple mathématique que Descartes prend pour éclairer le caractère immédiat de l'évidence. « $2 + 2 = 3 + 1 = 4$ » n'est pas immédiatement intuitionné, le raisonnement intervient pour fournir les termes intermédiaires que voici : deux et deux est deux, et un est un ; deux et un est trois ; trois et un est quatre ; donc deux et deux est quatre, ce qui est démontré et non intuitionné, selon l'axiome que « mettant les choses égales à la place, l'égalité demeure ». Ainsi, les vérités mathématiques ont besoin d'un principe, loin d'en constituer un par une évidence juge d'elle-même, en deçà de laquelle il ne serait ni possible ni nécessaire de remonter. Ce principe, c'est le principe logique d'identité ou de non-contradiction, *principium contradictionis*, qui suffit aux êtres de raison que sont les notions mathématiques, dont l'essence se passe de l'existence. Mais Leibniz s'en prend encore aux applications physiques et métaphysiques de la philosophie de l'évidence. Les existants demandent un principe différent et supérieur, le fameux « principe de raison suffisante », *principium reddendae rationis cur potius sit quam non sit* (principe consistant à rendre raison de ce qu'ils sont, plutôt que de ne pas être). Descartes passe tout uniment d'une conception mathématique à une conception généralisée de la connaissance, tandis qu'il aurait fallu distinguer et hiérarchiser. Comprendre le monde et toute la suite des événements qui le composent à partir d'identités de type mathématique ne serait à la portée que d'un esprit infini ou divin ; les hommes doivent s'en remettre à un principe qui leur assure que ce monde est « le meilleur possible ». L'expérience est ainsi encadrée par des « maximes subalternes » dépendant du principe du meilleur (principe de raison) :

symétrie, économie, continuité. On ne peut déduire *a priori* les données de l'expérience, mais les « méditer » *a posteriori*. La reprise leibnizienne des « erreurs mémorables » de Descartes, notamment la détermination de la force des corps en mouvement, procède de la critique d'une philosophie de l'évidence, trop courte pour l'expérience. Leibniz voit dans la philosophie cartésienne de l'évidence une simplification funeste dans ses conséquences scientifiques, une méthodologie approximative.

Le formalisme logique, autant que la philosophie de la connaissance approchée d'un Bachelard, auront retenu la leçon leibnizienne, et le XX^e s. en général est globalement non cartésien. Cependant, la phénoménologie de Husserl a reconnu dans Descartes l'effort pour méditer sur l'expérience en un sens non scientifique, mais qui constitue le fondement même de toute expérience d'objet : en tant qu'il est visé dans une perspective théorique, l'objet est saisi dans une évidence propre, selon son idée, et cette « intuition eidétique » constitue le fondement de toute approche empirique ultérieure. La réflexion sur le fondement de la logique a reconnu en Descartes un fondateur, même si les progrès scientifiques décisifs se sont accomplis grâce au formalisme leibnizien (calcul infinitésimal).

► BACHELARD G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1968. — BELAVAL Y., *Leibniz critique de Descartes*, Paris, Gallimard, 1960 (rééd., 1970). — DESCARTES R., *Discours de la méthode*, comm. É. Gilson, Paris, Vrin, 1987 ; *Œuvres et lettres*, Paris, Gallimard, 1953 (*Règles pour la direction de l'esprit*, p. 37 à 119 ; *Principes de la philosophie*, p. 571 à 673). — HUSSERL E., *Idées directrices pour une phénoménologie*, Paris, Gallimard, 1950 (notamment III^e section, chap. 1, § 69 : Méthode pour saisir les essences avec une clarté parfaite). — LEIBNIZ, *Discours de métaphysique*, 6^e éd., Paris, Vrin, 1970 ; *Nouveaux essais sur l'entendement humain*, Paris, Garnier-Flammarion, 1990.

François GUÉRY

→ A priori ; Cartésianisme ; Déduction ; Descartes ; Donné ; Fait ; Nécessité ; Phénoménologie ; Pragmatisme ; Preuve ; Rationalisme.

ÉVOLUTIONNISME

BIOLOGIE

Évolutionnismes

En toute rigueur, le mot « évolutionnisme » n'apparaît qu'à la fin du XIX^e s., pour désigner la philosophie de Spencer. Toutefois, une fois présent dans le lexique moderne, le mot s'est vite émancipé de cette référence, pour deux raisons. En premier lieu, ce n'est pas avec Spencer que l'évolution est devenue pour la première fois l'objet d'une réflexion radicale. Le mot était d'usage courant dans les sciences de la vie depuis la fin du XVII^e s. et, alors synonyme de développement, il a suscité d'impressionnantes spéculations métaphysiques. Par ailleurs le sens le plus ancien du mot évolution dans

les sciences de la vie (déroulement de ce qui est enroulé) renvoie lui-même à des doctrines philosophiques et théologiques de l'Antiquité, doctrines dont l'esprit était de représenter l'univers comme déploiement de formes préfigurées dans des « semences ». Cette vaste tradition se prêtait, évidemment, à être rétrospectivement captée dans les filets d'une pensée « évolutionniste ». La philosophie de Spencer en est d'une certaine manière l'aboutissement, quoiqu'au prix d'un retournement conceptuel important. Nous appellerons « évolutionnisme [1] » (E1) l'immense cortège philosophico-théologique qui, au prix de beaucoup de rebondissements et de renversements de sens, s'étend de la théorie métaphysique des raisons séminales des Stoïciens à la philosophie de Spencer.

En second lieu, en dépit ou à cause du succès fabuleux de l'œuvre philosophique de Spencer de son vivant, les termes d'évolution et d'évolutionnisme se sont trouvés investis d'une autre signification par le public savant aussi bien que populaire. Spencer était contemporain de Darwin, qui a résisté autant qu'il a pu à la désignation de sa théorie de la « modification des espèces » sous le nom d'évolution. Vers 1870 cependant, les choses étaient entendues : évolution signifiait désormais « évolution des espèces » (*i.e.* transmutation des espèces) ; quant à l'évolutionnisme, c'était désormais le nom de la théorie de l'évolution organique. Nous appellerons « évolutionnisme [2] » (E2) le champ d'investigation biologique nouveau qui s'est constitué dans la seconde moitié du XIX^e s. sous l'impulsion de Darwin, et l'ensemble des controverses théoriques fondamentales qui l'ont fait vivre. Beaucoup de biologistes — en particulier français — ont tenté d'imposer d'autres mots, étymologiquement mieux adaptés (comme par exemple « transformisme »), mais rien n'y a fait. Pour le commun des mortels l'évolutionnisme c'est aujourd'hui principalement sinon exclusivement la théorie de l'évolution biologique.

Enfin le succès de cet « évolutionnisme biologique » a été tel qu'il a suscité dans les sciences humaines et en philosophie le projet de reformuler toutes sortes de questions anthropologiques à la lumière de l'évolution des espèces vivantes. Ainsi parle-t-on abondamment aujourd'hui d'éthique évolutionniste (ou « évolutionnaire »), d'épistémologie évolutionniste, d'économie évolutionniste. De là un troisième sens du mot « évolutionnisme », qui par certains côtés rappelle la philosophie synthétique de Spencer (soucieuse de reconstruire la philosophie entière au travers du concept d'évolution), mais s'en distingue en ce que cette entreprise est aujourd'hui fondée sur l'idée que les schèmes darwiniens méritent d'être étendus au-delà de la sphère de l'évolution des espèces. Ces entreprises spencéro-darwiniennes contemporaines seront classées sous la rubrique « évolutionnisme [3] » (E3).

« Évolutionnisme [1] » ou évolution

L'évolutionnisme de Spencer n'est pas le départ, mais le dernier terme connu d'un genre de philosophie

naturelle qui plonge ses racines dans l'Antiquité. Il faut pour saisir ce point admettre qu'une tradition de pensée, à la différence d'une tragédie classique, ignore l'unité de temps et de lieu, et autorise des rebondissements dans l'action qui vont jusqu'au retournement du sens des mots et à l'inversion du contenu des concepts fondamentaux, l'objectif — répondre à un certain genre de question — demeurant cependant le même. Dans le cas de l'évolution, l'objectif est de construire une vision philosophique globale de l'histoire de la nature.

Dans les langues latines et en anglais, « évolution » se ressent encore de son origine latine. Le terme latin *evolutio* est dérivé du verbe *evolvere*, qui signifie « dérouler », « faire sortir quelque chose d'une autre chose qui l'enveloppe », ou encore « expliquer », c'est-à-dire déplier quelque chose qui est plié. Lorsque Cicéron parle de « l'évolution des poètes » (*poetarum evolutio*), ce n'est pas pour évoquer l'histoire personnelle de ceux-ci, mais la lecture de leurs œuvres (l'action de « dérouler » ou « parcourir » l'œuvre du poète). De cette lointaine étymologie, il nous reste une vague familiarité, que l'on saisit lorsqu'on rapproche évolution d'autres mots de même racine : une évolution est le contraire d'une involution (dégénération, retour en arrière), et elle n'est pas non plus la même chose qu'une révolution (parcours complet d'un cycle). Pour autant que l'image sous-jacente au concept d'évolution soit cohérente, elle devrait permettre de se représenter un déroulement indéfiniment continué de quelque chose. Ce n'est pas une opération simple. D'autres mots ont d'ailleurs joué exactement le même rôle dans l'histoire des idées, avec exactement les mêmes limites. Développement et explication sont des synonymes classiques d'évolution dans la langue savante. Un développement est le contraire d'un enveloppement ; il consiste à libérer quelque chose de ses enveloppes pour le faire apparaître. Une explication (*ex-plicatio*) consiste à déplier ce qui était replié sur soi. De là le sens métaphysique de la notion, jadis pointé par Pierre Duhem, orfèvre en étymologie philosophique : « Expliquer, *explicare*, c'est dépouiller la réalité des apparences qui l'enveloppent comme des voiles, afin de voir cette réalité nue et face à face » (*La théorie physique*, 1914, I, 1, 1).

Il nous faut cependant une première fois dissocier partiellement le mot du concept. Pour des raisons que l'on précisera bientôt, ce n'est guère qu'au XVII^e s. qu'évolution et développement deviennent des termes conventionnels importants dans les sciences et dans la philosophie. Les sources conceptuelles lointaines de ces termes, et des images qu'ils véhiculent, sont cependant bien connues. Étienne Gilson a parfaitement résumé ces origines. Sous le concept-image de l'évolution (déroulement de l'enroulé), il faut reconnaître « [les] *logoi spermatikoi* stoïciens, devenus les *rationes seminales* [raisons séminales] de saint Augustin, de saint Bonaventure et de Malebranche, bref la notion adoptée par tous ceux qui veulent rendre absolument sûr que l'acte divin étant une fois accompli, rien de nouveau ne s'est ajouté à la nature créée. Saint

Augustin aimait à citer le texte de *L'Écclésiastique* (18 : 11) : *Creavit Deus omnia simul* [Dieu a tout créé en même temps]... Au lieu de comprendre que Dieu avait tout créé "sans exception", Augustin et son école entendaient que tout ce qui a jamais été, est ou sera, a été créé sous une forme latente, invisible, dès le temps de la création qui fut le moment d'un clin d'œil. Puisque tout s'est développé à partir de là, c'est une vraie doctrine de l'évolution entendue en son sens naturel d'un déjà donné. C'est pour exclure l'apparition possible de quelque chose de nouveau, qui accéderait à l'être sans avoir été créé, que cette doctrine des raisons séminales a été conçue » (Gilson, 1971, 84). Gilson enferme peut-être un peu vite la généalogie philosophique du concept d'évolution dans une problématique de la création divine : comme il le mentionne d'ailleurs lui-même, ce sont les Stoïciens qui ont les premiers forgé la notion de raisons séminales des choses. Du moins le vaste panorama philosophico-théologique qu'il révèle a-t-il le mérite de convaincre que, d'un point de vue conceptuel, l'histoire de l'évolutionnisme en tant que vision de la nature a commencé avant que le mot même d'évolution ne soit devenu banal dans la langue savante, donc avant que ce mot n'ait pris les connotations biologiques qui précisément marquent son entrée dans le vocabulaire savant du XVIII^e s.

Cette histoire a souvent été racontée. Dans les années 1600 à 1630, divers naturalistes et médecins introduisent le terme et la notion de préformation comme solution théorique au problème de la génération des êtres vivants. Il s'agit surtout de sortir des difficultés insurmontables de la doctrine aristotélicienne de l'animation de la semence. La tradition médicale péripatéticienne voulait en effet que la semence ne fût pas à proprement parler un être vivant (un être animé), mais un véhicule ou support transitoire des âmes et facultés du géniteur, ayant le pouvoir d'informer la matière qui donnera l'embryon. La théorie de la préformation consiste à établir un lien beaucoup plus direct entre le géniteur et la progéniture. Elle consiste à dire que « la vraie formation de l'être vivant se [fait] dans le corps du géniteur, grâce à son âme » (Roger, 1971). La semence cesse alors d'être une matière homogène, elle est engendrée, non engendrante, et elle a tous les caractères organisationnels du futur embryon. Ce schéma conceptuel a trouvé dans l'image végétale de la graine son image-fétiche : dans une graine, la plante est contenue en petit. Le préformisme consiste à étendre ce mode d'intelligibilité à l'ensemble des vivants, en disant que les semences des animaux (sperme et/ou semence femelle) se comportent comme les « semences » (graines) des plantes. Dans tous les cas, la vraie génération est la formation de la semence. L'œuf de la poule, par exemple, contient un animal en petit, normalement constitué. Cette affirmation s'accorde d'ailleurs avec ce que les plus belles observations embryologiques de l'époque suggèrent, en particulier les magnifiques planches de Fabricius sur le développement de l'œuf de poulet.

La théorie de la préformation impliquait que le développement embryonnaire ne fût plus lui-même une formation, mais un simple grossissement des parties. Au cours du XVII^e s., divers termes conceptuels furent introduits qui consolidèrent ce schéma théorique. Le philosophe et théologien Malebranche proposa le terme de « germe » pour exprimer le caractère exceptionnel de la semence. Les termes d'évolution et de développement furent conventionnellement adoptés pour expliciter une représentation de l'embryogenèse dans laquelle le processus apparent de formation se trouve réduit à l'idée d'un déploiement géométrique de quelque chose qui était déjà là et organisé. En réaction au préformisme, Harvey introduisit le concept d'épigénèse, dont l'étymologie indique une représentation de la formation de l'embryon dans laquelle des parties authentiquement nouvelles se construisent de manière successive. Descartes prit le parti de Harvey, considérant sans doute que la préformation, loin d'ébranler la théorie aristotélicienne de la génération, cherchait à la sauver.

Dans la seconde moitié du XVII^e s., la théorie de la préformation se radicalise sous la forme de la théorie de la préexistence (ou emboîtement) des germes. Cette radicalisation se fait au prix d'un retournement conceptuel important. La théorie de la préexistence des germes consiste en effet à nier qu'il y ait authentique formation des germes dans la nature. Tout germe est supposé lui-même avoir été préformé dans les germes du géniteur dont il provient. Ainsi les germes s'emboîtent-ils comme des poupées russes. Cette vision de la génération, outre qu'elle paraît *a priori* plus compatible avec la vision mécanique de l'univers que l'épigénèse, a une implication théologique évidente : toute genèse se trouve reportée dans un acte originaire de création divine. Malebranche a exprimé avec une force particulière cet aspect des choses : « Tous les corps des hommes et des animaux, qui naîtront jusqu'à la consommation des siècles, ont peut-être été produits dès la création du monde ; je veux dire, que des femelles des premiers animaux ont peut-être été créées, avec tous ceux de même espèce qu'ils ont engendrés, et qui devraient s'engendrer dans la nuit des temps » (*La Recherche de la Vérité*, 1674, I, vi, § 1). Leibniz, embarrassé par l'aspect métaphysique et théologique du problème de l'origine des formes, embrasse lui aussi la théorie du développement ou de l'évolution : « Il n'y a jamais ni génération entière, ni mort parfaite prise à la rigueur, consistant dans la séparation de l'âme. Ce que nous appelons Générations sont des développements et des accroissements ; comme ce que nous appelons Morts, sont des enveloppements ou Diminutions » (*Monadologie*, § 73).

Le débat sur la préformation et sur la préexistence des germes a constitué l'une des importantes querelles scientifiques du XVIII^e s. Les plus grands naturalistes – Boerhave, Haller, Buffon, Bonnet, Wolff – s'y sont engagés, *pro et contra*. La controverse avait deux aspects. Le premier aspect, empirique, portait sur la notion embryologique de préformation. La question

était de savoir ce que l'observation microscopique donnait réellement à voir quant aux premiers moments de l'embryogenèse. Les préformistes les plus rigoureux (en particulier Haller) s'appuyaient sur les limites techniques de l'observation microscopique : aussi longtemps que les loupes permettent de distinguer quelque chose, l'on aperçoit des structures dans la matière qui forme l'embryon. Les travaux de Wolff sur le poulet (1759) ont marqué un tournant décisif en apportant une réponse claire à cette objection. Au lieu de spéculer sur les limites du visible, et de remonter vers les étapes les plus précoces de l'embryogenèse, Wolff s'est intéressé à des phases dans lesquelles l'observation ne présentait pas d'équivoque, montrant que certaines données morphologiques indiscutables étaient incompatibles avec l'hypothèse de la préfiguration des parties. Par exemple les bords d'un organe d'abord ouvert viennent parfois à se souder ; ou bien encore, une structure peut se dissoudre pour faire place à une nouvelle. De telles observations ne sont pas compatibles avec l'hypothèse géométrique de préformation géométrique des parties. La *Theoria generationis* de Wolff, d'abord à peine discutée, a peu à peu été prise pour modèle méthodologique. Ce n'est que dans la première moitié du XIX^e s. qu'elle triompha définitivement parmi les embryologistes. Mais, curieusement, les embryologistes retiendront le terme de développement, c'est-à-dire l'un des anciens synonymes de préformation, pour désigner l'ensemble des phénomènes d'embryogenèse, eux-mêmes envisagés de manière résolument épigénétiste. C'est depuis cette époque que les anatomistes opposent (au lieu comme avant d'identifier) « développement » (genèse nouvelle de parties) et « croissance » (amplification quantitative d'une structure existante). Comme bien souvent en histoire des sciences et dans l'histoire tout court, les termes-fétiches du débat ont été appropriés par le camp des vainqueurs pour signifier leur propre vision des choses.

L'autre aspect des débats du XVIII^e s. sur la préformation et la préexistence des germes est métaphysique. C'est en lui qu'il faut voir l'origine de la notion moderne d'évolution. Sous la forme radicale de la préexistence des germes, l'hypothèse de la préformation valait comme un schéma général d'interprétation de l'histoire de la nature vivante. Charles Bonnet, théologien autant que naturaliste, a proposé dans sa *Palingénésie philosophique* (1769) une amplification métaphysique visionnaire de l'idée de préexistence des germes. Associant les notions de préformation et de chaîne des êtres, il suppose que le Créateur a initialement formé des germes de nature différente, emboîtés les uns dans les autres. Ces germes sont supposés se « développer » à des périodes successives de l'histoire de la terre, et en fonction de conditions physiques nouvelles. Ainsi apparaissent des formes toujours mieux adaptées à de nouvelles conditions. Bonnet parlait de « principe d'évolution » pour désigner cette spéculation sur le progrès universel et nécessaire des formes. Le terme de palingénésie est emprunté aux Stoïciens, qui l'utilisaient pour désigner l'éternel retour du même

(*palin* : de nouveau ; *genesis* : genèse). La palingénésie est pour Bonnet un principe de perfectionnement qui permet d'interpréter le dogme théologique de la résurrection des corps : chaque individu vivant possède en lui des germes qui lui permettent de renaître après la mort sous une forme mieux adaptée. De là des réincarnations successives de l'âme, qui font de l'histoire de la vie une ascension de la chaîne des êtres dont l'homme est le point culminant. Par ce mythe, Bonnet introduisait pour la première fois l'idée d'une temporalisation de la chaîne des êtres, qui a sans doute constitué une étape importante dans la gestation de la notion moderne de transformation des espèces. D'un point de vue sémantique, il n'y a aucun doute que c'est la radicalisation du concept de préformation sous la forme de la préexistence des germes qui a conduit à utiliser le mot d'évolution pour représenter le cortège entier des vivants dans l'histoire de la nature.

Au XIX^e s., les trois synonymes de la trilogie préformation-développement-évolution se trouvent dissociés. Préformation reste comme le nom d'une doctrine embryologique périmée et d'une spéculation métaphysico-théologique désuète. Développement devient le terme générique désignant l'ensemble des phénomènes d'embryogenèse et de formation, regardés selon une grille conceptuelle épigénétiste. Quant au terme évolution, traduction latine (*evolutio*) conventionnelle de développement, il connaît un retournement de sens comparable. Le mot en vient à désigner une généralisation philosophique de la notion d'épigénèse, et s'applique non seulement à l'histoire de la vie, mais à celle de toutes choses dans l'Univers.

C'est à Herbert Spencer (1820-1903) que l'on doit la pleine expression de ce nouveau concept d'évolution. Pour Spencer, l'évolution a vocation d'être le concept central, non d'une science particulière, mais de la philosophie en tant que « connaissance complètement unifiée » (*Premiers Principes* [1863] 1871, chap. I, § 37). La « loi d'évolution » est une loi universelle de progrès, dont voici la formulation définitive : « L'évolution est une intégration de la matière et une dissipation concomitante du mouvement ; pendant l'évolution, la matière passe d'une homogénéité indéfinie et incohérente à une hétérogénéité définie et cohérente et le mouvement conservé subit une transformation semblable » (*Ibid.*, chap. XVII, § 144). Cette « loi » fondamentale, qui est en fait une définition, était pour Spencer absolument universelle. Elle s'appliquait en droit à la genèse de l'Univers, à l'histoire de la Terre et de la vie, au développement psychologique de l'homme, et aux sociétés humaines dans toutes leurs dimensions. Puisqu'il s'agit du pilier de la première philosophie qui ait jamais été explicitement qualifiée comme « évolutionnisme », il n'est pas inutile d'en souligner plusieurs aspects remarquables.

En premier lieu, la « loi d'évolution » est un principe qui spécifie le progrès naturel comme un passage du simple au complexe, par constitution de « tous » d'un ordre supérieur. La définition des *Premiers Principes* (cf. *supra*) fait apparaître cette complexification

sous deux jours successifs. La première moitié de la phrase fait référence à « l'évolution simple », définie de manière quantitative et physique comme « intégration » de matière. Évolution s'oppose alors à dissolution. Ce concept s'applique particulièrement bien à l'histoire de l'Univers, du système solaire, de la Terre. Mais Spencer entendait lui donner une valeur plus générale : une marche de l'« incohérent » vers le « cohérent », donc vers des « tous » plus vastes. La seconde moitié de la loi renvoie à ce que Spencer appelait « l'évolution composée », c'est-à-dire le passage de l'homogène à l'hétérogène. Ce second aspect de la notion d'évolution est qualitatif. Il enveloppe l'idée d'une tendance universelle à l'individualisation croissante, qui se traduit par la formation de petits tous dans le grand tout infini, autrement dit par une complexité de nature relationnelle. L'évolution composée est une redistribution de matière.

En second lieu, Spencer était conscient de l'inversion de sens qu'il faisait subir au concept d'évolution : « Le mot évolution a d'autres sens dont quelques-uns ne s'accordent pas avec celui qui vient de lui être donné et dont d'autres lui sont même directement opposés. [...] Au sens ordinaire, évoluer, c'est se déplier, s'ouvrir, s'épancher, projeter dehors ; tandis que, comme elle est ici comprise, l'évolution, bien qu'impliquant l'accroissement d'un agrégat concret et qu'elle en soit par là une expansion, implique que la matière composante passe d'un état plus diffus à un état plus concentré [...]. Le mot antithétique involution exprimerait mieux la nature du changement et en décrirait mieux les caractères secondaires dont nous allons nous occuper. Nous sommes pourtant obligés, malgré le risque de confusion qui résulte de ces significations diverses et contradictoires, d'employer le mot évolution comme opposé au mot dissolution » (*Ibid.*, chap. XII, § 97). En faisant de l'évolution un principe universel de différenciation, Spencer élevait l'émergence de nouveauté au rang de principe cosmologique. Il entérinait ainsi au niveau du discours philosophique le renversement de sens opéré par les embryologistes dans leur propre champ : le principe spencérien d'évolution peut être compris comme une généralisation du concept d'épigenèse (Canguilhem *et al.*, [1962], 1985), et donc comme la récusation solennelle, par un philosophe, de toute vision préformiste, ou préordonnée, du cosmos.

C'est en effet un troisième caractère remarquable de la loi spencérienne de l'évolution que de se donner comme une loi de la « matière ». L'enjeu métaphysique de cette loi n'est rien d'autre que celui-ci : il s'agissait de récuser toute conception de la genèse des formes qui résorberait celles-ci dans un pouvoir transcendant de formation, autrement dit dans un acte de création. L'évolution spencérienne est exactement le contraire de l'évolution des philosophes des XVII^e et XVIII^e s. Emmanuel Kant, dans la *Critique de la Faculté de juger*, avait superbement donné la formule classique de l'évolution : « Les défenseurs de la théorie de l'évolution... enlèvent tout individu à la force formatrice de la nature, pour le faire surgir directement de la main du

Créateur » (1790, § 81). À quoi Spencer répond comme en écho : « L'individualisation progressive peut être donnée comme la marque commune de l'évolution sous toutes ses formes. Partout dans la nature de petits tous se forment dans le grand tout infini, chacun ayant ses relations de solidarité avec le monde qui l'entoure » (*Principes de Psychologie*, 1855).

Tel est le sens profond de la première philosophie qui se soit donnée explicitement comme un « évolutionnisme ». Sous cette désignation, il s'agissait de récuser la tradition de pensée qui d'Augustin à Malebranche et Bonnet, et sous de multiples formes successives, s'était efforcée de réduire toute émergence de nouveauté dans la nature au « déroulement » d'un ordre existant de toute éternité (que cette préordination soit immanente, comme dans le stoïcisme, ou due à un acte de création simultanée, comme chez Augustin). Désignation paradoxale, car en toute logique, c'est cette doctrine de la préordination de toutes choses qui eût dû être qualifiée d'évolutionniste dans l'histoire de la philosophie antique, médiévale et classique.

« Évolutionnisme [2] » : évolution biologique

S'il nous est aujourd'hui difficile de percevoir la remarquable continuité de l'histoire qui conduit de la représentation antique de la nature à l'évolutionnisme de Spencer, c'est parce qu'à la fin du XIX^e s. les mots d'évolution et d'évolutionnisme se sont trouvés identifiés, par une curieuse ironie de l'histoire, à la théorie darwinienne de la modification des espèces.

On l'a souvent dit : Darwin n'emploie pas une seule fois le mot « évolution » dans la première édition de *L'Origine des espèces*. Ce n'est que dans la sixième et dernière édition de ce livre (1872) qu'il utilise le mot, dans la conclusion de l'ouvrage, et avec la signification que le public lui avait donnée depuis bien longtemps : celle d'une théorie transformiste des espèces. Voici ce passage : « J'ai causé autrefois avec beaucoup de naturalistes sur l'évolution, sans rencontrer jamais le moindre témoignage sympathique. Il est probable pourtant que quelques-uns croyaient alors à l'évolution, mais ils restaient silencieux, ou ils s'exprimaient d'une manière tellement ambiguë, qu'il n'était pas facile de comprendre leur opinion. Aujourd'hui, tout a changé, et presque tous les naturalistes admettent le grand principe d'évolution » (Darwin, [1872], 1876, chap. 15). La traduction de Barbier est tout à fait conforme à l'original anglais. Darwin dit bien « evolution » dans le passage en question, et dans lui seul. D'autres ouvrages de la même époque (*Descendance de l'homme*) et la correspondance montrent cependant qu'il s'était rangé à l'usage général, en dépit de ses propres réticences et de l'amertume de Spencer, qui voyait le mot-clef de son système philosophique lui échapper pour devenir le nom d'une théorie scientifique spéciale.

De nombreux historiens des sciences et de la philosophie (voir par exemple Gilson, 1971, particulièrement éloquent sur ce point) ont répété cette anecdote,

qui est littéralement exacte si l'on se limite à l'usage darwinien du substantif « évolution ». L'interprétation la plus répandue est que le public aurait plus ou moins identifié les deux auteurs en raison de l'anticréationnisme qu'ils affichaient tous deux, l'un sur le mode d'une thèse philosophique générale, l'autre dans le cas spécial d'une théorie scientifique donnée – la théorie de l'origine des espèces. Cette interprétation est raisonnable, mais il ne faut pas la développer au point d'affirmer que le langage darwinien excluait initialement tout mode d'expression « évolutionniste ». Il suffit pour s'en convaincre de lire la phrase qui conclut *L'Origine des espèces*. Dans toutes ses éditions, le livre se conclut sur le verbe « évoluer ». Voici par exemple le texte de la première édition : « Il y a une grandeur dans cette vision de la vie, avec ses puissances originellement insufflées à un petit nombre de formes, ou même à une seule : tandis que notre planète, obéissant à la loi fixe de la gravitation, continue à tourner, une quantité infinie de formes belles et admirables n'ont cessé d'évoluer, et évoluent encore [have been, and are being, evolved] » (Darwin, 1859, notre traduction).

Curieusement, les traductions françaises donnent toutes « se développent » et non « évoluent ». Quoi qu'il en soit, il est intéressant de se demander si, par hasard, l'usage du verbe « évoluer » ne serait pas déjà, chez le Darwin de 1859, une habile capture d'un terme mis à l'honneur par Spencer dans les années 1850. Il n'en est rien. Dès *l'Essai de 1844*, ébauche en près de deux cents pages du livre de 1859, la phrase conclusive est à peu de choses près la même que dans *L'Origine*, et s'achève aussi sur le verbe « évoluer » : « Il y a une (simple) grandeur à envisager la vie, avec ses nombreux pouvoirs de croissance, de reproduction et de sensation, comme originellement insufflée dans la matière à un petit nombre de formes, peut-être même à une seule ; que, tandis que cette planète continuait à tourner suivant les lois fixes de la gravitation, et que la terre et l'eau se remplaçaient l'une l'autre, d'une origine si simple, par la sélection de variétés infinitésimales, d'innombrables formes, fort belles et merveilleuses, ont évolué » (Darwin, [1844], 1992, 193). Ces textes ont le mérite de montrer que la trajectoire historique qui conduit de « l'évolutionnisme » des théories préformistes du XVIII^e s. (E1) à « l'évolutionnisme » darwinien (E2) ne passe pas nécessairement, ou pas seulement par la philosophie de Spencer. Darwin, pour son propre compte, et dans le domaine spécifique de l'histoire de la vie, avait adopté comme bien d'autres un usage du mot « évolution » au sens d'épigenèse des formes au sein de lignages d'individus.

À partir des années 1870, en tout cas, le terme « évolution » devient essentiellement le nom conventionnel du champ de recherches ouvert par Darwin. C'est d'abord clair pour celui-ci. En 1872, il écrit à un correspondant : « J'ai décidé de ne plus perdre de temps à lire des comptes rendus de mes travaux sur l'évolution » (lettre à Wright, 6 juin 1872). C'est encore plus clair pour les darwiniens. En 1878, la neuvième édition de *l'Encyclopaedia Britannica* comporte un article

intitulé « Évolution ». L'auteur, Thomas Henry Huxley, procède à un historique des conceptions de l'évolution, c'est-à-dire des précurseurs de Darwin. En arrivant au maître, Huxley écrit : « *L'Origine des espèces* apparut en 1859, et tous ceux dont les souvenirs remontent à ce temps-là savent que désormais la doctrine de l'évolution a occupé une position et pris une importance qu'elle n'avait jamais eues. Dans *L'Origine des espèces* et ses nombreuses autres contributions à la solution du problème de l'évolution biologique, M. Darwin se borne à discuter les causes qui ont conduit, qui ont amené la condition présente de la matière vivante, en admettant que cette matière est déjà venue à existence. D'autre part, M. Spencer et le professeur Haeckel ont traité du problème entier de l'évolution » (cité dans Gilson 1971, 120). Que ce genre de propos ait été publié dans la plus illustre des encyclopédies du XIX^e s. indique clairement ce qu'était devenu « l'évolutionnisme » dans les dernières décennies de ce siècle : c'était principalement la théorie de « l'évolution biologique » et, secondairement, comme une sorte d'effet spéculatif accompagnateur, le nom de la philosophie de Spencer. Bergson, lorsqu'il publiera *L'Évolution créatrice* (1907), ne fera que confirmer cette tendance : le livre s'ouvre sur une polémique avec Spencer, mais porte tout entier sur l'évolution biologique.

Aussi est-il impossible aujourd'hui d'évoquer « l'évolutionnisme » sans prendre en compte le devenir propre des conceptions de l'évolution biologique. Dans la suite de cet article, quittant l'archéologie philosophique l'on se conformera à l'usage contemporain qui réduit le potentiel conceptuel des mots « évolution » et « évolutionnisme » à l'évolution biologique.

Il ne peut être question de relater ici en détail l'histoire des théories de l'évolution depuis Darwin. Il suffira d'en expliciter les césures philosophiques majeures, autrement dit dont le niveau d'abstraction conceptuelle est suffisant pour structurer une périodisation de « l'évolutionnisme biologique » en tant que philosophie spontanée de l'histoire de la vie. Il est inutile de commencer un tel récit avant Darwin. L'on peut sans doute rétrospectivement pointer toutes sortes de conceptions évolutionnistes prédarwiniennes, en particulier au XIX^e s. Cependant Darwin a introduit une telle systématité dans la représentation de la vie que ce n'est guère qu'à partir de lui que se structure un authentique champ de controverses sur la théorie transformiste. Avant Darwin, la question dominante était : « Les espèces se transforment-elles ? » Après Darwin, la question devient : « Comment les espèces se transforment-elles ? » La période qui va de la mort de Darwin (1882) à 1930 environ est caractérisée par l'omniprésence de grands débats doctrinaires, ouvertement spéculatifs, sur le « facteur » fondamental de l'évolution biologique. Ce débat s'est organisé de part en part relativement à Darwin, et se signale par l'inflation des « ismes ». On est là typiquement dans l'un de ces moments de l'histoire des sciences que Kuhn a caractérisé du nom de « crise », c'est-à-dire un moment

dan lequel aucun paradigme ne domine vraiment, ni d'un point de vue méthodologique, ni du point de vue de son ontologie spontanée. Cinq traditions majeures se mettent successivement en place dans le dernier tiers du XIX^e s.

Les trois premières sont le théisme évolutionniste, le néolamarckisme et l'orthogénèse. Comme l'a lumineusement montré Peter J. Bowler (1983), ces oppositions précoces au darwinisme ont été largement inspirées par des philosophes de la nature qui regardaient vers le passé. En dépit de leur âpre concurrence apparente, ces doctrines peuvent s'interpréter comme des tactiques discursives ayant même origine, et inscrites dans une matrice philosophique commune. L'évolutionnisme théiste peut être caractérisé par le postulat que la nature se développe au cours des temps selon un plan divin identifiable. Comme doctrine spécifiquement biologique, il s'est développé au milieu du XIX^e s. en référence à deux traditions de pensée. L'une est la vénérable physico-théologie, telle que William Paley l'avait revivifiée dans sa *Théologie Naturelle* de 1802. Cette tradition mettait l'accent sur les innombrables adaptations des êtres vivants, toutes conçues comme des preuves du dessin rationnel et bienveillant de Dieu. L'autre référence majeure de l'évolutionnisme théiste est la morphologie idéaliste (ou « transcendantale », ou « typologique »), dont les origines sont à chercher dans la philosophie de la nature et l'embryologie allemandes du début du XIX^e s. (Goethe, Oken, von Baer). Dans cette tradition scientifique remarquablement féconde, la preuve du dessein divin est alors trouvée dans une interprétation de la diversité des vivants comme déploiement d'un système de relations formelles. Après Darwin, c'est essentiellement cette forme du théisme évolutionniste qui s'est trouvée privilégiée par les naturalistes (Louis Agassiz aux États-Unis; Argyll, Mivart, Carpenter, Owen en Angleterre).

Le néolamarckisme et l'orthogénèse ont été principalement suscités par un dilemme auquel le darwinisme a confronté l'évolutionnisme théiste. Avant Darwin, en effet, l'argumentation adaptationniste et l'argumentation morphologique étaient deux voies également plausibles pour établir l'existence d'un plan ordonnateur dans l'histoire des espèces : si, avec Agassiz et Owen, les arguments morphologiques prennent le pas sur ceux de la vieille théologie naturelle, c'est parce qu'ils semblent démontrer avec plus de rigueur la sagesse et la rationalité du créateur. Or Darwin ramène au premier plan le concept d'adaptation : l'adaptation est l'effet direct du processus de sélection naturelle, tandis que la diversité des formes en est l'effet lointain. L'évolutionnisme théiste se trouvait ainsi menacé sur deux fronts : d'une part les adaptations sont expliquées par autre chose qu'un plan, puisqu'elles résultent d'un processus de tâtonnement ; d'autre part la subordination du problème de la classification à celui de l'adaptation menace la représentation de l'histoire de la nature comme un développement ordonné.

Deux échappatoires étaient concevables. La première

était de renforcer la ligne d'argumentation morphologique, en l'affranchissant de toute considération adaptationniste : il suffisait de dire que l'adaptation n'est qu'un phénomène secondaire, et que l'essentiel de l'évolution biologique se manifeste dans de grandes tendances de nature non adaptative, canalisées par des contraintes structurales. Pour autant que ces tendances soient progressives, il y avait là occasion de préserver la représentation de l'évolution organique comme développement prédéterminé d'un plan créatif. Ce thème est banal dans la littérature naturaliste postérieure à l'*Origine des espèces*. Détaché de son contexte théologique, il a donné lieu à la notion d'orthogénèse, c'est-à-dire la notion d'une tendance évolutive interne qui emporte les lignées évolutives dans des directions indépendantes des sollicitations de l'environnement. Le mot d'orthogénèse fut introduit par Wilhelm Haacke en 1893, en référence à des conceptions apparues dans les années 1830.

La seconde manière de sauver le dessein créateur était d'expliquer l'adaptation autrement que Darwin. Bowler montre très bien que beaucoup d'évolutionnistes, particulièrement en Angleterre et en Amérique, ont adopté l'idée d'hérédité des caractères acquis comme facteur principal de l'évolution organique, parce qu'elle faisait subtilement place à une téléologie que le darwinisme excluait. Samuel Butler s'est fait l'infatigable propagandiste de cette idée, en faisant valoir que si la vie a le pouvoir de réagir positivement aux défis de l'environnement, elle peut être pensée comme une force finalisée injectée par le Créateur dans la Nature. Les néolamarckistes américains ont de leur côté construit l'école qui porte ce nom, avec le souci explicite de défendre la théologie naturelle. Le terme même de néolamarckisme est dû à Packard, en 1885.

Les deux écoles antidarwiniennes majeures de la fin du XIX^e s. ne sont donc pas sans lien avec une philosophie de la nature largement tournée vers le passé. Toutes deux mises en place dans les années 1880, ces deux sensibilités ont contribué sous des formes diverses à structurer la représentation globale de l'évolution biologique jusque dans les années 1930.

La quatrième grande école évolutionniste postdarwinienne a consisté dans un durcissement de la représentation darwinienne de l'évolution. Le principal artisan fut le zoologiste allemand August Weismann. Dans un célèbre essai de 1883 (« De l'hérédité »), Weismann a proposé de radicaliser l'interprétation darwinienne de l'évolution, et en particulier des adaptations, en excluant toute référence à l'hérédité des caractères acquis, ou à quelque facteur autre que la sélection naturelle comme mécanisme responsable de l'orientation du changement des espèces. Dans la polémique qui l'a opposé aux darwiniens orthodoxes, Weismann, qui se réclamait du principe de suffisance explicative du principe de sélection naturelle, a été qualifié par ses adversaires d'« ultra-darwinien ». Par la suite, « ultra-darwinisme » a été remplacé par « néodarwinisme ». À la fin du XIX^e s., « néodarwinisme » était le nom d'une doctrine pan-adaptationniste de l'évolution, qui

d'une part récusait sans concession tout mécanisme d'hérédité des caractères acquis, d'autre part n'admettait que la sélection naturelle comme principe explicatif pertinent de l'adaptation. Ce « nouveau » darwinisme, fortement implanté chez des naturalistes ouvertement matérialistes, avait des relents de théologie naturelle laïcisée, dans la mesure où il invitait à voir en tout phénomène biologique une adaptation. C'est là un élément parmi d'autres dans le déclin du darwinisme au début du XX^e s., particulièrement chez les biologistes expérimentalistes.

Au tournant du XX^e s., une cinquième et dernière grande attitude doctrinaire apparaît, le mutationnisme. Le mutationnisme a accompagné les grandes découvertes expérimentales qui, autour des années 1900, ont placé sous un jour nouveau les phénomènes d'hérédité et de variation. Le mutationnisme consistait à dire que les races et les espèces se formaient, non de manière graduelle et adaptative comme le voulaient les darwiniens et les néolamarckiens, mais en vertu de modifications héréditaires apparaissant de manière soudaine dans les lignées. Le mutationnisme a d'abord constitué dans les années 1900 un courant de pensée favorable au développement de la génétique mendélienne. Mais assez vite le développement de la génétique, et en particulier de la génétique des populations, s'est révélé fatal à cette doctrine de l'évolution, dans la mesure où le mendélisme a conforté la notion darwinienne d'évolution graduelle des espèces et rendu très problématique, dans la plupart des cas, la représentation saltationniste de l'évolution des espèces.

À partir des années 1920, et surtout 1930, le paysage de l'évolutionnisme biologique change radicalement. Aux grands débats doctrinaires a succédé une vision beaucoup plus homogène du champ évolutionniste. Cela tient fondamentalement à l'adoption par les biologistes de l'évolution de l'interprétation mendélienne des variations héréditaires, et de son prolongement naturel, la génétique des populations. Dans celle-ci, la transformation d'une espèce se présente sous la forme d'un changement dans la fréquence des gènes et des génotypes au sein d'une population. Ce changement peut résulter de plusieurs facteurs, comme par exemple les mutations récurrentes, les migrations, la sélection naturelle ou sexuelle, ou des effets stochastiques (dérive génétique). Du point de vue de leurs causes, ces phénomènes renvoient à divers niveaux de structuration des phénomènes biologiques (cytologie, structure de la population, système de croisement, etc.). Mais du point de vue de leurs effets, ils se laissent exprimer dans l'idiome commun de la génétique des populations. Dans ce cadre théorique, il n'y a aucun sens à se demander si l'évolution biologique repose sur l'opération d'un facteur unique plutôt que d'un autre. Divers facteurs interviennent, dont le poids respectif est fondamentalement une question empirique. Tout ce que l'on peut préciser, c'est dans quelles conditions, par exemple, le changement évolutif sera principalement contrôlé par la pression de mutation ou par la pression de sélection.

La « synthèse moderne » (ou « théorie synthétique de l'évolution ») n'a pas été à proprement parler une nouvelle théorie de l'évolution. C'est plutôt un large consensus méthodologique qui s'est établi dans les années 1930-1950 entre les acteurs des nombreuses sous-disciplines engagées dans la description et l'explication de l'évolution biologique (en particulier la génétique, la zoologie, la botanique, la paléontologie, l'écologie, la biogéographie). Ce consensus consistait à admettre : 1) que tout changement évolutif repose sur des variations descriptibles en un langage génétique, en sorte que le processus de base de l'évolution est le changement de la composition génétique des populations ; 2) que ce changement génétique est principalement canalisé par la sélection naturelle ; 3) que les processus d'ordre supérieur (spéciation, et phénomènes macroévolutifs) doivent au minimum être compatibles avec les mécanismes génétiques connus (Mayr, in Mayr & Provine, 1980, 1).

Bien des controverses se sont développées depuis les années 1970 sur la pertinence de la synthèse moderne. Il faut bien reconnaître cependant que les évolutionnistes d'aujourd'hui, dans leur immense majorité, travaillent toujours dans l'esprit méthodologique qui vient d'être décrit, quitte à diversifier les angles d'attaque des problèmes empiriques. La grande césure marquée que représente la synthèse moderne consiste moins dans une doctrine particulière que dans l'abandon du style de recherche et d'argumentation qui caractérise la période post-darwinienne. À un style spéculatif et polémique a succédé une approche beaucoup plus empirique des problèmes, sur la base de quelques certitudes méthodologiques solidement ancrées. D'un point de vue épistémologique, l'évolutionnisme contemporain est moins une théorie qu'un ensemble complexe de sous-théories qui sont autant de paradigmes de travail, et pour lesquelles l'unité globale de la théorie de l'évolution n'est plus un problème scientifique prioritaire, mais un problème qui relève plutôt de la sociologie des communautés scientifiques. Depuis la fin des années 1940, l'évolutionnisme s'est professionnalisé (Ruse, 1996). Il a ses sociétés savantes, ses journaux, ses laboratoires, ses chaires, ses manuels, spécifiques. L'on peut s'en réjouir ou le regretter : l'évolution est aujourd'hui l'objet d'une spécialité, et a ainsi partiellement perdu le statut d'une question discutée par tout biologiste, et *a fortiori* par tout savant ou philosophe.

L'« évolutionnisme [2] » est de la sorte aux antipodes de « l'évolutionnisme [1] », en ce que la philosophie, quoiqu'elle soit omniprésente dans les deux cas, n'y joue pas le même rôle. E1 est fondamentalement le nom d'une entreprise philosophique. E2 est accompagné de philosophie.

« Évolutionnisme [3] » : anthropologie évolutionniste

Le succès de l'évolutionnisme biologique a été tel qu'il a suscité des entreprises de reconstruction des disciplines anthropologiques sur son modèle. La terminologie est transparente : « éthique évolutionniste »,

« épistémologie évolutionniste », « économie évolutionniste », « conception évolutionniste de la culture ». Dans tous ces cas l'on voit des secteurs importants de l'anthropologie scientifique ou philosophique chercher à se constituer, soit comme un élargissement de la science de l'évolution biologique, soit par transfert de concepts et de méthodes, la théorie de l'évolution biologique étant prise pour modèle. Dans la plupart des cas, c'est au paradigme darwinien que l'on se réfère.

L'exemple le plus ancien de cette contagion évolutionniste est celui de la « morale (ou éthique) évolutionniste ». Dans sa forme la plus traditionnelle, l'éthique évolutionniste consiste à inférer de l'évolution à la morale, autrement dit à ériger le principe de la lutte pour l'existence en fondement de la morale. On reconnaît ici ce qu'il est convenu d'appeler le darwinisme social, qui n'est cependant pas une création de Darwin, mais une élaboration de Spencer, le premier auteur à avoir jamais publié un texte intitulé « *Evolutionary Ethics* » (1893). L'un des livres de Spencer a d'ailleurs été traduit en français sous le titre *La morale évolutionniste*. L'éthique évolutionniste d'inspiration spencérienne part de l'idée que le monde organique est *de facto* en proie à la lutte pour l'existence, et que la concurrence vitale a produit au cours de l'évolution des organismes mieux adaptés, plus complexes, et plus autonomes. Les adeptes du darwinisme social concluent alors du fait au droit : puisque la concurrence vitale a été un facteur de progrès dans l'évolution, il convient d'en faire une norme parmi les hommes.

Une autre variété de l'éthique évolutionniste a ses sources dans la pensée même de Darwin. L'on peut justement parler à son propos d'« éthique darwinienne » (Ruse, 1986). Elle part de l'idée que les comportements moraux ne peuvent pas être compris seulement comme des produits de l'histoire culturelle, mais reposent aussi sur des dispositions construites par la sélection naturelle. L'homme apparaît alors comme un « animal éthique » dont les comportements coopératifs et altruistes s'expliquent par leur valeur de survie présente ou passée. L'explication fait appel tantôt à des tendances innées (par exemple en matière de comportement parental), tantôt à l'idée d'un altruisme réfléchi, lié aux capacités de communication et de raisonnement de l'espèce humaine. Ce genre de réflexion a d'abord été développé par Charles Darwin dans *La descendance de l'homme* (I, chap. III-V). Un grand nombre de biologistes darwiniens ont repris, et parfois approfondi, cette interprétation adaptationniste des comportements humains. La plupart des synthétistes l'ont popularisée, dans les années 1950 et 1960 (par exemple, pour ne citer que les plus célèbres : B. Rensch, J. Huxley, Th. Dobzhansky, C.H. Waddington, G.G. Simpson, G.L. Stebbins). La sociobiologie humaine a donné un exemple plus récent de cette forme de pensée.

Tout comme l'éthique évolutionniste, l'épistémologie évolutionniste revêt deux sens différents. Tantôt il s'est agi de construire une théorie de l'évolution de la

connaissance scientifique fondée sur l'idée qu'elle est déterminée par un mécanisme de même nature que la sélection naturelle. Tantôt il s'agit de comprendre l'évolution biologique des systèmes cognitifs. L'épistémologie évolutionniste consiste donc, soit à transposer le mécanisme de sélection naturelle dans la sphère de l'évolution culturelle, soit à faire jouer le principe de sélection naturelle de manière littérale en vue d'expliquer les contraintes qui pèsent sur les systèmes cognitifs animaux en général, et humain en particulier.

Dans sa version métaphorique, l'épistémologie évolutionniste a son origine dans une proposition du philosophe des sciences Stephen Toulmin, formulée dans les années 1960. Toulmin soutient que l'évolution conceptuelle de la science est objectivement produite par un processus de sélection. À sa suite, de nombreux philosophes, dont Karl Popper (1972), ont emboîté le pas. L'on ne compte plus les études qui se sont efforcées de définir et d'approfondir de manière précise le parallélisme entre évolution organique et évolution conceptuelle de la science. Le philosophe qui a été le plus loin dans cette voie est probablement David Hull (1988). Hull soutient que le changement scientifique peut être vu comme un processus de sélection d'éléments tels que des problèmes et leurs solutions possibles, des données, des croyances sur le but de la science. Ces éléments, dont le rôle est analogue à celui des gènes dans la théorie de l'évolution biologique, sont répliqués dans des conversations, des livres, des publications, des cerveaux humains. Par ailleurs, ils interagissent indirectement, avec les portions du monde auxquels ils se réfèrent, par le biais d'actes matériels et communicatoires réalisés par les scientifiques. Des variants surgissent, qui ont un taux de diffusion, dans des conditions de milieu scientifique données, et se prêtent donc à une caractérisation dans le langage de la sélection naturelle.

L'autre forme de l'épistémologie évolutionniste a une origine plus ancienne, que l'on fait remonter à un article publié par Konrad Lorenz (1941). Le biologiste autrichien y propose de réinterpréter la notion kantienne d'*a priori* à la lumière de la biologie contemporaine. L'épistémologie évolutionniste développée dans le sillage de Lorenz vise à expliquer l'existence et la diversité des systèmes cognitifs animaux à partir de leur valeur de survie, dans des niches écologiques définies. Dans le cas de l'homme, ce programme de recherche s'attache à reconnaître les « universaux biologiques » qui structurent la perception et la connaissance humaines. Les études les plus significatives ont porté sur les schémas transculturels de classification ou de causalité (Atran, 1986). Leur valeur adaptative a sans doute été immense dans l'histoire de l'humanité, même s'ils nous posent aujourd'hui de sérieux problèmes dans des secteurs de science peu intuitifs.

Deux derniers aspects de l'anthropologie évolutionniste doivent enfin être mentionnés. Il existe des conceptions « évolutionnistes » de la culture. Comme dans le cas de l'éthique et de l'épistémologie

évolutionnistes, il en existe une version métaphorique et une version littérale. L'approche littérale s'efforce d'ancrer l'histoire de la culture, ou certains de ses aspects, dans l'évolution biologique. La sociobiologie en est l'exemple le mieux connu. L'approche métaphorique, moins agressive, et plus formelle dans ses méthodes, s'efforce de montrer que certains aspects du changement culturel peuvent être modélisés à l'aide d'outils empruntés à la biologie évolutive des populations. En particulier il est intéressant de distinguer les items culturels qui se transmettent de façon « verticale » (par exemple dans les relations parents-enfants, ou maître-élève) et ceux qui se transmettent de façon horizontale (contagion d'idées et de pratiques). On peut appliquer à ces phénomènes des traitements formels qui révèlent des processus et des contraintes inaccessibles à l'intuition directe (Cavalli-Sforza & Feldman, 1981).

La « théorie évolutionniste du changement économique » est née dans des conditions sensiblement différentes des trois projections anthropologiques du darwinisme qu'on vient d'analyser. Cette théorie, ou plus exactement ce programme de recherche, a ses origines dans les années 1950. Le projet a d'emblée eu la signification d'une alternative théorique à la conception néoclassique de l'économie. Celle-ci admet comme postulat fondamental que les agents économiques (individus, firmes, organisations diverses) se comportent comme des agents rationnels qui maximisent leur profit. L'approche évolutionniste considère que ce postulat de rationalité est une idéalisation qui néglige le fait que les acteurs sont souvent mal informés (par rapport à une situation optimale), qu'ils agissent parfois en vertu de motifs économiquement non rationnels, et qu'ils prennent toujours leurs décisions dans un contexte d'incertitude (Alchian, 1950). La théorie économique est alors reconstruite autour de l'idée que le comportement des agents (en général des firmes) est à tout moment et en grande partie déterminé par un ensemble de capacités et de règles de décision doté d'une relative continuité. « Avec le temps, ces capacités et règles sont modifiées de manière tantôt délibérée, tantôt aléatoire. Avec le temps, le marché — analogue de la sélection naturelle — détermine quelles firmes sont profitables ou non, ce processus tendant à éliminer celles qui ne le sont pas » (Nelson & Winter, 1982, 4). La théorie économique est ainsi conduite à accorder une importance fondamentale à l'aspect technologique du changement économique, la « technologie » étant d'ailleurs prise en un sens large, à savoir l'ensemble des « routines » de production, investissement, et diversification qui, régulièrement transmises et graduellement modifiées au cours de l'histoire de l'entreprise, concourent à leur succès. L'analogie avec la sélection naturelle biologique est poussée très loin : de même que la sélection naturelle biologique est sélection de gènes, à raison des avantages qu'ils confèrent aux individus dans une population, de même la « sélection naturelle économique » mobilise trois genres d'entités : les routines techniques de production

et de gestion, les firmes, et les populations de firmes. Les modèles économiques construits sur cette base visent à être plus réalistes que ceux de l'école néoclassique : le postulat de purs agents rationnels optimisateurs est abandonné au profit d'une vision beaucoup plus contingente de l'univers économique, où les acteurs sont toujours sous-informés, pas nécessairement de bons calculateurs, et toujours insérés dans des structures organisationnelles (privées ou publiques) dont la dimension historique (« mémoire » ou « hérédité ») pour parler métaphoriquement est essentielle.

La théorie évolutionniste de l'économie a donc consisté à construire une analogie avec la théorie biologique de la sélection naturelle, moins en vertu d'une fascination *a priori* pour celle-ci que dans le but de construire une meilleure théorie économique (sur le détail de l'analogie, voir Gayon, 1998). Il s'agissait en fait de substituer aux analogies physiques, qui dominent dans la théorie néomarginaliste, des analogies biologiques mieux appropriées à l'incertitude de l'histoire économique (Hodgson, 1993). Un remarquable cercle se réfère ainsi sur lui-même. Darwin avait pris pour modèle l'économie libérale ; celle-ci a longtemps lorgné sur les sciences physiques ; l'économie évolutionniste, à son tour, prend aujourd'hui appui sur la théorie de la sélection naturelle en tant que meilleur exemple connu de formalisation d'un processus historique contingent.

Que faut-il conclure de la multiplication de ces projections, transferts, parallélismes, entre la théorie de l'évolution biologique (presque toujours darwinienne), et divers secteurs scientifiques ou philosophiques de l'étude de l'homme ? Bien qu'il s'agisse de discours passablement différents dans leur statut épistémologique, l'épistémologie évolutionniste, la théorie évolutionniste du changement culturel et l'économie évolutionniste ont en commun deux caractères. Dans ces trois cas, le modèle darwinien est utilisé avec l'intention théorique d'introduire la dimension du « changement » dans la théorie du domaine considéré (« changement scientifique », « changement culturel », « changement économique »). En second lieu, ces programmes de recherche enveloppent un projet manifeste de naturalisation des processus historiques. Cette naturalisation ne signifie pas nécessairement réduction des processus historiques humains à des processus biologiques ; elle procède plutôt de la volonté de rendre la contingence de l'histoire humaine au moins aussi intelligible que la contingence de l'histoire naturelle de la vie. Le cas de l'éthique évolutionniste doit être mis à part. Outre son côté souvent ouvertement idéologique, c'est moins le changement actuel qui semble intéresser la plupart de ses protagonistes que l'enracinement des normes dans l'ancestralité et la fatalité biologiques.

Y a-t-il une unité des évolutionnismes ? À cette question, il faut répondre négativement. L'unité des évolutionnismes n'a de sens que dans le contexte d'EI, autrement dit dans le contexte d'un évolutionnisme ouvertement métaphysique. L'évolutionnisme métaphysique consiste

à placer l'histoire entière des choses naturelles sous la dépendance d'un principe d'évolution. L'on a vu comment au cours de l'histoire de la philosophie cette évolution a été successivement pensée tantôt comme préformation intégrale, tantôt comme épigénèse intégrale. Ce qu'il y a de commun à Augustin, Malebranche et Spencer, c'est ce que l'on pourrait appeler un évolutionnisme cosmologique. De cet évolutionnisme cosmologique (E1) il faut distinguer l'évolutionnisme biologique (E2) dont Darwin a mis en place le paradigme dominant (E2), même s'il draine et suscite une quantité considérable de philosophie spontanée, a essentiellement le caractère d'un secteur de science empirique. Enfin, l'évolutionnisme anthropologique (E3), bien qu'il se ressent de ses origines philosophiques spencériennes, a principalement été un effet récent du succès scientifique du darwinisme dans son champ propre, l'évolution biologique. Un peu à la manière dont la mécanique gravitationnelle de Newton a servi de modèle à toutes sortes de spéculations anthropologiques au XVIII^e s., de même la théorie de la sélection naturelle est-elle aujourd'hui mobilisée avec un bonheur variable pour éclairer l'homme contemporain sur lui-même.

- ALCHIAN A., « Uncertainty, evolution, and economic theory », *Journal of Political Economy*, 58, 1950, 211-221.
 — ATRAN S., *Fondements de l'histoire naturelle. Pour une anthropologie de la science*, Bruxelles, Complexe, 1986.
 — BECQUEMONT D. & MUCCHIELLI L., *Le cas Spencer. Religion, science, politique*, Paris, PUF, 1998. — BERGSON H., *L'Évolution créatrice*, Paris, Félix Alcan, 1907. — BONNET C., *Œuvres d'histoire naturelle et de philosophie*, Neuchâtel, 19 vol., 1879.
 — BOWLER P.J., *The Eclipse of Darwinism : Anti-Darwinian Evolution Theories in the Decades around 1900*, Baltimore, Johns Hopkins Univ. Press, 1983 ; *Evolution : The History of an Idea*, Berkeley, Univ. of California Press, 1984.
 — CANGUILHEM G., LAPASSADE G., PIQUEMAL J. & ULLMANN J., *Du développement à l'évolution* (1962), Paris, PUF, 1985.
 — CAVALLI-SFORZA L.L. & FELDMAN M.W., *Cultural Transmission and Evolution : A Quantitative Approach*, Princeton (NJ), Princeton Univ. Press, 1981. — DARWIN C., *Ébauche de l'origine des espèces (Essai de 1844)*, trad. C. Lameere, revue et complétée D. Becquemont, Lille, Presses Univ., 1992 ; *On the Origin of Species*, Londres, John Murray, 1859 ; *L'Origine des espèces*, 6^e éd. (1872), trad. E. Barbier, Paris, Reinwald & Cie, 1876 ; *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle* [1971], Paris, C. Reinwald & Cie, 1872. — GAYON J., « Darwinisme et philosophie », in MEULDERS M., CROMMELINCK M. & FELTZ B. éd., *Pourquoi la science ? — Impact et limites de la recherche*, Seyssel, Champvallon, 1996, p. 27-391 ; « Sélection naturelle biologique et sélection naturelle économique : examen d'une analogie », *Économie et sociétés*, 1998. — GILSON E., *D'Aristote à Darwin et retour. Essais sur quelques constantes de la biophilosophie*, Paris, Vrin, 1971. — HODGSON G., *Economics and Evolution : Bringing Life Back into Economics*, Cambridge, Polity Press, 1993. — HULL D., *Science as a Process. An Evolutionary Account of the Social and Conceptual Development of Science*, Chicago/Londres, Univ. of Chicago Press, 1988. — LORENZ K., « Kant's Lehre vom Apriorischen im Lichte gegenwärtiger Biologie », *Blätter für Deutsche Philosophie*, 15, 1941, p. 94-124 (trad. angl., « Kant's doctrine of the a priori in the light of contemporary biology », *General Systems*, 7, 1962, p. 23-35). — MAYR E. & PROVINE W.B., *The Evolutionary Synthesis : Perspectives on the Unification of Biology*, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press,

1980. — NELSON R., & WINTER S., *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge (MA), Belknap Press of Harvard Univ. Press, 1982. — POPPER K., *Objective Knowledge*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1972. — ROGER J., *Les sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e siècle. La génération des animaux de Descartes à l'Encyclopédie*, 2^e éd. complétée, Paris, A. Colin, 1971. — RUSE M., *Taking Darwin Seriously : A Naturalistic Approach to Philosophy*, Oxford, Basic Blackwell, 1986 ; « Une défense de l'éthique évolutionniste », in CHANGEUX J.-P. dir., *Fondements naturels de l'éthique*, Paris, O. Jacob, 1993, p. 35-64 ; *Monad to Man : The Concept of Progress in Evolutionary Biology*, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press, 1996. — SPENCER H., *Les premiers principes*, 1^{re} éd. angl., 1863, trad. E. Cazalles, Paris, Germer-Baillière, 1871 ; « Evolutionary ethics », *Athenaeum*, août 1893 ; *La morale évolutionniste*, Paris, Alcan, 8^e éd., 1905. — TOULMIN S., « The evolutionary development of natural science », *American Scientist*, 57, 1967, 456-471.

Jean GAYON

→ Biogéographie ; Bricolage ; Classification [BOTANIQUE] ; Contingence ; Créationnisme ; Darwinisme ; Développement ; Embryogenèse ; Espèce ; Loi biogénétique fondamentale ; Origines de la vie ; Progrès ; Sélection ; Taxinomie ; Téléologie ; Vivant (Théorie du).

EXPANSION DE L'UNIVERS

Les premiers soupçons d'une expansion possible de l'univers datent du début du XX^e s. Ils furent émis par l'astronome américain Vesto Slipher, qui avait mesuré les « vitesses d'éloignement » de quelques galaxies. Mais il manquait le cadre théorique pour comprendre cette expansion.

Depuis la fin du XIX^e s., des résultats observationnels de plus en plus nombreux avaient commencé à suggérer l'idée d'une fuite généralisée des galaxies. Cette idée résultait d'un ensemble de mesures astronomiques, celles des « décalages vers le rouge » des galaxies. Le « décalage » est une quantité absolument fondamentale pour ce qui concerne l'expansion cosmique. En observant une galaxie on enregistre la lumière émise par les étoiles qu'elle contient. Or la lumière des étoiles se distribue de manière particulière en fonction de la longueur d'onde, selon ce que l'on appelle son spectre. Par exemple, la lumière du Soleil, décomposée convenablement, donne les différentes couleurs de l'arc en ciel. Une analyse plus précise montre la présence de « raies spectrales » : à des longueurs d'ondes très précises, le rayonnement lumineux est amplifié ou au contraire atténué. Ces raies apparaissent toujours aux mêmes longueurs d'onde. C'est ce que nous montre l'observation ; et c'est aussi ce qu'explique parfaitement la théorie.

Mais la lumière est soumise à l'effet Doppler. Ce dernier, qui affecte tous les phénomènes ondulatoires (le son comme la lumière), énonce que la longueur d'onde $\lambda_{\text{observée}}$ reçue par un observateur diffère de la longueur d'onde $\lambda_{\text{émise}}$ par la source. La différence entre les deux se caractérise par un décalage $z = \lambda_{\text{observée}} / \lambda_{\text{émise}} - 1$. Et les lois de l'effet Doppler ajoutent que $z = V/c$, où V est la vitesse de la source, et c celle

de la lumière. À partir de l'observation des raies spectrales des étoiles et des galaxies, les astronomes mesurent ainsi les décalages de ces objets.

Au début de notre siècle, Slipher avait déjà mesuré les décalages de plusieurs galaxies (qui, non encore reconnues comme telles, étaient appelées nébuleuses spirales). Interprétées en termes d'effet Doppler, ces mesures impliquaient des vitesses de plusieurs centaines de milliers de km/s pour ces galaxies. Des valeurs si élevées étaient inattendues et surprenantes, d'autant plus que presque toutes ces galaxies s'éloignaient. Cela suggérerait donc une sorte de mouvement d'expansion, que seuls Slipher et quelques rares collègues soupçonnaient au début. Les observations successives ne firent qu'accroître la tendance.

Dans les premières décennies du siècle, Edwin Hubble, autre astronome américain, réussit à mesurer les éloignements des mêmes galaxies. La conjonction de ses mesures avec celles des décalages, interprétés comme des vitesses, lui permit d'énoncer, en 1929, la loi qui porte aujourd'hui son nom : la vitesse V d'une galaxie est proportionnelle à sa distance D selon la relation $V = H_0 D$. La constante de proportionnalité H_0 est appelée aujourd'hui constante de Hubble. Cette loi ne fut pas comprise immédiatement, le cadre théorique permettant de le faire n'étant pas encore tout à fait au point.

La relativité générale

Ce cadre est issu de la relativité générale. Énoncée par Albert Einstein en 1915, cette théorie, qui rend compte des phénomènes gravitationnels, s'est avérée également être une théorie de l'espace et du temps. Très rapidement, Einstein se rendit compte qu'elle offrait un cadre parfaitement adapté à la cosmologie, l'espace et le temps constituant les deux ingrédients fondamentaux de notre univers. Cela lui permit de fonder une véritable cosmologie scientifique, dont la tâche était de préciser les propriétés de l'espace, du temps et du contenu de l'univers, en construisant des modèles d'univers relativistes.

Les premiers modèles cosmologiques, proposés par Einstein et ses successeurs immédiats, décrivaient un univers non pas en expansion mais statique. Avec le recul que nous avons aujourd'hui, ce cas précis nous paraît plutôt singulier, par rapport à la multitude des autres possibilités mais Einstein, comme la très grande majorité des physiciens et des astronomes des années 1910-1920, ne disposait pratiquement d'aucun indice suggérant que l'univers puisse évoluer. Aussi, lorsque Hubble proposa sa loi en 1929, les astrophysiciens ne surent pas l'interpréter et restèrent perplexes devant ces résultats.

En fait, la solution à ce problème avait été découverte quelques années plus tôt, mais était restée inconnue. Le physicien belge Georges Lemaître avait en effet compris que la théorie de la relativité offrait la possibilité de construire des modèles d'univers en expansion (cette même découverte avait été accomplie

par le mathématicien soviétique Alexander Friedmann). Bien plus, Lemaître avait déjà interprété les mesures de Slipher comme le signe d'une possible expansion. Il avait même avant Hubble proposé la loi qui porte le nom de ce dernier, ainsi qu'une valeur pour la constante H_0 .

Les travaux de Lemaître furent découverts vers 1930. Les astronomes reconnurent alors que l'univers était en expansion, et que la loi de Hubble rendait compte de cette expansion. Cette idée, qui implique celle d'évolution de l'univers, était si révolutionnaire que deux des plus illustres protagonistes du développement de la cosmologie contemporaine, Hubble et Einstein, ne s'y rallièrent que très difficilement. Ce fut Lemaître, véritable « père de la cosmologie moderne », qui réussit à synthétiser de manière remarquable les résultats d'observations de décalages avec les développements théoriques de la relativité générale.

L'expansion relativiste

Selon la relativité, l'expansion s'interprète de manière particulière. Cette théorie remet en effet en question les notions usuelles d'espace, de temps et de mouvement. Il en résulte qu'il ne convient pas d'imaginer un mouvement des galaxies dans l'espace, mais plutôt une dilatation de l'espace lui-même. Ce dernier, considéré comme un support déformable, entraîne tout ce qu'il contient. L'expansion est donc une sorte de « courant d'espace » qui entraîne les galaxies. Ces dernières ne sont pas en mouvement dans l'espace, mais au repos dans l'espace qui « enfle ». Les astronomes les qualifient de « comobiles » puisque, sans être immobiles, elles ne sont pas vraiment en mouvement. De ce fait, les « vitesses d'expansion » ne doivent pas non plus être considérées comme de véritables vitesses, mais plutôt comme la marque de l'expansion de l'espace. Alors, le fait que certaines galaxies puissent avoir des « vitesses d'expansion » supérieures à c , vitesse de la lumière, ne contredit en rien les exigences de la théorie de la relativité, et de la physique standard (il est vrai que ces galaxies nous restent invisibles, car elles se situent au-delà de l'horizon cosmologique). De fait, l'interprétation des mesures de décalages vers le rouge ne repose pas vraiment sur l'effet Doppler dans le sens classique, mais plutôt sur une généralisation de celui-ci dans le cadre de la relativité, ne faisant plus appel explicitement à la notion de vitesse.

L'expansion constitue un phénomène véritablement cosmique : il ne s'agit pas d'un mouvement de telle ou telle galaxie, ni même de tel ou tel ensemble de galaxies, mais bien de l'univers tout entier, considéré dans sa globalité. Ainsi, ce (premier) phénomène cosmique atteste de la réalité de l'univers, et de sa pertinence en tant qu'objet de la physique.

La constante de Hubble

Les cosmologues repèrent l'expansion cosmique en suivant l'évolution temporelle d'une longueur cosmique

caractéristique $R(t)$ qu'ils baptisent « rayon » ou « facteur d'échelle ». Ils ont adopté pour $R(t)$ la dimension la plus globale qui soit : le rayon de courbure de l'espace, qui le caractérise de manière tout à fait globale. Cette longueur varie en suivant l'expansion et caractérise cette dernière sans équivoque.

Par l'effet de l'expansion, le facteur d'échelle augmente. Son taux actuel d'augmentation n'est autre que la constante de Hubble H_0 , qui s'identifie à la dérivée (logarithmique) temporelle du facteur d'échelle : $H_0 = (1/R)_0 (dR/dt)_0$. Il est d'usage de placer l'indice 0 pour repérer des valeurs actuelles. La constante de Hubble caractérise donc le fait cosmologique le plus fondamental qui soit. Malheureusement, il est difficile de la mesurer exactement et sa valeur a fait l'objet, durant les dernières décennies, d'une controverse acharnée entre astrophysiciens. Aujourd'hui, les résultats les plus récents, notamment quelques-uns issus de mesures par le Télescope Spatial Hubble, semblent converger vers une valeur comprise entre 60 et 80 km/s/Mpc, mais l'avenir nous réserve peut-être encore quelques surprises.

La gravitation et relativité générale

Si la constante de Hubble mesure le taux actuel de l'expansion, ce taux varie sans doute lui-même dans le temps : l'univers exerce sur lui-même une attraction gravitationnelle qui, agissant en sens contraire à l'expansion, la ralentit. Nos moyens d'observation ne sont pas assez puissants pour nous le confirmer sans ambiguïté mais les principes de la physique le suggèrent fortement. De même que H_0 mesure le taux actuel de l'expansion, les cosmologues introduisent un paramètre q_0 pour exprimer à quel taux se ralentit l'expansion (q_0 dépend de la dérivée seconde et non pas première du facteur d'échelle).

Nous ne sommes malheureusement pas encore capables de mesurer q_0 mais la théorie peut nous venir en aide. Puisque c'est la gravitation qui ralentit l'expansion, c'est la relativité générale, théorie de la gravitation, qui permet d'explorer la dynamique de l'univers. Son équation fondamentale, l'équation de Friedmann, exprime comment calculer les propriétés de l'espace-temps en fonction de son contenu énergétique. En particulier, elle permet en principe de reconstituer la dynamique cosmique, passée ou future, telle la loi d'expansion $R(t)$ qui exprime l'augmentation du rayon de courbure de l'espace dans le temps, c'est-à-dire la diminution de la courbure.

À quelle vitesse se ralentit l'expansion ? Quelle est la valeur de q_0 ? Plus généralement, quelle est l'allure de la fonction $R(t)$? Pour répondre à ces questions, selon les préceptes de la relativité, les cosmologues examinent le contenu énergétique de l'univers, c'est-à-dire tout ce qu'il peut renfermer, matière ou rayonnements. De l'analyse théorique et des observations, il résulte que l'allure de la fonction $R(t)$ dépend essentiellement de deux quantités : la densité moyenne de

matière dans l'univers actuel, exprimée par la quantité Ω , et une « constante cosmologique » λ .

En ce qui concerne le futur de l'univers, par exemple, il existe deux possibilités : l'expansion continuera peut-être à se ralentir, sans jamais s'arrêter. Ou bien peut-être stoppera-t-elle, se transformant en contraction, si la valeur de Ω est suffisamment élevée. Les valeurs de Ω et de λ nous permettent aussi de reconstituer la dynamique passée, à la base des modèles de big bang. La modification dans le temps des propriétés de l'espace, par l'intermédiaire de l'expansion, affecte en effet le contenu de l'univers : matière et rayonnement, ne pouvant disparaître ou apparaître *ex nihilo*, se diluent par le fait de l'expansion, selon des lois faciles à calculer. Ainsi, l'univers était d'autant plus dense que l'on remonte dans le temps passé. Ceci est à la base des modèles cosmologiques d'aujourd'hui.

Les cosmologues distinguent deux classes de modèles *a priori* possibles. Dans la première, l'expansion dure depuis un temps infini. Mais les résultats observationnels favorisent plutôt la deuxième classe, dite des modèles de big bang : l'expansion (telle que nous l'observons) ne dure que depuis un temps fini et limité, calculable, et baptisé « âge de l'univers ».

La notion d'âge de l'univers

La notion d'âge de l'univers est délicate et mérite quelques précisions. Il ne s'agit pas, en effet, du temps écoulé depuis le « début », ou la « création » de l'univers. En effet, nous ne savons pas donner un sens à ces termes, du moins dans le cadre de la physique. Puisque le temps et son écoulement font partie de l'univers, on ne saurait parler, ni chronologiquement ni causalement, d'une origine de l'univers dans le temps. Le temps s'écoulant dans l'univers, il serait impossible de parler d'un début de l'univers autrement que... dans l'univers. Et il serait tout autant impossible de parler d'une origine causale de l'univers. Tout processus se déroulant dans le cadre de l'univers, par définition, n'a pu être à l'origine de l'apparition de ce dernier.

Ceci étant, cette notion souffre d'une seconde limitation due à l'insuffisance de nos connaissances physiques. Le passé cosmique fait en effet intervenir des conditions physiques de plus en plus denses, chaudes, et énergétiques. Les phénomènes en jeu relèvent de l'électromagnétisme et de la physique atomique, puis de la physique nucléaire, puis de la physique des particules... Plus on s'intéresse à un passé lointain, moins la physique nous est connue, plus il est difficile de reconstituer les phénomènes. Cela se traduit par une incertitude de plus en plus élevée dans la reconstitution du passé de l'univers. À un certain stade, cette incertitude devient tellement élevée que l'on ne peut pratiquement plus rien dire. Lorsque densité, températures et énergies sont trop élevées, les différentes théories – relativité et physique quantique – conduisent à des résultats incompatibles. De ce fait, aucune

description n'est possible d'un passé trop lointain, plus tôt que ce que l'on appelle « l'ère de Planck ».

Il faut donc considérer l'âge de l'univers comme mesurant le temps écoulé depuis l'ère de Planck, qui marque ainsi le début de la phase d'expansion. Nous devons renoncer à toute description de ce qui s'est passé auparavant. Nous sommes même incapables de dire si oui ou non il s'est passé quelque chose. Peut-être disposerons-nous, dans l'avenir, de théories de gravitation ou de cosmologie quantique qui permettront de pousser plus loin la reconstitution. Mais il paraît douteux que l'on arrive jamais à parler de l'origine de l'univers.

En dépit de ces limitations, la notion d'âge de l'univers t_u est opérationnelle et bien définie : aucun événement physique ne s'est déroulé plus tôt que t_u , aucun objet n'est plus âgé que t_u , la durée d'aucun phénomène n'a pu dépasser t_u . L'âge de l'univers apparaît comme une limite aux âges de tous les objets, aux durées de tous les phénomènes.

Tout ceci apporte d'ailleurs des arguments supplémentaires en faveur des modèles de big bang. La relativité permet d'estimer t_u en fonction des trois paramètres H_0 , Ω et λ . Compte tenu des contraintes observationnelles actuelles, la valeur prédite se situe entre 5 et 25 milliards d'années. Or, les âges des étoiles les plus anciennes observées sont estimés autour de 10 à 15 milliards d'années, précisément au milieu de cette fourchette. Cet accord remarquable constitue l'un des arguments les plus forts en faveur des modèles de big bang. Comment comprendre autrement que cet âge maximum ne soit pas des millions de fois plus court, ou au contraire plus élevé ? Les valeurs précises de t_u et de H_0 apportent des contraintes très intéressantes sur les deux autres paramètres cosmologiques Ω et λ : il semble aujourd'hui que Ω soit de l'ordre de 0,1-0,3, et que λ soit compris entre 0 et 1.

L'expansion apparaît ainsi comme le phénomène cosmique par excellence, fondateur de toute la cosmologie du XX^e s. Espérons que le XXI^e s. nous permettra d'en mieux connaître les caractéristiques.

► GRIBBIN J., *À la poursuite du Big Bang*, Monaco, Le Rocher, 1991. – HAKIM R., *La science et l'univers*, Paris, Syros/Alternatives, 1992. – LACHËZE-REY M., *Initiation à la Cosmologie*, Paris, Masson, 1992. – Coll. : *Le big bang en questions, Science et Vie*, hors série, n° 189, déc. 1994 ; *Au-delà de l'espace et du temps*, Paris, Éditions du Pommier, 2003.

Marc LACHËZE-REY

→ Antimatière ; Big bang ; Constante de Hubble ; Gravitation ; Principe anthropique ; Relativité ; Trou noir ; Univers.

EXPANSION TERRESTRE

Pour expliquer la genèse des continents et des océans, les géologues ont forgé, depuis un siècle, divers systèmes, faisant appel, soit à la translation des continents (dérive des continents et tectonique des plaques), soit à la contraction de la terre avec ou non des

effondrements (orogénèse), soit plus simplement en postulant la permanence des océans. La plus curieuse de ces solutions consiste à prétendre que la terre est en expansion. Exact opposé du modèle contractionniste, vieux d'un siècle et demi, ce système est le plus récent.

Sa naissance véritable remonte à Warren Carey (né en 1911), géologue australien. Dès ses premiers travaux, en Nouvelle-Guinée, il est acquis au mobilisme. En 1953, il présente un papier sur la convection et la dérive continentale. En 1956, alors qu'il est professeur à l'université de Tasmanie, il organise à Hobart un symposium sur la dérive. Mais, curieusement, au moment où les idées dérivistes renaissent, il plonge dans la nouveauté en présentant un exposé sur l'expansion de la terre. Façon de demeurer anticonformiste quand les idées qu'il soutenait vont enfin triompher.

Reprochant à la tectonique classique de s'être « laissée absorber par la maçonnerie et les colonnes sans voir le temple », il estime que plis et failles ne sont que des structures secondaires, et propose tout un vocabulaire néoformé pour désigner celles du premier ordre. Les chaînes de montagnes qui changent brutalement de direction (passage des Alpes aux Apennins) sont des oroclines. Un coin de fond océanique s'enfonçant dans un continent (comme le golfe de Gascogne) est un sphénochasme, etc. Or si l'on redresse les oroclines et qu'on ferme les sphénochasmes, les continents se rassemblent sur une surface plus petite que celle du globe actuel.

Les idées soutenues par Carey ne sont pas tout à fait neuves. Dans un historique de 1976, il cite les travaux de Mantovani, italien d'origine (né en 1854), installé à la Réunion depuis dix ans quand il rédige en 1889 l'article qui présente sa thèse, puis venu en métropole, à Saint-Servan (1900), et Paris. Son raisonnement est celui qu'adopta Carey. Constatant que « les côtes opposées des mers et des golfes s'ouvrent comme les deux branches d'un compas en formant [...] un angle de fracture », il estime que ces fractures n'existaient pas au départ, et propose de rapprocher « dans notre imagination, ou sur une sphère tous les bords des mers (et des fleuves, vallons, lacs et plaines) », pour arriver à un globe « rappelant par ses dimensions la petite planète Mercure » (Mantovani, 1889).

Publiée à la Réunion, la communication fût sans doute demeurée inconnue si l'auteur n'eût écrit un article trente ans plus tard dans une revue de large diffusion (Mantovani, « L'Antarctide », *Je m'instruis. La science pour tous*, 19 sept. 1909). Deux faits méritent d'être notés à cette occasion. D'une part, le géologue Jacques Bourcart, qui retrouve cet article en 1924, au moment où paraît la première traduction française de l'ouvrage de Wegener (1880-1930), donne Mantovani comme précurseur du géophysicien allemand. Or c'est une constante que nous suivrons dans cette analyse : l'historique de la thèse de l'expansion colle étroitement jusqu'aux années 1960 à celui de la théorie de la dérive continentale. D'autre part, l'auteur réservant pour une autre causerie, qui ne paraîtra pas, l'explication de cette « dilatation planétaire », qu'il donne

modestement (!) pour « la plus grande peut-être [découverte] de ce siècle », ses lecteurs peuvent ignorer combien son hypothèse est anachronique. Le « gonflement » du globe, avait-il dit, « ne peut se produire que par la force de dilatation d'un gaz renfermé au centre » (Mantovani, « Les fractures de l'écorce terrestre et la théorie de Laplace », *Bull. Soc. Sci. Arts Réunion*, 1889, p. 41-53). Là encore, on retrouve dans les explications modernes de l'expansion des idées qui semblent bien étranges. Reprenons ces deux points.

Si l'on passe sur le travail de l'Allemand Hilgenberg (1933) qui construit des modèles de globe en carton-pâte pour montrer comment les continents, d'abord jointifs, se sont séparés par dilatation de la terre, on s'aperçoit que, pour les premiers commentateurs de Wegener, sa théorie était plus satisfaisante si la terre, au lieu de se contracter se dilatait (R. Furon, « Les relations géologiques de l'Afrique et de l'Amérique du sud », *Archives Muséum*, 6, XII, 1935, p. 211-215). Et l'on arrive au début des années 1960, où les travaux de M. Ewing et B. Heezen établissent l'existence du rift (expansion océanique). Or jusqu'en 1966, Bruce Heezen défendra la théorie de l'expansion. Il l'abandonne quand il comprend que la dilatation devrait être trop rapide pour être vraisemblable et que la subduction compense l'accrétion océanique. Tuzo Wilson l'adopte lui aussi avant de devenir le défenseur de la théorie des plaques.

Quant aux solutions proposées pour expliquer l'augmentation du volume terrestre, elles sont aussi variées qu'originales. Mantovani était un amateur (il avait le titre de consul), on le voit quand dans les années 1920, il défend encore sa terre creuse en termes archaïques devant la Société géologique de France. Ce n'est pas le cas des autres auteurs. Wilson (1960), le Hongrois Egyed (1962), etc., en reprenant une hypothèse du célèbre physicien Dirac (1938), appliquée à la terre par Jordan (1952) : la constante de gravité g aurait diminué, expliquent ainsi, à masse constante, l'augmentation du volume par diminution de la pression. Carey, après avoir admis avec d'autres que la masse de la terre avait augmenté, adopte sa théorie de l'univers nul (« Null Universe »). En dotant l'énergie du signe moins ($E = -mc^2$), et en admettant que masse et énergie universelles sont nulles au départ et « ont augmenté *pari passu* », il explique aisément (?) l'augmentation de la masse des objets célestes. Reste aussi les auteurs qui ont été sensibles aux arguments des expansionnistes mais qui renoncent à ses conséquences physiques. Certains ont admis des alternances de dilatation et de contraction terrestre (Milanovsky, 1980).

Les arguments favorables sont, en fait, tirés des difficultés du schéma de la tectonique globale. Les uns viennent des paléontologues qui n'expliquent pas certaines répartitions. D'autres sont des « paradoxes » océaniques : le Pacifique aurait dû diminuer par la création des autres océans lors de l'éclatement de la Pangée, alors que les continents qui le bordent s'écartent (Meservey, 1969). Tout cela forme un ensemble disparate, comme sont variées les vitesses d'expansion

postulées : de 0,1 mm à plusieurs mètres ! Peut-on dès lors parler d'une unique théorie de l'expansion terrestre ?

► CAREY W., *The Expanding Earth*, Amsterdam, Elsevier, 1976 ; (éd.), *Expanding Earth Symposium*, Sydney, 1981. — GOHAU G., « Considérations historiques à propos de la théorie de l'expansion terrestre », *Sciences*, n° 91-2:3, 1991, p. 18-29 ; « Mantovani et sa théorie de la dilatation planétaire », *Travaux du Comité français d'histoire de la géologie*, 3^e série, t. 4, 1990, p. 53-58. — MILANOVSKY E., « Problems of the tectonic development of the earth in the light of concept on its pulsations and expansion », *Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique*, n° 22, 1980, p. 15-27.

Gabriel GOHAU

→ Dérive des continents ; Orogenèse ; Tectonique des plaques ; Terre ; Wegener.

EXPÉRIENCE

L'expérience fournit, répète-t-on souvent, notre critère ultime de vérité. Nos hypothèses et nos théories doivent affronter le tribunal de l'expérience. Mais comment comprendre le terme d'expérience ? Ce terme présente une signification particulièrement large. Afin d'en préciser le sens, on fait généralement appel à quelques distinctions usuelles : ainsi oppose-t-on l'expérience à l'observation et à l'expérimentation. Observer consiste simplement à constater un phénomène ; expérimenter consiste à modifier les conditions d'un phénomène, afin de mettre en évidence un de ses aspects. L'expérimentation, enfin, désigne le recours systématique et rigoureux à l'expérience qui caractérise la méthode expérimentale. Ces distinctions, pour utiles qu'elles soient, restent néanmoins ambiguës. En effet, il y a des observations provoquées : à partir des perturbations que présente la planète Uranus et à l'aide de la théorie de la gravitation, Le Verrier prédit l'existence d'une nouvelle planète et calcula sa position et sa masse ; ainsi fut découverte Neptune. De plus, la langue française distingue en priorité entre l'expérience, qui peut être singulière ou générale, et la série d'expériences spécialisées, instituée en vue de déceler une propriété de la nature, là où d'autres langues opposent l'expérience ordinaire à l'expérience scientifique (par exemple, l'anglais : *experience* et *experiment*).

Il faut encore savoir en quel sens nous entendrons le terme d'expérience. Le restreindrons-nous à l'expérience sensible ou l'élargirons-nous à toute mise à l'épreuve d'une idée, fût-elle purement intellectuelle, telle « l'expérience de pensée » de Mach ? Répondre à cette question, d'entrée de jeu, en adoptant une position empiriste ou rationaliste, reviendrait à subordonner la philosophie des sciences ou épistémologie à la théorie de la connaissance. Or, si les rivalités métaphysiques viennent enrichir la discussion, la question épistémologique de la place de l'expérience en science présente une problématique spécifique. Les clivages en

philosophie des sciences, nous le verrons, ne sont pas les mêmes qu'en métaphysique.

Comment cerner cette notion d'expérience si centrale pour les sciences ? Il est clair qu'elle figure de façon privilégiée dans les sciences dites empiriques et que nous disposons de nombreuses études concernant son rôle dans ce domaine. Nous porterons donc notre attention, en priorité, sur ces sciences, bien qu'en un sens élargi l'expérience semble jouer également un rôle en mathématique. Nous nous attacherons à quelques grands débats, afin de mettre en lumière les problèmes soulevés par cette notion. Mais plus instructifs que les discussions historiquement circonscrites sont ces débats prolongés qui mettent aux prises des penseurs d'époques différentes. Ainsi, nous verrons que l'analyse de la méthode expérimentale proposée par Duhem au début du siècle, si elle fut discutée à son époque, est bien plus remarquable du fait de sa reprise par Quine un demi-siècle plus tard. Après ce rappel d'un des exposés classiques du contrôle expérimental, nous ferons la synthèse des résultats que nous fournit le courant post-positiviste, qui occupe aujourd'hui le devant de la scène. La notion de paradigme, c'est-à-dire d'ensemble de théories apparentées, que ce courant a popularisé, conduit à revoir notre conception de l'expérience. Or ce courant exige que nous ne dissociions pas épistémologie et histoire des sciences. Nous commencerons donc par examiner le rôle de l'expérience d'après les historiens des sciences.

La méthode expérimentale et l'avènement de la science moderne

Selon la conception classique formulée par les Encyclopédistes, la science moderne doit son apparition à la découverte de la méthode expérimentale. Cette méthode procure des connaissances certaines et stables, et son instauration entraîne une révolution scientifique. La vision du développement scientifique qui en découle s'inspire de la méthodologie préconisée par les disciples de Newton dans leur lutte contre les cartésiens ; elle reçoit sa justification du succès de la physique newtonienne. Si la conception classique d'une révolution dans la méthode donne lieu à quelques différences d'accent, elle est, dans ses grandes lignes, largement acceptée et diffusée. Pour d'Alembert, il importe d'éviter les conjectures et de former les principes à partir des phénomènes : « Ce n'est [...] point par des hypothèses vagues et arbitraires que nous pouvons espérer de connaître la nature, c'est [...] par l'art de réduire autant qu'il sera possible, un grand nombre de phénomènes à un seul qui puisse en être regardé comme le principe [...] Cette réduction [...] constitue le véritable esprit systématique, qu'il faut bien se garder de prendre pour l'esprit de système » (*Discours préliminaire de l'Encyclopédie* (1759), Paris, Vrin, 1984, p. 30). Kant insiste davantage sur l'activité de l'esprit : « La physique est [...] redevable de la révolution si profitable opérée dans sa

méthode uniquement à cette idée qu'elle doit chercher dans la nature – et non pas faussement imaginer en elle – conformément à ce que la raison y transporte elle-même, ce qu'il faut qu'elle en apprenne et dont elle ne pourrait rien connaître par elle-même » (*Critique de la raison pure*, 1781, trad. fr., Paris, PUF, 1968, p. 17-18). On notera que les traditions empiriste et rationaliste sont d'accord sur le schéma historique général. D'autres questions interviennent ici : le rapport entre science et sens commun ; le rapport entre science moderne et philosophie naturelle traditionnelle.

L'histoire des sciences, qui se constitue en discipline rigoureuse à partir de la fin du XIX^e s., vient contester la simplicité de ce schéma. Plusieurs points de la conception classique soulèvent des interrogations : n'existe-t-il pas des exemples d'expérimentation avant le XVII^e s. ? Quelle place accorder à Francis Bacon, qui a annoncé un programme de recherche, sans avoir lui-même mis en œuvre la méthode expérimentale ? Galilée fut-il avant tout un expérimentateur ou un théoricien ? Newton a-t-il réellement suivi la méthode qu'il a proposée ? Les réponses que les historiens vont donner à ces questions contribueront à dessiner une vision entièrement différente du développement de la science moderne. Nous nous attacherons ici à deux exemples : le cas de la science grecque et le cas de Galilée.

En ce qui concerne les origines de la science moderne, une controverse a opposé l'épistémologue Karl Popper à l'helléniste G.S. Kirk. Il n'est pas sans intérêt pour notre propos de rappeler la manière dont Popper formule sa thèse : « L'épistémologie empiriste classique et l'histoire des sciences traditionnelle portent toutes deux la marque du mythe baconien selon lequel toute science commence avec l'observation pour en venir ensuite lentement et avec précaution à la formulation des théories. Que la réalité du processus soit tout autre, c'est ce que nous enseigne l'étude des premiers Présocratiques. Nous y découvrons des idées audacieuses et saisissantes [...] ; la majeure partie d'entre elles, celles qui sont les plus intéressantes, n'ont rien à voir avec l'observation » (*Conjectures et réfutations*, p. 208-209). Geoffrey Lloyd, qui rappelle cette controverse, s'efforce de donner une réponse en dépassant ce qui semble tenir à l'opposition entre deux positions épistémologiques différentes. Il nous convie à distinguer les catégories de l'observateur de celles de l'acteur. Il ne faut ni assimiler les termes du débat des Anciens aux nôtres, ni disqualifier des activités sous prétexte qu'elles ne correspondent pas à nos critères scientifiques actuels. On notera qu'il n'y a pas d'équivalent exact en grec ancien de notre terme d'observation et que certains termes dérivés du grec n'avaient pas alors le même sens ; ainsi le terme de phénomène désigne-t-il chez Aristote non seulement ce qui apparaît directement aux sens mais aussi l'opinion reçue. Fort de ces préceptes méthodologiques, on découvrira dans le corpus hippocratique une série d'études individuelles qui manifestent la capacité des médecins

à accomplir des investigations empiriques précises et systématiques. En même temps, il ne faut pas confondre la motivation de ces médecins avec la nôtre : elle s'explique par une théorie curieuse selon laquelle le cours des maladies aiguës est déterminé par des jours critiques (dont le caractère pair ou impair n'est pas considéré comme dépourvu d'intérêt). Dans le domaine de l'astronomie, on peut faire état d'un travail empirique attentif et poursuivi, qui débouche non seulement sur des résultats décisifs mais également sur une conscience claire des relations entre l'observation et la théorie. Ceci n'empêche pas de relever certaines faiblesses : « Alors que l'exposé géométrique du modèle est à la fois simple et élégant, la comparaison entre la théorie et les données empiriques est réduite au minimum » (Lloyd, *Magic, reason and experience*, p. 192). Lloyd prétend que les Grecs ont pratiqué l'expérimentation, tout en soulignant les différences entre leur démarche et la nôtre.

Passons maintenant au cas de Galilée. Dans les années 1930, Alexandre Koyré rompt avec la vision de Galilée en tant qu'expérimentateur. Selon sa remarque percutante : « L'expérience, dans le sens de l'expérience brute [...] n'a joué aucun rôle, sinon celui d'obstacle, dans la naissance de la science classique. [...] Quant à l'expérimentation – interrogation méthodique de la nature – elle présuppose et le langage dans lequel elle pose ses questions, et un vocabulaire permettant d'interpréter les réponses. Or, si c'est dans un langage mathématique [...] que la science classique interroge la nature, ce langage, ou plus exactement la décision de l'employer [...] ne pouvait, à son tour, être dictée par l'expérience qu'elle allait conditionner » (*Études galiléennes*, p. 13). Et Koyré de rapporter de nombreux passages où Galilée rejette expressément les enseignements que les aristotéliens prétendaient tirer de l'expérience courante. Dès lors que l'on dépasse l'observation naturelle, comme Galilée nous y invite par ses observations au moyen du télescope, il faut justifier le fonctionnement de l'instrument et, ultimement, pouvoir fournir une théorie de l'instrument. Koyré va jusqu'à prétendre que la démarche galiléenne reflète un apriorisme platonicien. Cependant, la reconstitution des expériences de Galilée et l'étude de ses carnets de recherche, accomplies à partir des années 1960 par T. Settle et S. Drake, montrent qu'il ne faut pas dénier toute valeur au travail empirique dans son œuvre. La référence à Platon est de nature polémique, et il n'y a pas de recours à l'intuition qui pourrait justifier la qualification d'apriorisme. En même temps, des recherches récentes ont révélé la proximité entre la méthodologie galiléenne et la méthodologie aristotélienne rapportée par les jésuites. Il est clair que l'on ne saurait revenir à la thèse traditionnelle de l'instauration d'un nouveau savoir par le biais de la méthode, sans dette aucune vis-à-vis du savoir antique et médiéval. Galilée établit un dialogue entre la raison et le réel que Maurice Clavelin continue à caractériser de rationaliste.

La thèse de Duhem-Quine

L'analyse que Pierre Duhem consacre à l'expérience dans *La Théorie physique*, en 1906, suscite à l'époque des débats vigoureux, notamment avec Édouard Le Roy et Henri Poincaré. Mais c'est surtout rétrospectivement que cette analyse a acquis toute son importance. Il s'agit d'une remise en cause radicale de la méthodologie traditionnelle – celle-là même qui fonde la vision classique de la naissance de la science moderne. Plusieurs discussions contemporaines prendront ici leur point de départ.

Cette analyse débouche sur la thèse suivante : « Une expérience de Physique ne peut jamais condamner une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble théorique » (p. 278). En d'autres termes, les hypothèses de la physique subissent le contrôle expérimental de façon collective. Si l'énoncé de cette thèse est simple, ses conséquences sont multiples. C'est la part d'interprétation à l'œuvre dans l'expérience qui rend le contrôle expérimental complexe. C'est la nature de la loi qui interdit un modèle purement inductif. La thèse de Duhem s'articule autour de plusieurs schémas : la condamnation d'une hypothèse, l'expérience cruciale et la méthode newtonienne des inductions.

Les difficultés rencontrées par les positivistes logiques dans leur tentative de construire une logique inductive probabilitaire, les critiques conjuguées de Popper et des post-positivistes à l'encontre de cette tentative nous rendent aujourd'hui méfiants à l'égard du modèle inductif du développement scientifique. Examinons donc attentivement ce qui pose encore problème, à savoir les schémas déductifs. En quoi consiste la réfutation d'une hypothèse ? Supposons qu'un physicien désire prouver la fausseté d'une proposition théorique qu'il conteste. De cette proposition, il déduit une prédiction susceptible d'être contrôlée. Il élabore ensuite un dispositif expérimental de manière à constater si la prédiction a lieu ou non. Admettons que l'expérience aboutisse à un résultat négatif ; le physicien peut alors rejeter la proposition théorique en question. Ce raisonnement repose sur une figure logique connue, le *modus tollens*. Si une hypothèse conduit à une prédiction que l'expérience vient infirmer, alors nous sommes en droit de conclure que notre hypothèse est fautive. Selon Duhem, l'application de ce mode de démonstration à la physique représente une simplification excessive. En effet, elle revient à admettre que l'on puisse soumettre isolément les propositions théoriques au contrôle de l'expérience. Or une analyse attentive de l'expérimentation montre que ce n'est pas le cas. Pour déduire une prédiction et pour la soumettre à l'expérience, le physicien fait nécessairement appel à d'autres propositions théoriques. L'infirmité expérimentale atteint toute une série d'hypothèses ; elle ne désigne pas une hypothèse particulière ; elle nous apprend seulement qu'au moins une des hypothèses est fautive. Or une théorie est une suite souvent longue d'hypothèses.

La négation porte sur la conjonction des hypothèses dans son ensemble, ou, ce qui revient au même, la négation porte sur une hypothèse quelconque.

La réfutation expérimentale est moins « puissante », moins univoque que les classiques ne l'ont laissé entendre. Mais il s'agit, de toute façon, d'un procédé négatif. Or il semble qu'on ait essayé de développer un schéma positif fondé sur la réduction à l'absurde : dans certaines situations privilégiées, il serait possible de conclure à la vérité d'une hypothèse. Telle est l'idée de l'expérience cruciale conçue par Bacon et reprise par Newton.

Ce qui rend souvent inopérante une réfutation expérimentale, c'est l'absence d'une théorie de rechange. Mais admettons que l'on ait deux hypothèses qui conduisent à des prédictions opposées : si l'expérience infirme l'une des prédictions, confirmant par là l'autre, ne pouvons-nous pas dire qu'elle a rendu plus certaine l'hypothèse conduisant à la seconde prédiction ? L'expérimentation consiste en une interrogation de la nature poursuivie depuis longtemps : le physicien a su ingénieusement contraindre la nature à répondre.

Contre cette argumentation, on peut reprendre l'objection précédemment formulée : pour déduire une prédiction et la soumettre à l'expérimentation, le physicien fait forcément appel à plusieurs hypothèses. La « contradiction » n'a donc pas nécessairement lieu entre les deux hypothèses désignées ; elle peut se situer ailleurs. Pas plus que l'infirmité, la confirmation expérimentale ne porte sur une hypothèse isolée. Le partisan de l'expérience cruciale raisonne comme s'il s'agissait de deux hypothèses, alors que nous sommes en présence de deux théories, de deux systèmes théoriques.

L'expérience cruciale soulève une autre objection. Supposons que nous ayons à décider seulement entre deux hypothèses, que toutes les autres hypothèses soient hors de doute. Faut-il en conclure que la vérité d'une des hypothèses a été établie parce que nous avons exclu l'autre hypothèse ? Pour cela il faudrait que les deux théories soient contradictoires au sens strict, c'est-à-dire la fausseté de l'une impliquant la vérité de l'autre. Or il est assez facile de voir que le principe du tiers exclu ne s'applique pas ici : une autre hypothèse est toujours possible. Nous pouvons en donner une illustration à l'aide de l'expérience de Foucault sur la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air. En déduisant des prédictions opposées de la théorie corpusculaire et de la théorie ondulatoire, on a cru trancher la question. Qu'il n'en est rien, la théorie du photon d'Einstein le montre bien.

Une comparaison avec Popper s'impose. Nous savons que celui-ci fonde sa conception de la science sur une asymétrie entre la vérification et la réfutation : un énoncé universel ne peut être vérifié par un énoncé singulier, mais il peut être réfuté par un énoncé singulier. En d'autres termes, même si son application pose quelques problèmes, le *modus tollens* demeure une figure logique, alors que ni la méthode newtonienne ni l'expérience cruciale ne le sont. Par conséquent,

Popper rejette l'induction pour ne retenir que la réfutation comme procédé de recherche scientifique. Comment réagit-il alors aux objections que développait Duhem à l'encontre des schémas déductifs ? Il précise que « Duhem refuse la possibilité d'expériences cruciales, parce qu'il les envisage comme des vérifications, alors que moi, j'affirme la possibilité d'expériences cruciales réfutantes » (*La Logique de la découverte scientifique*, p. 76). Il est vrai que Duhem s'oppose surtout au réalisme de ses contemporains, mais il n'en demeure pas moins que le réfutationniste doit répondre à certains de ses arguments.

La réfutation expérimentale n'étant pas univoque, le physicien dispose d'une certaine marge de liberté : il peut toujours essayer de « sauver » une théorie en modifiant une ou plusieurs hypothèses secondaires. Selon Popper, chercher à éviter le démenti expérimental est une attitude « frileuse », contre laquelle le scientifique doit se prémunir. Il faut éviter les « stratagèmes conventionnalistes », qui consistent à modifier les définitions ou à ajouter des hypothèses *ad hoc*. De tels procédés représentent une sorte d'échappatoire face à un résultat expérimental récalcitrant ; par là, on affaiblit en un sens la théorie. Or, selon Popper, le scientifique doit chercher à renforcer le contenu empirique de la théorie ; l'adoption de quelques règles méthodologiques permet de rétablir la puissance de la réfutation.

Dire que seul un contrôle global est valable en physique revient à affirmer, aux yeux de Duhem, l'impossibilité de l'expérience cruciale et de la méthode newtonienne. Popper, nous l'avons vu, reprend la critique de la méthode inductive et rejette celle de l'expérience cruciale ; en revanche, le positiviste logique Rudolf Carnap accepte en gros les difficultés de la réfutation, sans adhérer à la critique de la méthode inductive. C'est W.V. Quine qui adopte pleinement la thèse de Duhem, en dénonçant « les deux dogmes de l'empirisme », selon le titre de son article célèbre : « Je propose l'idée que nos énoncés sur le monde extérieur sont jugés par le tribunal de l'expérience sensible, non pas individuellement, mais seulement collectivement » (p. 107). Il convient, toutefois, de bien marquer les différences : la conception de Duhem concerne la physique, tandis que celle de Quine affecte la totalité de nos connaissances, y compris les mathématiques et la logique.

Le fait imprégné de théorie

À partir des années 1960 se développe une réaction contre le positivisme logique. Cette réaction désignée sous le nom de post-positivisme est menée par des auteurs tels que Kuhn, Lakatos, Feyerabend et Laudan. Or on constate que tous les partisans du positivisme logique admettent la thèse de Duhem-Quine, quelle que soit l'interprétation qu'ils en donnent. Cette thèse est associée au concept original d'une unité de signification plus large que la théorie. Si le terme choisi est différent selon les auteurs, on peut néanmoins dégager

un fond commun : les concepts de paradigme (Kuhn), de programme de recherche (Lakatos), de théorie globale (Feyerabend) et de tradition de recherche (Laudan) sont le résultat d'une analyse soucieuse du développement réel de la science. Seules ces structures relativement larges et durables permettent de comprendre le changement scientifique. Nous utiliserons le terme de paradigme, pour dénommer ces structures englobant plusieurs théories, sans lui associer les caractères d'une conception particulière. Sont des paradigmes la philosophie naturelle aristotélicienne, la mécanique newtonienne et la physique relativiste.

Or la notion de paradigme est intimement liée à une conception particulière du progrès scientifique. Tous les auteurs du post-positivisme, d'une manière ou d'une autre, acceptent l'idée d'un développement discontinu de la science. Il y a plus, aucun d'eux n'hésite à employer le terme de révolution scientifique, qui implique, en clair, une coupure radicale et générale. On sait que Kuhn, l'un des instigateurs du post-positivisme, a élaboré sa conception à partir d'une analyse attentive de la révolution copernicienne. On doit toutefois préciser que la révolution scientifique dont il est question ici diffère profondément du concept employé par les Lumières : les auteurs actuels envisagent, à l'intérieur d'une même discipline, une succession de révolutions, lesquelles véhiculent aussi bien des éléments méthodologiques que métaphysiques.

Dès lors est explorée historiquement la possibilité admise par Popper de remanier les énoncés de base servant à contrôler les hypothèses scientifiques. Ces énoncés, selon les post-positivistes, ne s'expliquent pas simplement par l'état de développement de nos connaissances : ils dépendent fondamentalement du paradigme. Lors d'une révolution scientifique, même les énoncés qui sont censés être proches de l'observation peuvent changer brusquement de sens. Les post-positivistes retrouvent par là une des conséquences de la thèse de Duhem-Quine. Mais, s'ils répètent à l'envi que tout fait est imprégné de théorie, ils donnent à cette thèse un sens radical. Il ne s'agit pas simplement de la part de l'interprétation dans l'observation : une révolution scientifique entraîne un changement des données de la perception. Cette conception se trouve exposée dans un passage exemplaire de *La Structure des révolutions scientifiques* de Thomas Kuhn : « Depuis la haute Antiquité, la plupart des gens ont vu un corps lourd quelconque se balancer d'avant en arrière, au bout d'une ficelle ou d'une chaîne, jusqu'à ce qu'il arrive finalement à l'immobilité. Pour les aristotéliciens, qui croyaient qu'un corps lourd est mû par sa propre nature d'une position plus élevée vers un état de repos naturel, à une position plus basse, le corps qui se balançait tombait simplement avec difficulté. Contraint par la chaîne, il ne pouvait atteindre le repos à son point inférieur qu'après un mouvement compliqué et un temps considérable. Galilée, au contraire, regardant ce corps qui se balançait, y vit un pendule, un corps qui réussissait presque à répéter le même mouvement

jusqu'à l'infini. Ayant vu ceci, Galilée observa d'autres propriétés du pendule et elabora à leur propos certaines des conceptions les plus importantes et originales de sa nouvelle dynamique... Tous ces phénomènes naturels, il les vit sous un aspect différent de celui qu'ils avaient revêtu avant lui » (p. 167-168). On peut en conclure que les aristotéliciens et les galiléens, confrontés aux mêmes données, ne voyaient pas la même chose ; les données elles-mêmes avaient changé. Qu'est-ce que « l'expérience immédiate », sinon les « caractères perceptifs qu'un paradigme met tellement en lumière que l'on peut saisir leur régularité presque à vue d'œil ? » Et Kuhn d'ajouter : « Ces caractères doivent évidemment changer avec l'adoption d'un nouveau paradigme par l'homme de science, mais ils sont très éloignés de ce à quoi nous songeons généralement quand nous parlons des données pures ou de l'expérience brute, dont la recherche scientifique est réputée partir » (p. 175). On constate que Kuhn abandonne l'idée, chère aux positivistes, d'un langage d'observation neutre.

L'instabilité de la base empirique n'est pas sans conséquence quant à la conception du contrôle expérimental. Contre Popper, Lakatos et Kuhn récusent la possibilité de l'expérience cruciale même en tant que réfutation. Et Kuhn fait remarquer que « toute expérience peut être contestée, soit du point de vue de la pertinence, soit de celui de la précision » (p. 376). Certes, un scientifique ne renoncera pas à une théorie à la première difficulté empirique survenue : l'étude du développement réel de la science montre que l'édification d'un nouveau paradigme couvrant un large champ de phénomènes est un processus complexe ; les scientifiques se permettent divers ajustements. Ainsi Kuhn et Feyerabend n'interdisent-ils pas, contrairement à Popper, le recours à des hypothèses *ad hoc*.

Les post-positivistes font encore observer qu'un scientifique n'abandonnera pas une théorie s'il n'a pas de théorie de rechange : une analyse complète de la démarche scientifique montre qu'il s'agit, pour le scientifique, de choisir entre théories concurrentes. Nous devons être attentifs à un déplacement de la problématique du contrôle expérimental vers la compétition entre théories. Ainsi que l'écrit Kuhn : « Dans les sciences, [la mise à l'épreuve du paradigme] ne consiste jamais [...] en une simple comparaison d'un paradigme unique avec la nature. Elle intervient au contraire à l'occasion de la concurrence de deux paradigmes rivaux, réclamant l'adhésion d'un groupe scientifique » (p. 200). L'évaluation d'une théorie ne se réduit donc pas à la comparaison de ses conséquences avec les données de l'observation ; le scientifique forme un jugement d'appréciation globale, prenant en compte la fécondité de tout un programme de recherche vis-à-vis des programmes concurrents.

Il reste à savoir comment un scientifique choisit entre plusieurs théories. À vrai dire des difficultés surgissent ici : en insistant sur l'incommensurabilité des paradigmes — les données, les méthodes, les problèmes changent d'un paradigme à l'autre — Kuhn et

Feyerabend sont conduits à rendre problématique le progrès scientifique. Toutefois, Kuhn finit par préciser les critères rationnels qui expliquent les choix théoriques : simplicité, symétrie, cohérence, rigueur et précision. Parmi ces critères, certains ont trait à ce que Laudan appelle des problèmes conceptuels, par opposition à des problèmes empiriques : la compatibilité des différentes parties de notre système de connaissance relève bien de l'activité scientifique. Certes, ces critères rationnels ne sont pas immuables, mais on admet qu'ils évoluent très lentement et donc permettent, dans la pratique, un choix entre paradigmes.

Il pourrait sembler que les post-positivistes minimisent le rôle de l'expérience, tant ils insistent sur la complexité et la difficulté du contrôle expérimental. Nous devons toutefois reconnaître qu'ils nous livrent, par l'étude historique, de nombreux exemples de la puissance à innover et de l'efficacité à résoudre des problèmes de la part des scientifiques. Si les post-positivistes s'inscrivent en faux contre les thèses du positivisme logique, c'est qu'ils refusent de partir d'une théorie de la connaissance préalablement constituée ; leurs thèses sont le résultat d'une analyse soucieuse du développement historique et réel de la science. À regarder de plus près, on relève plusieurs mises en garde contre une vision qui négligerait l'importance de l'expérience. Quelle que soit la liberté du théoricien, Kuhn nous prévient qu'il doit tenir compte des lois déjà établies ; sa théorie doit les retrouver.

En même temps, les post-positivistes avouent laisser de côté la question de la structure des théories individuelles qui a tant préoccupé leurs prédécesseurs. En effet, Mach, Duhem et les positivistes logiques ont développé une logique de la mesure. Les post-positivistes se contentent de faire remarquer que la mesure est déterminée par le paradigme. Mais, même relativisée, la mesure reste une manière de coordonner propriétés physiques et concepts théoriques, et, à ce titre, elle mérite d'être explorée pour son propre compte. Maintenant, si nous prenions l'expérience en un sens plus large, englobant la mémoire des réussites et des échecs des paradigmes, nous pourrions prétendre que l'expérience n'est pas sans effet en retour sur nos critères de rationalité. Ces critères s'affinent au cours du temps.

► BRENNER A., *Les Origines françaises de la philosophie des sciences*, Paris, PUF, 2003. — CLAVELIN M., *La Philosophie naturelle de Galilée* (1968), Paris, Albin Michel, 1996 ; *History and technology*, 1987, 4, p. 13-35. — DUHEM P., *La Théorie physique, son objet et sa structure* (1906), Paris, Vrin, 1981. — FEYERABEND P., *Against method* (1975), Londres, Verso, 1978 (trad. fr. B. Jurdat, *Contre la méthode*, Paris, Le Seuil, 1979). — HACKING I., *The Social construction of what?*, Cambridge, MA, Harvard Univ. Press, 1999 (trad. fr. B. Jurdat, *Entre science et réalité : la construction sociale de quoi?*, Paris, La Découverte, 2001). — HANSON N. R., *Patterns of discovery*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1958 (trad. fr. N. Emboussi, Paris, Dianofa, 2001). — KOYRÉ A., *Études galiléennes* (1939), Paris, Hermann, 1980. — KUHN T.S., *The Structure of scientific revolutions* (1962), Chicago, Univ. of Chicago

Press, 1970 (trad. fr. L. Meyer, *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983). — LAKATOS I., *The Methodology of scientific research programmes*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1978 (trad. fr. C. Malamoud et J. F. Spitz, *Histoire et méthodologie des sciences*, Paris, PUF, 1996). — LAUDAN L., *Progress and its problems*, Berkeley, Univ. of California Press, 1977 (trad. fr. P. Miller, *La Dynamique de la science*, Bruxelles, Mardaga, 1987). — LLOYD G., *Magic, reason and experience*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1979. — QUINE W.V., *From a logical point of view* (1953), Cambridge, MA, Harvard Univ. Press, 1980 (trad. fr. S. Laugier (dir.), *D'un point de vue logique*, Paris, Vrin, 2003).

Anastasios BRENNER

→ Analogie ; A priori ; Découverte ; Donné ; Duhem ; Empiricismisme ; Empirisme ; Expérience cruciale ; Fait ; Idéalisme ; Induction ; Instrument ; Objectivité ; Pragmatisme ; Réalisme ; Reproductibilité ; Test ; Vérification.

EXPÉRIENCE CRUCIALE

La notion d'expérience cruciale — en d'autres termes, d'une expérience décisive permettant de choisir entre deux hypothèses ou théories rivales — a depuis son apparition joué un rôle paradigmatique en philosophie de la connaissance, d'abord dans le champ de la physique puis dans le domaine de l'épistémologie en général. Emblème de ce que Feyerabend appelle, non sans ironie, « l'empirisme classique » (de Bacon à Popper) et de sa conviction centrale, celle d'un impact direct de l'expérience et plus particulièrement de l'expérimentation sur le choix des hypothèses en présence à un moment de l'évolution d'une science, l'expérience cruciale, après sa mise en cause radicale par Duhem (1906), devient à l'inverse l'emblème des difficultés à déterminer de manière univoque et claire le lien entre une expérience et la (ou les) théorie(s) qu'elle infirme et confirme, et donc, plus généralement, des débats et controverses de l'épistémologie contemporaine. La notion d'expérience cruciale joue donc un rôle essentiel dans l'évolution de l'épistémologie depuis la théorie classique de la connaissance jusqu'aux théories holistes et post-popperiennes, et semble déterminer, à chacune des étapes de cette évolution, les contraintes et limites de l'empirisme, et les débats liés à ses redéfinitions successives. L'expérience cruciale a d'abord été un paradigme de la théorie de la science classique, jusqu'à l'épistémologie popperienne : elle représente en effet un cas (le seul) où l'expérience possède un rôle décisif dans un choix théorique, par la possibilité de réfuter une hypothèse physique, et par conséquent d'en confirmer la contraire. Elle semble donc à l'abri des attaques de Popper contre l'inductivisme, et il a fallu attendre la popularisation dans les années 1950-1960 des arguments de *La Théorie Physique* de Duhem, *via* ses héritiers anglo-saxons (Quine et Kuhn notamment) pour que soit mis en cause son caractère central.

En dépit de ces apories épistémologiques, reste que l'idée d'expérience cruciale joue encore un rôle heuristique important, comme en témoignent les récents

usages du terme dans l'histoire de la physique quantitative, et que sa mise en cause n'a pas éliminé le point de vue empiriste. On attribue souvent à Bacon l'invention de l'expression *experimentum crucis*. En réalité, elle ne se trouve pas chez lui et l'analyse célèbre proposée dans le *Novum Organon* (II, § 36) définit ce qu'il appelle *instantia crucis* (instance de la croix). Les quinze instances prérogatives, chez Bacon (voir *Novum Organum* II, § 22 jusqu'à la fin) sont des particuliers, des faits et non spécifiquement des expériences, mais pas non plus de simples exemples, puisqu'elles ont valeur heuristique et orientent l'esprit. L'*instantia crucis* à plus forte raison, que Bacon va précisément définir comme l'instance finale, la seule qui ait valeur de décision, et qui nécessite, pour être produite, l'effort « délibéré et concerté » de l'expérimentateur. « Au nombre des instances prérogatives, nous placerons au quatorzième rang les instances de la croix, en empruntant le mot aux croix qui, dressées aux bifurcations, indiquent et signalent la séparation des chemins. Nous les appelons aussi instances de décision ou de jugement. [...] Lorsque dans l'étude d'une nature, l'entendement est placé dans un état d'équilibre, ne sachant à laquelle de deux natures (ou parfois d'un plus grand nombre) doit être attribuée ou assignée la cause de la nature étudiée [...] les instances de la croix montrent que le lien de l'une de ces natures avec la nature étudiée est étroit et indissoluble ; ce qui met un terme à la question, la première nature étant alors retenue comme cause, l'autre étant écartée et répudiée. Ainsi, les instances de cette sorte répandent la plus grande lumière ; elles sont, pour ainsi dire, d'une grande autorité et d'un effet tel que parfois la carrière de l'interprétation y prend fin et s'y achève. » Même si Bacon suggère la possibilité d'une décision entre plus de deux thèses rivales, on a retenu du *Novum Organum*, comme le suggèrent certains des exemples de Bacon (mouvement de la terre ou des astres), l'idée de bifurcation. L'instance de la croix est ce fait qui, tel un panneau indicateur, permet de choisir entre des thèses rivales.

C'est en effet uniquement dans le cas d'une rivalité de deux (ou plus) hypothèses exclusives l'une de l'autre et surtout exhaustives (couvrant l'ensemble des possibilités, ce qui peut chez Bacon nécessiter plus de deux hypothèses) que l'*instantia crucis* joue son rôle décisif, et c'est là évidemment que se situe un point de fragilité de la notion. L'*instantia crucis*, bien avant Popper, joue sur la réfutation et la méthode n'en est donc pas inductive : c'est en contredisant une hypothèse (ou plus) qu'elle donne « autorité » à la restante. L'« instance » étant pour Bacon plus souvent délibérément constituée que simplement constatée, il était naturel que Hooke traduise l'expression de Bacon en *experimentum crucis* (*Micrographia*, 1665, p. 54). La notion ainsi transformée joue un rôle central dans la controverse Hooke/Newton, où elle acquiert probablement sa légitimité et sa centralité épistémologique (cf. Feyerabend, p. 34-51). C'est dans les textes de Newton consacrés à l'optique qu'elle est spécifiée et approfondie, Newton reprenant l'expression à Hooke et

décrivant en détail le processus de son *experimentum crucis* sur la réfraction (*Philosophical Transactions*, p. 3078 ; Cohen, p. 50) et en faisant son argument final contre Hooke quant à la nature des couleurs et de la lumière (p. 5101-5103, p. 133-135). À partir de ce moment, la notion d'*experimentum crucis* a partie liée avec la question de la nature de la lumière, et les exemples les plus fameux d'expérience cruciale vont vouloir trancher ce point. Mais surtout l'expérience cruciale fournit un paradigme de certitude en philosophie naturelle. L'expérience cruciale de Newton lui fournit une conclusion parfaitement claire, et qui n'a plus rien d'une hypothèse : la lumière est une substance. Quant à savoir ce qu'elle est « de manière plus absolue cela n'est pas si simple, et je ne vais pas mêler les conjectures aux certitudes » (p. 3081, p. 57). L'expérience cruciale, en éliminant les autres voies d'explication causale, donne une certitude entière à la théorie. Comme l'ont remarqué Kuhn dans sa présentation de ces lettres de Newton, puis Koyré, il y a bien des extrapolations dans la présentation de son expérience par Newton, et l'*experimentum crucis* est largement dépendante, dans son interprétation comme dans sa mise en œuvre, du nouveau contexte théorique qu'elle est précisément censée confirmer. Par ailleurs, elle suppose qu'on puisse éliminer avec certitude une au moins des hypothèses, la vérité de l'hypothèse restante se déduisant, par réduction à l'absurde, de la fausseté des autres. Mais on entre ici dans le domaine de la critique possible de l'expérience cruciale, dont les arguments les plus célèbres sont fournis par Pierre Duhem.

Duhem, dans *La Théorie Physique* (2^e partie, chap. VI, § 3) critique en effet l'expérience cruciale avant de s'en prendre plus spécifiquement à la « méthode newtonienne » et à la connaissance inductive, qui sont traitées aux paragraphes 4-5. Duhem résume ainsi la méthode de Bacon : « Supposez que deux hypothèses seulement soient en présence ; cherchez des conditions expérimentales telles que l'une des hypothèses annonce la production d'un phénomène et l'autre la production d'un phénomène tout différent ; réalisez ces conditions et observez ce qui se passe ; selon que vous observerez le premier des phénomènes prévu ou le second, vous condamneriez la seconde hypothèse ou la première ; celle qui ne sera pas condamnée sera désormais incontestable ; le débat sera tranché, une vérité nouvelle sera acquise à la Science » (Duhem, 1906, p. 286). L'exemple central, ici encore, concerne la nature de la lumière, Duhem examinant ensuite la fameuse expérience de Foucault, considérée alors comme cruciale pour décider de la nature (ici, ondulatoire) de la lumière.

On ne dit pas assez souvent que l'argument de Duhem est double. Le premier élément est simplement un prolongement du holisme énoncé dans le paragraphe 2 : une expérience négative ne permet pas de rejeter une hypothèse isolée, mais un système entier (p. 284). « Ce n'est pas entre deux hypothèses que tranche l'expérience de Foucault ; c'est entre deux

ensembles théoriques dont chacun doit être pris en bloc » (p. 287). Mais le second élément vaut à lui tout seul, et révèle toute l'ingéniosité de Duhem. C'est un argument purement logique, qui répond ainsi à la structure déductive de l'*instantia crucis*. Même si l'on admet, oubliant les objections du paragraphe 2, que « les faits, en condamnant l'un des deux systèmes, condamnent à coup sûr la seule supposition douteuse qu'il renferme », on ne peut en déduire que l'*experimentum crucis* « transforme en vérité démontrée l'une des deux hypothèses en présence, de même que la réduction à l'absurde d'une proposition géométrique confère la certitude à la proposition contradictoire » (p. 288). En effet, deux hypothèses de physique rivales ne forment pas un dilemme comme deux propositions contradictoires, et Duhem affirme, contre Mill et son induction par élimination, l'irréductibilité de la physique à la logique. On n'a jamais toutes les hypothèses. « La lumière peut être une rafale de projectiles ; elle peut être un mouvement vibratoire ; lui est-il interdit d'être quoi que ce soit d'autre ? [...] Le physicien n'est jamais sûr d'avoir épuisé toutes les suppositions imaginables ; la vérité d'une théorie physique ne se décide pas à croix ou pile » (p. 288-289).

Est-ce la lucidité remarquable du « physicien théoricien » Duhem, dans ce passage écrit avant 1905, qui a fait la fortune de sa critique de l'*experimentum crucis*, ou est-ce la lecture et l'interprétation de ce chapitre VI de la *Théorie Physique* par ses successeurs anglosaxons ? Il semble en tout cas que la confusion soit souvent faite entre les arguments holistes et les démonstrations chez Duhem (notamment au chap. IV) de la dépendance de l'expérimentation par rapport à la théorie d'une part, et la critique de l'*experimentum crucis* d'autre part : comme si son enjeu se confondait avec celui, devenu central dans l'épistémologie contemporaine, du poids de l'expérience – ce que Quine appellera ensuite le « tribunal de l'expérience ». Il faut noter par exemple que l'argument réel de Duhem, contrairement à la thèse holiste, n'atteint pas l'épistémologie poppérienne et est même repris sous une forme transformée par Popper (voir Popper, 1959, p. 277 ; et Boyer, 1994). Popper définit l'expérience cruciale comme une expérience falsifiante, qui en cas de conflit rejette une théorie, mais (conformément à l'argument de Duhem) ne donne aucune certitude positive pour la théorie survivante. Il est donc curieux que l'on ait fréquemment utilisé ou cité les arguments duhémiens contre l'*experimentum crucis* pour « dépasser » l'épistémologie poppérienne et aussi, certes de manière différente, l'épistémologie analytique classique issue du cercle de Vienne, alors que Duhem distingue bien son argument logique de ses autres thèses – l'impossibilité de réfuter une hypothèse isolée (holisme), la dépendance de l'expérience par rapport à la théorie (*theory-ladenness*), la théorie physique comme représentation et non comme explication des phénomènes (instrumentalisme). C'est peut-être un malentendu qui a ainsi placé l'idée d'expérience cruciale – définie au départ, et jusqu'à

Duhem et Popper, en termes d'expérimentation – au cœur des débats épistémologiques contemporains – centrés, depuis Carnap, sur le rapport de l'expérience à la construction théorique ; mais les conséquences en sont importantes. On constate *a posteriori* toute l'ambiguïté de l'usage du mot *experimentum*, qui a permis un glissement vers « expérience ».

C'est Quine qui, dans son fameux article de 1951, « Les deux dogmes de l'empirisme », a repris de la manière la plus remarquable mais peut-être la plus trompeuse le problème de Duhem. Quine dénonçait deux dogmes, « au fond identiques », la distinction entre énoncés analytiques et synthétiques, et le réductionnisme – autrement dit la thèse selon laquelle on peut renvoyer tout énoncé à son contenu dans l'expérience – en se fondant sur Duhem : « Nos énoncés sur le monde extérieur affrontent le tribunal de l'expérience sensible non pas individuellement mais comme un corps organisé. » Quine généralisait au langage entier la thèse de Duhem sur la physique, et ainsi lui donnait une portée qui, comme on l'a vu, dépassait l'argument initial.

La critique de l'*experimentum crucis*, associée au holisme et portée par la vague d'intérêt ainsi suscitée pour l'œuvre de Duhem (longtemps beaucoup mieux connue aux États-Unis qu'en France, grâce à de nombreuses traductions, et à Quine, Kuhn et Lakatos), est reprise dans le cadre d'une mise en cause générale de « l'empirisme classique ». On la retrouve aussi bien chez Feyerabend (« Classical empiricism », 1981) que chez Lakatos (« The methodology of scientific research programmes »), souvent pour rejeter le falsificationnisme sous toutes ses formes, naïf ou sophistiqué, mais aussi et plus généralement pour contester toute prétention de la science à la vérité (ou à la « vérité-similitude » poppérienne) qui serait fondée sur sa portée ou sa « différence » empirique. En proclamant qu'il n'y a pas d'expérience cruciale (Lakatos, p. 86), les postpoppériens affirment qu'une théorie ne peut jamais être ni prouvée ni réfutée, et donc que sa valeur ou sa fécondité se fondent sur d'autres critères que la validation expérimentale, positive comme négative. Ils rejoignent ainsi, par d'autres voies, les thèses de Kuhn (1962) et plus généralement la mise en question du réalisme scientifique. Quoi qu'il advienne de ces débats, l'*experimentum crucis* résiste peut-être à ces critiques. Comme l'a noté Hacking (1983), c'est l'expérimentation qui est la meilleure réponse aux débats théoriques sur le poids de l'expérience, et les exemples, contemporains et historiques, d'expérience cruciale, même problématiques (l'expérience de Michelson, celles de Yang et Lee sur la parité, celles de Millikan, celle récemment d'Aspect) montrent qu'elle a en pratique bien survécu aux critiques duhémiennes et à leurs reprises. L'avènement de la physique quantique n'a pas, au contraire, réduit le rôle de l'expérimentation ; et celle-ci est parfois cruciale, sinon au sens de Bacon, du moins en un sens atténué qu'il mentionnait lui-même : celui, non de donner une vérité définitive, mais de montrer le chemin, la voie

provisoire empruntée par la connaissance humaine à un carrefour de son histoire. Lakatos lui-même reconnaît qu'une expérience est cruciale après coup, et c'est peut-être à l'histoire des sciences, et à la pratique scientifique, de déterminer en fin de compte le statut contesté de l'*experimentum crucis*.

► BACON F., *Novum Organum* (Londres, 1620), éd. Spedding, Ellis & Heath, Londres, 1858, vol. I (trad. fr. M. Malherbe & J.M. Pousseur, Paris, PUF, 1986). — BOYER A., « Le problème de Duhem », *Introduction à la lecture de Karl Popper*, Paris, PENS, 1994. — BRENNER A., *Duhem, science, réalité et apparence*, Paris, Vrin, 1990. — COHEN I.B., *Isaac Newton's Papers and Letters on Natural philosophy*, Cambridge, Harvard Univ. Press, 1958. — DUHEM P., *La théorie physique, son objet, son histoire*, Paris, Rivière, 1906, 1914 (rééd., Vrin). — FEYERABEND P., *Philosophical Papers 2, Problems of empiricism*, Cambridge Univ. Press, 1981. — HACKING I., *Representing and Intervening*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1983 (trad. fr. Paris, Bourgois, 1989). — HOOKE T., *Micrographia* (1665), New York, Dover, 1961. — KOYRÉ A., *Études newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968. — KUHN T.S., *The structure of scientific revolutions*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1962 (trad. fr., *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983). — LAKATOS I., *The methodology of scientific research programmes*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1978 (trad. fr. in *Histoire et méthodologie des sciences*, Paris, PUF, 1995). — POPPER K., *Logic of scientific discovery*, Londres, Hutchinson, 1959 (trad. fr., Paris, Payot, 1974); *La connaissance objective*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1972 (trad. fr. J.J. Rosat, Paris, Flammarion, 1991). — QUINE W.V., « Two dogmas of empiricism » (1951), trad. fr. in JACOB P., *De Vienne à Cambridge*, Paris, Gallimard, 1980.

Sandra LAUGIER

→ Conventionalisme ; Couleur ; Duhem ; Empirisme ; Expérience ; Preuve ; Quine ; Réfutabilité ; Test.

EXTENSION

MATHÉMATIQUES

Le désir d'étendre un résultat, un concept, le champ d'application d'une méthode, a souvent constitué une puissante motivation à l'activité mathématique. Mais le terme « extension » a aussi acquis au début du siècle un sens précis en algèbre : une structure algébrique, un groupe, un corps par exemple, est l'extension d'une autre structure de même type si elle la contient et vérifie le cas échéant diverses conditions supplémentaires. L'intérêt de distinguer spécifiquement ces liaisons est qu'elles sont utilisées pour explorer les propriétés des structures concernées. Construire une histoire de cette notion d'extension s'avère difficile pour deux raisons : d'une part, c'est au cœur des recherches les plus techniques du temps qu'elle s'élabore et que doivent donc être repérés continuités et changements de perspectives ; d'autre part, si elle capture les échos d'une multitude de micro-débats — mettant en jeu tour à tour la pertinence d'analogies entre divers champs, le choix et la nature même des concepts fondamentaux, la représentation de l'activité mathématique —, elle n'en a pas été l'enjeu central, ni un principe organisateur.

Prenant acte de cette situation après tout banale, nous suivrons la notion au plus près, en tant que témoin des changements de la pratique mathématique dans la première moitié du XX^e s.

Extensions de corps

C'est Ernst Steinitz qui, en 1910, introduisit le mot « extension » (*Erweiterung*) pour fonder sur cette notion sa vaste exploration de la structure de corps. Nous nous attacherons donc d'abord, selon les indications de Steinitz lui-même, aux principaux travaux qui ont motivé ses recherches : ils concernent la théorie galoisienne des équations et la théorie des nombres.

Résoudre par radicaux une équation polynomiale, c'est en exprimer les solutions comme fonctions rationnelles des coefficients de l'équation et de leurs diverses racines (carrées, cubiques, etc.) — c'est-à-dire à l'aide d'additions, de multiplications, de soustractions, de divisions de ces coefficients et de leurs racines. Confronté à l'impossibilité d'une telle résolution pour les équations générales de degré supérieur ou égal à 5, Évariste Galois proposa vers 1830 un changement de programme : ne plus chercher des formules de résolution par radicaux, mais des conditions de résolubilité qui se liraient sur ce que Galois appela le groupe de l'équation, l'ensemble des permutations de ses solutions (complexes) qui gardent trace de toutes les relations rationnelles existant entre ces solutions. Par exemple, pour l'équation $X^4 - 2$, les quatre solutions complexes a, b, c, d sont deux à deux opposées, disons $a + b = 0$ et $c + d = 0$, et le groupe de Galois ne retient donc pas la permutation envoyant a sur b, b sur c, c sur d, d sur a , car elle ne maintiendrait pas ces relations ; le groupe n'a en fait que 8 éléments, parmi les 24 permutations *a priori* possibles entre les quatre solutions. Si, en étendant par adjonction d'irrationalités appropriées le domaine de base constitué au départ par les coefficients de l'équation, l'équation se décompose, le groupe de Galois associé diminue. Sur notre exemple, l'adjonction de $\sqrt{2}$ permet la factorisation $X^4 - 2 = (X^2 - \sqrt{2})(X^2 + \sqrt{2})$ et le groupe alors associé à l'équation n'a plus que 4 éléments, car il doit préserver chaque facteur et ne permuer qu'entre elles leurs deux solutions respectives. La condition de résolubilité par radicaux donnée par Galois est que le groupe de l'équation puisse être ainsi dévié en une suite décroissante de sous-groupes ; à chaque étape correspond un agrandissement du domaine de base, par adjonction d'irrationalités, et une décomposition du polynôme de départ.

Un autre problème mobilisa à peu près simultanément les mathématiciens, celui de l'extension à d'autres nombres des propriétés arithmétiques des entiers — la décomposition unique d'un entier en un produit de nombres premiers ou l'existence d'un plus grand commun diviseur à plusieurs entiers, par exemple. En 1832, Carl Friedrich Gauss en montra la validité pour les nombres complexes de la forme $a + b\sqrt{-1}$ (a et b des entiers) ; il s'en servit pour établir des

lois importantes, dites de réciprocité, concernant les nombres premiers. Cherchant à généraliser ces lois, Ernst Kummer découvrit dans la décennie suivante que, pour d'autres familles de nombres complexes formés eux aussi à partir de racines de l'unité — les nombres cyclotomiques —, l'unicité de la décomposition en facteurs premiers n'était plus assurée ; il introduisit pour la récupérer des facteurs premiers « idéaux ». Ces facteurs ne sont pas des nombres : ce que donna Kummer est un critère qui, s'il est vérifié, définit le fait qu'une puissance donnée d'un certain facteur idéal divise un nombre cyclotomique. Outre que ce critère ne se généralisait pas facilement à d'autres familles de nombres complexes algébriques — c'est-à-dire de nombres solutions d'équations polynomiales à coefficients rationnels —, le mode d'introduction de ces facteurs idéaux, leur mode d'existence même, ne satisfaisait pas tous les mathématiciens.

Plusieurs alternatives furent donc proposées, dont les plus célèbres sont dues à Richard Dedekind en 1871 et à Leopold Kronecker en 1882. Les débats provoqués par ces différentes constructions sont étroitement liés à ceux, contemporains, sur la notion même de nombre. Dans les deux cas, par exemple, Dedekind adopta une position ensembliste, des ensembles de nombres existants lui paraissant des objets plus concrets que des critères de divisibilité.

Son arithmétique se développe dans tous les corps (*Körper*) de nombres, un ensemble de nombres complexes algébriques formant un corps dès qu'il est stable par les quatre opérations ; un nombre algébrique est dit entier s'il est solution d'une équation polynomiale dont les coefficients sont des entiers ordinaires, celui du terme de plus haut degré étant 1. Les objets essentiels de la théorie sont aussi appelés des idéaux — une terminologie rendant hommage à Kummer —, mais ce sont pour Dedekind des sous-ensembles d'entiers algébriques du corps choisi, stables par addition et soustraction et par multiplication par tous les entiers algébriques du corps. C'est au niveau des idéaux, et non des entiers algébriques, que se retrouvent les propriétés arithmétiques usuelles : ainsi, tout idéal se décompose de manière unique en un produit d'idéaux premiers. L'approche de Kronecker, quant à elle, reflétait sa prédilection de plus en plus âpre pour les entiers ordinaires comme seul fondement légitime, et donc légitimant, des mathématiques ; la base de sa théorie, la détermination du plus grand commun diviseur de plusieurs entiers algébriques appartenant à un certain domaine de rationalité (*Rationalitätsbereich*, l'équivalent des corps de Dedekind), repose ainsi en définitive sur un calcul dans les entiers usuels. Si Dedekind et Kronecker s'intéressaient tous deux à l'agrandissement des ensembles de référence, corps ou domaines de rationalité, Kronecker, selon ses propres termes, préférerait étendre ces domaines selon la dimension, en adjoignant des variables, plutôt qu'analytiquement, en adjoignant des nombres complexes et leurs fonctions. Il s'agit d'une différence de point de vue, plus que de contenu : pour fixer les idées,

l'ensemble des entiers complexes $a + b\sqrt{-1}$ qui étend les entiers ordinaires par adjonction de $\sqrt{-1}$ est interprété par Kronecker à partir des polynômes à une variable T et à coefficients entiers, en identifiant deux polynômes qui ne diffèrent que par un multiple de $T^2 + 1$. Cette perspective permit à Kronecker de développer l'analogie pour lui fondamentale entre la théorie des nombres algébriques et celle des fonctions algébriques (solutions f d'une équation polynomiale $P(z, f(z)) = 0$) qu'il traita simultanément.

Ces distinctions importantes, ancrées dans des conceptions pratiques et philosophiques particulières, marquèrent la réception différenciée et le développement de ces théories arithmétiques ; mais elles ne doivent pas faire oublier les points communs, cruciaux pour l'élaboration de la notion d'extension. Tout d'abord, dans ce deuxième tiers du XIX^e s., de solides liaisons ont été mises en place entre arithmétique et théorie de Galois — Dedekind, par exemple, a interprété le groupe de Galois d'une équation comme groupe de transformations du corps engendré par ses solutions. Ensuite, l'idée que des phénomènes fondamentaux peuvent être relatifs à un domaine ou un corps ambiant a été abondamment documentée : il en est ainsi de l'irréductibilité des polynômes, ou de la primalité — par exemple, l'idéal composé des multiples de 5 dans les entiers ordinaires est premier, alors qu'il se décompose en deux idéaux premiers distincts dans les entiers de Gauss. L'intérêt se focalise alors fortement sur le passage d'un corps à un autre plus grand, par adjonction de nombres algébriques ou de variables.

Ces aspects apparaissent nettement dans la synthèse qu'écrivit David Hilbert en 1897 à la demande de la Deutsche Mathematiker-Vereinigung : l'étude relative des corps de nombres, y compris lorsque le corps de base lui-même est plus grand que celui des nombres rationnels, occupe une place centrale ; Hilbert consacra ainsi une section aux cas de corps contenant celui des nombres cyclotomiques et tels que le groupe de Galois relatif soit cyclique, c'est-à-dire engendré par un seul élément. Il décrivit à l'aide des sous-groupes du groupe de Galois certaines composantes de la décomposition d'un idéal premier d'un corps par passage à un corps de nombres algébriques plus grand (un surcorps, *Oberkörper*). Dans des travaux ultérieurs, Hilbert fut amené à postuler l'existence, pour tout corps de nombres, d'un surcorps de Galois relatif doit être commutatif, un idéal premier du corps de base doit se décomposer dans le surcorps en un produit d'idéaux premiers tous distincts et de plus y devenir principal, c'est-à-dire composé des multiples d'un seul entier algébrique du surcorps. À peu près à la même époque, Heinrich Weber s'intéressa lui aussi à l'existence de surcorps particuliers (qu'il appelle les corps de classes) dont les propriétés sont associées à la décomposition de classes d'idéaux du corps de base. Ces conjectures ne seront prouvées qu'au XX^e s., mais une nouvelle étape a été franchie : les corps et leurs surcorps sont en tant que tels des objets d'étude à part entière, qui peuvent en

particulier être des solutions à un problème : Weber proposa d'ailleurs parallèlement une définition formelle (nous dirions axiomatique) de la notion de corps, qui ne dépend plus de la nature particulière de leurs éléments.

C'est aussi de ce point de vue formel que se plaça Steinitz en 1910. Son objectif était de déterminer les types de corps possibles : il prouva qu'on peut tous les réaliser comme surcorps – mais Steinitz introduit ici une autre terminologie, parlant non de surcorps mais d'« extension », *Erweiterung (skörper)*, pour en souligner le mode d'obtention – d'un corps de base, ce dernier étant nécessairement soit le corps des nombres rationnels, soit un corps à un nombre fini, premier, d'éléments. Les extensions s'obtiennent à partir du corps de base par des adjonctions successives d'éléments soit algébriques soit transcendants (*i.e.* solutions ou non d'équations polynômiales à coefficients dans le corps de base), ce dernier cas revenant à l'adjonction de nouvelles variables. Steinitz analysa en détail les difficultés particulières qui surgissent lorsque le corps de base est fini ; il montra également, à l'aide de l'axiome du choix, que chaque corps K possède une unique clôture algébrique, c'est-à-dire une extension où tous les polynômes à coefficients dans K se décomposent en facteurs du premier degré.

Dans cet article, Steinitz n'abordait aucun aspect arithmétique. S'il est pourtant héritier des travaux décrits plus haut, c'est non seulement parce qu'ils ont contribué à faire de la structure de corps un sujet d'étude, mais aussi parce qu'ils en ont fourni de multiples exemples nouveaux : outre les corps de nombres et de fonctions algébriques, les corps finis, d'autres encore – comme les corps des nombres p -adiques présentés en 1907 par Kurt Hensel pour parfaire l'analogie entre nombres et fonctions en développant du côté des nombres un équivalent des développements en série –, étaient déjà venus enrichir la représentation de cette structure.

L'article de Steinitz a eu un grand retentissement et a servi de modèle pour examiner d'autres structures. Le traité d'algèbre de Bartel van der Waerden, paru en 1930-1931 et considéré comme le premier manuel adoptant un point de vue structural, donna en particulier une large diffusion à la terminologie et aux résultats de Steinitz. L'exploration des extensions de corps, leur utilisation dans des problèmes algébriques et arithmétiques variés, ont fait l'objet de nombreuses recherches jusqu'à nos jours. La théorie des corps de classes, en particulier, cherche à décrire les propriétés des extensions à partir du corps de base ; seul le cas où le groupe de Galois relatif est commutatif a été traité de manière satisfaisante, mais diverses constructions et conjectures (programme de Langlands, théorie de Boch et Kato) ont été proposées pour des situations plus générales. Un autre aspect est la liaison avec la géométrie algébrique, l'étude algébrique du corps des fonctions sur une variété (et de ses avatars plus récents)

pouvant fournir de nombreux renseignements géométriques ; un exemple simple est l'interprétation du degré de transcendance de ce corps – c'est-à-dire du nombre de variables indépendantes nécessaires pour l'engendrer sur le corps de base – comme la dimension de la variété. Le changement de corps de base est d'ailleurs un outil important dans la géométrie algébrique actuelle.

Extensions de groupes

La théorie de Galois a bien sûr aussi contribué à l'élaboration d'une autre structure abstraite, celle de groupe. Après les travaux de Camille Jordan et d'Arthur Cayley dans la deuxième moitié du XIX^e s., Otto Hölder avait montré vers 1893 comment construire, par dévissage à partir de sous-groupes cycliques, des groupes de nombre d'éléments une puissance d'un nombre premier. C'est ce processus qu'Otto Schreier systématisa dans sa thèse en 1923 et qui fut connu ultérieurement comme le « problème de l'extension (de groupes) ». Un groupe G est une extension d'un groupe A par un groupe B si G contient A comme sous-groupe distingué (c'est-à-dire tel que $gA = Ag$ pour tout élément g dans G) et si le quotient est isomorphe à B . Schreier explicita des conditions nécessaires et suffisantes à l'existence de telles extensions et s'en servit pour construire entre autres les groupes à p^3q éléments, avec p et q premiers. En 1934, Reinhard Baer montra qu'on peut munir d'une structure de groupe les classes d'extensions d'un groupe A par un groupe B elles-mêmes – autrement dit, les extensions sont alors perçues comme des objets combinables entre eux. Dans les années 1940, différents types d'extensions de groupes furent explorés en détail et jouèrent un rôle important dans le programme qui aboutit dans les années 1970 à la classification des groupes finis. Comme le souligne Hans Zassenhaus en 1949, si les groupes finis simples (c'est-à-dire sans sous-groupe distingué non trivial) sont les briques à partir desquelles tout groupe fini est construit, la théorie de l'extension de Schreier indique comment on peut construire.

Les liens avec la théorie des corps, *via* la théorie de Galois, restèrent d'ailleurs étroits : Philipp Furtwängler, qui fut le directeur de thèse de Schreier, utilisa en 1930 les résultats de ce dernier pour démontrer certains théorèmes sur le corps de classes de Hilbert. À peu près à la même époque fut posé le problème de construire une extension du corps des rationnels dont le groupe de Galois soit un groupe fini donné à l'avance ; malgré de nombreux résultats, il n'est toujours pas complètement résolu.

La théorie des extensions de groupes trouva par ailleurs un nouveau souffle vers 1940 lorsque Samuel Eilenberg et Saunders Mac Lane constatèrent que les groupes classifiant les extensions possibles d'un groupe par un autre étaient analogues à d'autres groupes intervenant en topologie ; ils se proposèrent alors d'utiliser les extensions de groupes comme outil

pour la topologie. Pour mener à bien ce programme, ils développèrent de nombreuses notions nouvelles, comme celle de catégorie ou celle d'application naturelle (ou foncteur selon la terminologie actuelle), qui innervent désormais de nombreux domaines des mathématiques : géométrie algébrique, algèbre homologique, topologie. La théorie permet aussi de mesurer les obstructions possibles à des extensions de type donné.

Genèse ou axiomatique

Nouveaux modes de définition des objets, nouveaux intérêts en cascade pour les ensembles structurés, nouvelles unités forgées par la circulation des mêmes outils entre branches des mathématiques : ce bref parcours a permis de retrouver les traits bien connus de la modernité mathématique au début du XX^e s. Mais aussi d'en percevoir quelques caractères plus secrets : l'observation des dépendances entre propriétés et espaces de référence, la conception architecturale non seulement des mathématiques, mais de leurs objets mêmes. Si la présentation axiomatique préconisée par Hilbert s'opposait à celle, génétique, mettant en valeur l'élargissement progressif des notions, les travaux de

Steinitz, de Schreier et de leurs successeurs, ont réintroduit subtilement la genèse dans l'axiomatique, en faisant de l'extension un principe de constitution.

► CORRY L., *Modern Algebra and the rise of mathematical structures*, Bâle/Boston/Berlin, Birkhäuser « Science Network », 1996. – DIEUDONNÉ J. dir., *Abregé d'histoire des mathématiques 1700-1900*, Paris, Hermann, 1978. – DUGAC P., *Richard Dedekind et les fondements des mathématiques*, Paris, Vrin, 1976. – EDWARDS H., « Mathematical Ideas, ideals, and ideology », *Mathematical Intelligencer*, 1992, 14-2, p. 6-19. – EILENBERG S. & MAC LANE S., *Collected Works*, Orlando, Academic Press, 1986. – HILBERT D., *Gesammelte Abhandlungen*, vol. I, Berlin, Springer, 1932. – PURKERT W., « Zum Genesis des abstrakten Körperbegriffs », *NTM*, 10 (1973) : Teil I : 1, p. 23-37 ; Teil II, 2, 8-20. – SCHREIER O., « Über die Erweiterungen von Gruppen I », *Monatsh. für Math. und Physik*, 1926, 34, p. 165-180 ; II, *Abhandlungen Math. Sem. Hamburg*, 1926, 4, p. 321-346. – STEINITZ E., « Algebraische Theorie der Körper », *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1910, 137, p. 167-309. – WUSSING H., *Die Genesis des Abstrakten Gruppen Begriffs*, Berlin, VEB-Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1969.

Catherine GOLDSTEIN

→ Analyse diophantienne ; Ensemble ; Équation ; Groupes et symétrie ; Transformation géométrique.

F

FACTEUR D'ÉCHELLE

La question des facteurs d'échelle retient l'attention des chercheurs de nombreuses disciplines et concerne autant le progrès des techniques que des théories contemporaines. L'enjeu conceptuel traverse les frontières disciplinaires parce qu'il renvoie à une problématique fondamentale de l'objectivité scientifique : la dépendance du résultat des mesures en fonction du rapport entre l'ordre de grandeur du phénomène observé et l'unité de mesure adoptée. Toute mesure est le produit d'une comparaison entre le mesurant et le mesuré. Ce rapport de commensuration constitue l'échelle de la mesure et détermine le degré de précision de l'observation. La prise en compte des facteurs d'échelle intervient lorsqu'on entend transposer un relevé ou un résultat entre deux échelles éloignées. Un simple changement d'unité ou l'adjonction d'un coefficient risque souvent de produire des effets aberrants. La discipline scientifique exige l'apprentissage d'un certain « réalisme des ordres de grandeur » pour prévenir la manipulation aveugle des mathématiques : la dixième décimale du nombre que livre une calculatrice n'a de sens que si elle apporte encore une information significative sur le phénomène considéré. C'est ce que rappelle en 1928 Bachelard dans son *Essai sur la connaissance approchée* : « L'ordre de grandeur devient ainsi une première connaissance approchée qui isole les phénomènes, qui écarte de l'acte de connaître les occasions de divergence mineure et fréquente, tout risque de se fixer à un simple accident. Il est, en physique, le premier acte de la pensée d'approximation » (G. Bachelard, *Essai sur la connaissance approchée*, p. 78).

Le sens physique de la « précision » se détache d'emblée de l'idéal mathématique d'une exactitude absolue, non seulement en raison des contraintes expérimentales mais aussi par sa nature même d'approximation. Une valeur numérique infiniment précise, absolue, n'est qu'une abstraction, elle n'a aucun sens physique. Toute mesure réelle rencontre ses limites : une marge d'erreur qui correspond aussi à une résolution maximale. La qualité de l'information ne saurait dans ces conditions demeurer inchangée quand le chiffre obtenu se trouve ensuite modifié d'un facteur important (pour extrapoler ou interpoler de l'information). L'apparente neutralité de la manipulation

numérique occulte les modalités du remplacement concret de l'instrument de mesure, parfois de la métrique employée, ainsi que la transformation des procédures techniques d'objectivation. Au contraire, la fréquentation de ces données *phénoménotecniques* « nous enseigne un relativisme qui tient compte à la fois de l'aberration des expériences et du "poids" du réel examiné » (G. Bachelard, *Essai sur la connaissance approchée*, p. 77).

Si les propriétés des figures du géomètre sont indifférentes au choix des unités, la mise en œuvre des plans de l'architecte et la fiabilité du travail des géographes dépendent étroitement de l'échelle : au sein de ces deux traditions savante se manifeste le premier souci d'explicitation, sinon de théorisation, sa fonction. La définition de l'*Encyclopédie*, ou *Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, est éclairante sur cette double origine, scientifique et technique : « En géographie ou en architecture, une échelle est une ligne divisée en parties égales et placées au bas d'une carte, d'un dessin ou d'un plan, pour servir de commune mesure à toutes les parties d'un bâtiment ou bien à toutes les distances et à tous les lieux d'une carte » (cité par B. Lepetit in *Jeux d'échelles. La micro-analyse à l'expérience*, p. 82). D'un côté, le géographe, avec sa carte, représente un site à plus ou moins grande échelle (la grande échelle étant celle qui donne le plus de détails) ; de l'autre, l'architecte avec son plan, dessin harmonieux dont il entend obtenir la construction fidèle ; comment s'opère la synthèse ? La notion d'échelle désigne une analogie proportionnelle entre un espace réel (géographique ou architectural) et l'espace géométrique. Dans les deux cas, quoique le rapport de modélisation s'inverse, la fonction pratique demeure : il s'agit de conserver un ensemble de correspondances métriques entre un schéma abstrait et son objet référent, que ce dernier préexiste ou non.

L'échelle rigoureuse est caractérisée en cartographie par l'équilibre qu'elle instaure entre la lisibilité et l'exhaustivité afin de servir au mieux l'orientation. La maîtrise des facteurs d'échelle s'exprime à travers les conventions adaptées à chaque carte : les cartes à très grande échelle, ou plans, sont réservés aux usages locaux ; les cartes à grande échelle (1/10 000 à 1/25 000) et à échelle moyenne (1/50 000 à 1/100 000) sont véritablement topographiques ; les cartes à petite échelle ou « cartes d'ensemble » dérivées de

compilation ou suffisamment réduite pour représenter les traits généraux d'un État ou d'un continent. La valeur des distances mesurées aux différentes échelles est supposée tendre vers une limite (mesurée à la plus grande échelle), si bien que l'enjeu des facteurs d'échelle n'est pas tant théorique que pratique. Seules les considérations économiques de la géographie humaine font intervenir la notion « d'effets d'échelle » à propos de la hausse du rendement obtenu par une organisation qui se restructure à une plus grande échelle.

La fonction de l'échelle n'est guère apparue plus claire aux bâtisseurs. Sa spécificité a longtemps été méconnue, car l'« échelle » signifiait la « proportion ». Tant qu'il s'agissait pour l'architecte de mettre « la cage à l'échelle de l'oiseau » ou de justifier les proportions d'édifices en fonction du nombre d'or ou de modèles anthropomorphiques, la question des échelles restait prise dans la discussion sur les normes esthétiques définissant la disposition interne des parties de l'ouvrage. Toutefois, avec l'évolution des matériaux et des techniques, se sont instaurées peu à peu des normes de conception en fonction des dimensions : « Chaque "échelle" devient l'occasion d'une correspondance analogique par le biais d'un argumentaire fondé sur l'idée d'une spécificité de l'architecture associée à chacune de ces échelles » (Ph. Deshayes, « L'intelligibilité de la conception architecturale : l'embrayage comme correspondance à l'espace », in *De l'architecture à l'épistémologie. La question de l'échelle*, p. 222). La constitution empirique d'une vingtaine d'échelles a été le prélude à l'élaboration d'une problématique où chaque échelle de correspondance ne doit plus être considérée séparément mais intégrée à la conception multi-échelonnaire des bâtiments.

Bien qu'à l'origine de la notion, géographes et architectes disposent d'un champ d'expérience n'enfermant que des ordres de grandeur relativement proche au regard de la physique : la nature est parcourue d'un rapport d'échelle de l'ordre de 10^{60} (de l'échelle de Planck à l'échelle cosmologique). La découverte des structures de l'infiniment grand et de l'infiniment petit a imposé progressivement de nouveaux concepts distribués suivant l'échelle : « Ainsi, une structure donnée se caractérise souvent par une échelle ou une gamme réduite d'échelles particulières et, inversement, à une échelle donnée correspond en général un type de structures déterminé » (L. Nottale, *La relativité dans tous ses états*, p. 149). La théorie de la relativité générale et la mécanique quantique provoquent un renversement déterminant des évidences sédimentées au sein de la physique classique : de nouvelles structures émergent des résultats inattendus de l'observation à une autre échelle. L'obscurité de ces objets relativistes et quantiques pour le sens commun, trop habitué aux « choses », l'étrangeté des courbures de l'espace-temps riemannien ou des « incertitudes » de la fonction d'onde de Schrödinger ne s'éclaircissent rétrospectivement que par la relativité de nos concepts : l'espace euclidien ou les schèmes ondulatoire et corpusculaire sont

des analogies adéquates seulement à notre échelle. L'échelle constitue donc une détermination intrinsèque de la modélisation en même temps qu'elle pose le problème de la cohérence des lois physiques entre différentes échelles.

La situation « schématique » actuelle de la science physique est à cet égard problématique : elle est scindée entre la mécanique quantique, dont le formalisme s'applique en microphysique mais échoue à rendre compte du comportement des objets ordinaires, et d'autre part, la mécanique classique et la physique relativiste, qui s'occupent respectivement des moyennes et grandes échelles (la physique ayant adopté une convention inverse à la géographie : la plus petite échelle est celle qui a la résolution la plus fine). Mécanique quantique et relativité générale ne reposent pas sur les mêmes fondements théoriques. Comment comprendre cette incompatibilité théorique et la divergence qui en résulte ?

Nous savons qu'un grandeur physique dépend toujours de l'échelle à laquelle elle est mesurée. Or l'échelle d'un système ne peut être définie que par rapport à un autre système, elle est relative. *Seuls des rapports d'échelle ont un sens, jamais une échelle absolue.* Cette « relativité » intrinsèque des échelles rend le cloisonnement étanche entre les différentes physiques aussi suspect que la séparation des mondes sublunaire et supralunaire une fois connue la relativité de mouvement : les lois de la nature devraient communiquer entre les échelles comme entre les positions. Face à ce défi, de nombreuses pistes ont été explorées dont la plus remarquable du point de vue épistémologique est sans doute la théorie de la « relativité d'échelle » de Laurent Nottale. Cet astrophysicien a élaboré la description d'un espace-temps non-différentiable. En abandonnant l'hypothèse de la différentiabilité tout en conservant celle de la continuité, il fait apparaître une dépendance explicite des coordonnées en fonction des résolutions : $X = F(e)$, autrement dit une variation des distances en fonction de l'échelle. L'adoption d'une géométrie fractale pour l'espace-temps ne signifie pas nécessairement l'attribution des propriétés d'auto-similarité (comme l'ensemble de Mandelbrot qui contient virtuellement un nombre infini d'ensemble de Mandelbrot) mais la dépendance explicite des grandeurs métriques (longueurs, surfaces) en fonction des résolutions spatio-temporelles. La transformation d'échelle prend la forme suivante : $F(e') = F(e).(e/e')^G$, avec l'apparition d'un exposant d'échelle (Gamma) relié à la dimension fractale. Les distances ne convergent plus vers une limite bien définie lorsque la résolution tend vers zéro, au contraire, des fluctuations peuvent entraîner la divergence aux plus petites échelles (comme dans l'exemple bien connu de la côte de Bretagne dont la longueur augmente au fur et à mesure que l'on descend dans le détail de ses anfractuosités).

La principale difficulté de l'approche préconisée, c'est qu'en renonçant à la différentiabilité, le physicien semble se priver de l'outil conceptuel nécessaire à

la définition de grandeurs telles que les vitesses (dérivées des positions) ou les accélérations (dérivées des vitesses). Il ne peut désormais employer d'équations différentielles que si elles agissent aussi dans l'espace des échelles lui-même. Pour cela, une nouvelle variable est intégrée aux équations : on réinterprète les résolutions, non plus seulement comme propriété de l'appareil de mesure et/ou du système mesuré, mais comme propriété intrinsèque de l'espace-temps. La résolution caractérise l'état d'échelle du référentiel au même titre que les vitesses caractérisent son état de mouvement. La méthode de la relativité d'échelle consiste à réintroduire une dérivée explicitement dépendante de la résolution. Ce n'est qu'à la limite d'un intervalle de résolution nul (seul cas considéré par les méthodes classiques) que la dérivée n'existe pas, soit qu'elle devienne infinie, soit qu'elle fluctue sans limite.

Différents niveaux de descriptions des lois d'échelles physiquement possibles (invariantes puis covariantes d'échelle) sont envisagés, depuis l'auto-similarité la plus simple (qui est l'analogie dans l'espace des échelles au mouvement inertiel en physique galiléenne) jusqu'à des lois d'échelle non linéaires (ou dynamique d'échelle). En outre, la théorie permet de comprendre enfin la transition qui s'opère entre les différentes physiques : les grandes échelles présentent l'apparence d'être « lisses » mais plus on descend dans le détail et plus se manifeste le caractère « rugueux » de l'espace-temps à petite échelle. L'espace temps fractal se caractérise par l'existence d'obstacles à toutes les échelles qui vont démultiplier le nombre de géodésiques au point de le rendre infini. Les trajectoires potentielles vont donc constituer un ensemble infini de courbes, elles-mêmes toutes fractales. La description d'une quelconque de ces courbes fait intervenir des coordonnées moyennes, macroscopiques, qui s'identifient, à la limite, à la trajectoire classique (si elle existe), et des fluctuations fractales, dépendantes d'échelle : « La non-différentiabilité de l'espace-temps implique (au minimum) trois effets. Le premier est que chaque géodésique devient fractale. Le deuxième est qu'il existe une infinité de géodésiques là où une seule intervenait classiquement. Le troisième est que le concept de vitesse moyenne (qui reste définissable comme l'avait souligné Feynman) n'est plus unique mais double. La prise en compte de ces trois effets dans les équations du mouvement transforme la mécanique classique en mécanique quantique » (L. Nottale, *La relativité dans tous ses états*, p. 233).

Ayant reçus plusieurs confirmations partielles, la théorie demeure encore trop négligée par la communauté des physiciens pour qu'on puisse évaluer ces conséquences pratiques sur le plan de l'organisation scientifique. Plusieurs observations peuvent toutefois déjà être formulées au sujet de son « profil épistémologique » : l'amplification récurrente du principe de relativité (de Galilée à Einstein puis d'Einstein à Nottale) ; la construction d'une perspective physico-mathématique où deux grandes théories dont on avait proclamé

l'« incommensurabilité » se trouvent rigoureusement relativisées ; l'intégration épistémologique d'une dimension d'échelle, distincte du temps et de l'espace, à l'appréhension des phénomènes.

L'invention de la relativité d'échelle ne constitue pas une nouveauté absolue, elle invite au contraire à reconsidérer l'enquête épistémologique engagée au sujet de l'approximation. Devant la difficulté de concevoir un schématisme adapté aux exigences de la mécanique quantique, Bachelard soupçonnait déjà l'insuffisance du concept de trajectoire différentiable en microphysique : « Dans l'épaisseur même du trait expérimental, (...) on peut toujours inscrire un sous-dessin, une ligne tremblée, une véritable arabesque qui représente précisément l'indéterminé de deuxième approximation. Bref, toute structure linéaire réelle ou réalisée renferme des structures fines. Cette finesse est même illimitée. Il s'agit, en réalité, d'une structure indéfiniment fine » (G. Bachelard, *La philosophie du non*, p. 99). Il relevait ailleurs la nécessité de construire cette expérience de pensée dans une authentique dimension « d'approfondissement » : « À l'intérieur du point symbolique des trois dimensions cartésiennes s'ouvre alors une perspective interne ; tout objet à une dimension interne qui s'ajoute à l'extension externe. Par l'accommodation, nous mettons en ordre un emboîtement de détails. Cet ordre linéaire d'implication est de toute évidence une occasion séparée de multiplicité suffisante pour constituer une dimension » (G. Bachelard, *Études*, Paris, Vrin, 1973, p. 40).

D'autres disciplines que l'épistémologie historique peuvent profiter de cet approfondissement méthodologique. La relativité d'échelle dispose en particulier d'un modèle d'articulation entre échelles qui permet d'éviter le dilemme entre dissociation absolue et réduction à une échelle fondamentale, que l'on trouve généralement en histoire. Depuis *La Méditerranée et le monde méditerranéen à l'époque de Philippe II* et sa distinction entre trois strates de temps (le temps court de l'actualité, le temps intermédiaire du social, le temps immobile de la géographie physique), une question est demeurée sans réponse : « Y a-t-il, ou n'y a-t-il pas, exceptionnelle et brève coïncidence entre tous les temps variés de la vie des hommes ? immense question qui est nôtre » (F. Braudel, *Écrits sur l'histoire* p. 24). Après avoir été longtemps dominée par le souci d'établir des régularités aux grandes échelles, l'histoire connaît depuis quelques années un mouvement inverse, la « microhistoire », qui recentre l'analyse dans un horizon limité. La prise en compte de la variation de l'échelle n'y est pas tant liée aux modalités d'objectivation qu'engagée du côté de l'objet et sa principale vertu est de remettre en question la force d'évidence que les tableaux agrégés avaient acquise. Ces discussions méthodologiques amènent les historiens à étudier les facteurs d'échelle : il s'agit de comprendre l'inscription des structures fines, leur modification par approfondissement ou par amplification de l'horizon. La mesure d'effets d'échelle ouvre donc des perspectives neuves aux disciplines

historiques : qualifier la trajectoire d'un objet non seulement lors de sa circulation d'un lieu à tel instant vers un autre lieu en un autre temps mais aussi en fonction de l'échelle. L'historien disposera d'une nouvelle classe d'objets « qu'on appellera "objets d'échelle" et dont la caractéristique est [de comporter] plusieurs niveaux du même phénomène, comme emboîtés les uns dans les autres, cet emboîtement même, et ses limites, lui procurant sa cohérence » (E. Brian, « Épreuves de constructions fractales », in *Revue de Synthèse*, n° 1 « Objets d'échelles », 2001).

Dans l'histoire de la philosophie, l'évocation de la disparité des ordres de grandeur se confond souvent avec le thème de la disproportion entre l'homme et l'univers (ou ce dont l'univers serait la métaphore). La critique de l'anthropocentrisme constitue la composante commune à l'exaltation du vertige métaphysique et à la construction rigoureuse d'un perspectivisme « scalaire ». Mais la dimension épistémologique renvoie plus précisément à l'effort de la conscience scientifique, rencontré de manière récurrente dans l'histoire des sciences et des techniques, pour se défaire des préjugés nés de l'habitude d'opérer toujours à la même échelle : « De nos jours, les ruptures d'échelle n'ont fait que s'accroître. Mais le problème philosophique s'est toujours révélé le même : obliger l'homme à faire abstraction des grandeurs communes, de ses grandeurs propres ; l'obliger aussi à penser les grandeurs dans leur relativité à la méthode de mesure ; bref à rendre clairement discursif ce qui s'offre dans la plus immédiate des intuitions » (G. Bachelard, *La formation de l'esprit scientifique*, p. 212).

► ALUNNI C. & BRIAN E. (dir.), *Revue de Synthèse*, n° 1 « Objets d'échelles ». Paris, Albin Michel, 2001. — BACHELARD G., « Le monde comme caprice et miniature », in *Études*, Paris, Vrin, 1973 ; *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 1973 ; *La philosophie du non*, Paris, PUF, 1975 ; *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1999. — BOUDON P. (dir.), *De l'architecture à l'épistémologie. La question de l'échelle*, Paris, PUF, 1991. — BRAUDEL F., *Écrits sur l'histoire*, (I), Paris, Flammarion, 1969. — NOTTALE L., *La relativité dans tous ses états*, Paris, Hachette, 1998. — REVEL J. (dir.), *Jeux d'échelles. La micro-analyse à l'expérience*, Paris, Gallimard-Seuil, 1996.

Vincent BONTEMES

→ Bachelard ; Mesure ; Mesure en mécanique quantique ; Référentiel ; Relativité ; Renormalisation.

FAIT

Le terme « fait » appartient au langage de tous les jours. Pour le sens commun, il s'agit d'un mot ordinaire, d'emploi fréquent et dont l'usage n'est aucunement problématique. Un fait, au sens courant, c'est tout ce qui s'est réellement produit, tout ce qui est arrivé, tout ce qui a eu lieu. Lorsqu'un locuteur dit d'une situation ou d'un événement que « c'est un fait », il marque rhétoriquement sa conviction, ou il insiste pour mieux

convaincre l'interlocuteur, que les choses sont bien telles que décrites par lui. Mais, dans le langage de la philosophie contemporaine, la notion de fait a un sens technique précis qui, sans s'écarter complètement du sens ordinaire, a partie liée avec des questions cruciales. Un fait, du point de vue épistémologique, est ce qui peut être constaté, ce qui peut être avéré, ce qui peut faire l'objet d'une entente intersubjective au terme d'une vérification, d'une mesure ou d'un contrôle expérimental. Un fait est, en ce sens, ce sur quoi l'on peut se mettre d'accord et faire consensus. À la limite, un fait est ce à quoi correspond un énoncé vrai. Certes, la phrase « C'est un fait que *p* » (*p* étant ici une variable propositionnelle à laquelle on substituera, pour obtenir une véritable assertion, n'importe quel énoncé constatatif ou déclaratif, par exemple « La neige est blanche » ou encore « Montréal est situé à la même latitude que Bordeaux ») a le même sens que la phrase « La proposition "*p*" est vraie » (ou « Il est vrai que *p* »). Le contenu propositionnel de ces deux phrases typiques se réduit de toute manière, si on les affirme, à *p*. C'est pourquoi il faut considérer que la notion philosophique de fait est clairement liée à la notion sémantique de vérité, et elle joue un rôle crucial dans la théorie de la vérité correspondance. Ultimement, un « fait », dans cette perspective, c'est ce qui est établi et reconnu par la science, peu importe la discipline dont on parle : c'est ce qui est constatable ou observable, et donc ce qui, en principe du moins, peut être causalement expliqué. Cependant, selon l'école épistémologique à laquelle on appartient, on n'admet un fait que si l'énoncé qui lui correspond a été vérifié, confirmé, ou corroboré hors de tout doute raisonnable. Popper soutient pour sa part qu'aucun énoncé d'observation n'est vérifiable ou confirmable, de sorte que, selon lui, on peut fort bien admettre les faits auxquels présument correspond certains énoncés d'observation tout en les considérant, jusqu'à réfutation éventuelle, comme des faits supposés.

Une métaphysique des faits

La science empirique contemporaine cultive manifestement une métaphysique des faits, et la philosophie contemporaine a largement contribué à asseoir cette métaphysique. Dans son *Tractatus Logico-Philosophicus*, Wittgenstein pose que le monde est constitué de la « totalité des faits » plutôt que de l'ensemble des choses. Dans cette métaphysique qu'il répudiera plus tard, Wittgenstein donne un fondement aussi bien à l'atomisme logique de Russell qu'au physicalisme des néopositivistes, que Tarski voudra rendre plus rigoureux en élaborant une conception sémantique de la vérité. En effet, dans cette perspective du premier Wittgenstein, que les philosophes du Cercle de Vienne ont rapidement fait leur, c'est le monde tel qu'il est (et les états dans lesquels il se trouve éventuellement) qui vérifie ou infirme les assertions que l'on fait à son sujet, c'est-à-dire qui les rend vraies ou fausses. Selon la conception des atomistes logiques, une

proposition atomique est vraie si elle correspond à un fait atomique, c'est-à-dire à un état élémentaire de la réalité, ou, comme le dit encore Russell, à un fait minimal à propos d'un contenu momentané de l'expérience sensible. Ainsi, une proposition atomique réfère directement aux entités de base dont les relations et qualités produisent les états de nature ou de réalité dans le monde non linguistique. Chez Russell, mais non chez Wittgenstein, pour comprendre une proposition atomique, il faut être en mesure d'appréhender d'une manière directe et infaillible les individus ou entités de base auxquels la proposition fait référence : c'est ce que Russell appelle « knowledge by acquaintance » (connaissance par fréquentation). Pour les atomistes logiques, il existe un isomorphisme parfait entre la proposition atomique et le fait atomique : le sujet correspond à l'individu, le prédicat à la qualité, et le verbe à la relation. Mais, selon Popper, il est caractéristique des discussions scientifiques qu'aucun prédicat, par exemple, n'y est traité comme (absolument) atomique. Cela dit, les « faits du monde », que l'on est susceptible de découvrir et de vouloir expliquer, sont extrêmement nombreux et divers. C'est un fait « scientifiquement établi » que la Terre n'est pas au centre de l'univers, que la lumière voyage à une vitesse de 300 000 km/s., qu'un être humain normalement constitué possède 23 paires de chromosomes, etc. Découvrir les faits, de quelque ordre qu'ils soient, et en rendre compte, rendre possible éventuellement, sur la base de cette connaissance des faits, qu'on prévoit comment les choses se produiront, voire, si possible, empêcher que certains événements jugés néfastes ou indésirables ne se produisent (par ex., la propagation du sida, l'éruption d'un volcan, la stagnation), telle serait la tâche fondamentale de la science. La diversité et la multiplicité des faits étant progressivement découvertes, les disciplines scientifiques seront donc elles-mêmes de plus en plus nombreuses et diversifiées, comme en atteste l'histoire des sciences, qui est une histoire de la division du travail de l'esprit humain appliqué à la connaissance du réel. Mais, malgré ce mouvement irréversible vers la spécialisation, les sciences participent, apparemment du moins, à un même projet unifié, ce dont a voulu rendre compte l'*Encyclopédie de la science unifiée* dirigée par C. Morris, R. Carnap et O. Neurath. Même si l'idée que la science soit épistémologiquement unifiable est aujourd'hui fortement remise en question, le questionnement méthodologique des sciences demeure encore une des tâches centrales que s'assigne la philosophie. Comment les faits sont établis et décrits, comment ils sont découverts et représentés ou théoriquement modélisés, comment, éventuellement, ils peuvent être contrôlés expérimentalement pour être mieux observés et compris plus en profondeur, comment ils peuvent être expliqués pour pouvoir être, le cas échéant, anticipés et prévus, voilà sans doute certaines des préoccupations métascientifiques les plus centrales aussi bien des philosophes que des scientifiques, que Bachelard, incidemment, appelle les « travailleurs de la preuve ».

Mais s'il est vrai que la notion de fait est absolument centrale pour l'épistémologie d'aujourd'hui, il n'en est pas moins vrai que la métaphysique des faits ne va plus de soi pour la communauté des philosophes des sciences. La fin des années 1950 marque, dit-on, la fin de la domination du néopositivisme car de nouvelles préoccupations se font jour. Comme l'on fait valoir tout à tour des auteurs comme Hanson, Kuhn et Feyerabend, contrairement à ce que les positivistes logiques ont semblé croire, il n'y a pas de faits bruts à proprement parler. Car ce qui a valeur de fait en science est déterminé par la conception du monde (*Weltanschauung*) associée à la théorie qui tente d'en rendre compte. En tant que tel, il n'existe pas de faits neutres, indépendants de toute théorisation et permettant, par exemple, d'évaluer l'adéquation relative de deux hypothèses rivales ou de deux théories en compétition ; l'adéquation empirique d'une théorie doit plutôt être évaluée en fonction de normes établies dans le cadre de la conception du monde qui la supporte. Ces normes sont elles-mêmes issues de l'histoire des sciences et, en ce sens, elles pourront varier selon les époques et selon les contextes disciplinaires. Ce qui revient à dire qu'un fait admis par un théoricien dans un champ de recherches donné peut fort bien ne représenter qu'une supposition pour un autre, voire une supposition incorrecte, et ce, sans qu'il soit possible de trancher entre ces conceptions contradictoires. Il convient alors de se demander si les faits auxquels s'intéressent les scientifiques sont ce que l'on appelle couramment les « données » de l'expérience. Il serait naïf de croire qu'au départ d'une enquête scientifique, il y ait quelque chose comme « les faits » qu'il s'agirait tout simplement de saisir et d'enregistrer, comme s'ils étaient donnés d'emblée. Les faits dont parle le scientifique, ceux sur lesquels il prend appui dans ses avancées théoriques, sont ce qu'il est convenu d'appeler des « faits stylisés » : ils sont, en ce sens, en grande partie construits plutôt que donnés. Le scientifique n'y accède qu'après avoir élaboré une perspective de recherche, qu'après avoir circonscrit une problématique, bref, qu'après avoir formulé un premier ensemble de questions orientant sa démarche. Au début de la science, il y a l'intérêt épistémologique du chercheur : comme y insiste Popper, c'est le questionnement qui est le moteur de toute activité cognitive, et tout particulièrement en science, puisque la Nature ne se livre qu'à ceux qui, dans une quête sans fin possible, osent l'interroger. Cela dit, il faut reconnaître avec Kuhn que les scientifiques sont formés dans le cadre d'un paradigme qui domine leur discipline à une époque donnée et que, pour cette raison, ceux-ci ne voient le monde que du point de vue que leur formation leur a permis d'acquérir et que leur implication en recherche leur permet d'affiner de plus en plus. Pour cette raison, Goodman a sans doute raison de considérer que les faits bruts n'existent pas et qu'il n'y a que des versions. Il y a, certes, une dimension irréductiblement construite dans tout fait allégué. Chose certaine, les scientifiques sont professionnellement formés, à

l'intérieur de ce que Kuhn a appelé aussi des « matrices disciplinaires », pour voir le monde d'une certaine manière plutôt que d'une autre. C'est pourquoi l'on peut prétendre avec Goodman que la science « fabrique » les faits qui la concernent : elle adopte un point de vue conventionnel dans sa façon de dire les choses, ce qu'avait bien vu Poincaré. En ce sens, dire que la Terre est en mouvement par rapport au Soleil ou dire que le Soleil se meut relativement au point fixe que constitue la Terre constituent deux façons de parler compatibles sinon équivalentes. C'est en quelque sorte affaire de point de vue que de choisir de considérer que la Lune est en orbite autour de la Terre, ou que la Terre est en mouvement relativement à la Lune, voire que ces deux corps célestes sont immobiles l'un par rapport à l'autre. Certes, un point de vue donné comporte des limites inhérentes, et l'enjeu principal en adoptant une perspective descriptive sera de parvenir idéalement à tenir ensemble tous les faits sans exception, tous les « phénomènes », c'est-à-dire, comme le dit Pierre Duhem, de parvenir à « sauver les apparences ». Il faut alors reconnaître que la science ne saurait atteindre une explication absolument vraie de la réalité et qu'elle doit se contenter de construire des modèles explicatifs qui rendent compte de tous les faits d'observation (c'est ce que Bas van Fraassen appelle le « réalisme constructif »). Mais cela ne signifie pas pour autant que tout fait n'est qu'une construction imaginaire de l'entendement. Si l'empirisme, doctrine suivant laquelle toute connaissance du monde extérieur aussi bien qu'intérieur n'est qu'une inférence (voire une induction théoriquement généralisante) à partir des données brutes de la sensation, pense faire l'économie de cette construction, il fait fausse route. Mais pour autant que le concept de « donnée » n'est pas aussi fruste que celui des empiristes classiques (Locke, Hume), et pour autant que par « donnée de la sensation » nous entendons une catégorisation du divers perçu, alors l'empirisme ne fait plus problème. Mais, du coup, il perd non seulement sa virginité mais peut-être aussi son pouvoir de séduction. Car, dans la mesure où l'empirisme se voulait une doctrine épistémologique permettant de fonder le justificationnisme et le vérificationnisme à l'aide du concept de « croyance vraie justifiée », il a fait long feu : la connaissance scientifique ne saurait être certaine, elle ne saurait être prouvée comme le sont les théorèmes de la pensée purement logico-mathématique, elle ne saurait être conjecturale et, à terme, elle ne peut être que plus ou moins bien confirmée ou corroborée, et donc toujours susceptible d'être remise en cause. Toute la question, systématiquement discutée en particulier par Popper, devient alors la suivante : peut-on rendre compte du progrès épistémologique fait par les sciences en s'abstenant de toute logique inductive, c'est-à-dire en refusant toute légitimité à l'entreprise philosophique qui, à l'aide de la théorie de la probabilité, tente de définir rigoureusement le concept de « support d'une explication théorique par les faits observés » ? La méthodologie des années 1970 et 1980 a été particulièrement

marquée par ce débat qui n'est toujours pas clos. Plusieurs estiment, par exemple Adolf Grünbaum, que le réfutationnisme a perdu la bataille, ce qui ne veut pas dire pour autant que nous disposions d'une analyse logique tout à fait satisfaisante et non controversée de la notion de « support inductif », comme tendrait à le faire voir le théorème de Popper-Miller et la controverse qui s'en est suivie.

Débats actuels

Quoi qu'il en soit de cette question méthodologique qui relève à proprement parler de la logique mathématique et de la théorie des probabilités, d'autres questions philosophiques relatives à la notion de fait sont encore aujourd'hui à l'ordre du jour. Parmi celles-ci, nous en singulariserons trois. D'abord celle qui concerne ce que Popper a nommé le « mythe du cadre », une question qui, à plusieurs égards, rejoint les réflexions de Davidson sur la légitimité de l'idée de « schème conceptuel ». En épistémologie, par « cadre conceptuel » il faut entendre les croyances métaphysiques, les engagements ontologiques, l'arrière-plan de connaissance (y inclus certaines généralisations symboliques et leur interprétation à l'aide d'un langage spécifique), les modèles, ainsi que les critères d'évaluation des résultats, que partagent les personnes œuvrant dans une certaine discipline et plus précisément dans un secteur nettement circonscrit de la recherche disciplinaire ou interdisciplinaire. Toute la question est alors de savoir si les scientifiques sont prisonniers de leur « cage dorée » ou s'ils peuvent en sortir. En particulier, dans la mesure où le langage structure la pensée conceptuelle et permet la mise en forme du raisonnement, toute la question est de savoir si, d'un « cadre théorique » à l'autre, des passages peuvent être aménagés ou si l'on doit plutôt soutenir que la traduction des idées est impossible d'une perspective théorique à une autre. Y a-t-il, comme le prétend ouvertement Kuhn, incommensurabilité entre le monde d'Aristote et celui de Galilée ? Autre question kuhnienne, la communication est-elle possible entre Priestley, partisan du phlogistique, et son contemporain Lavoisier, qui explique tout autrement le phénomène de la combustion ? Cette question des contraintes épistémiques et des déterminants sociaux qui s'exercent sur les pratiques scientifiques, aujourd'hui très fortement professionnalisées, rejoint les préoccupations que la nouvelle sociologie des sciences, armée au *strong programme* des théoriciens de l'École d'Édimbourg (D. Bloom, B. Barnes et S. Shapin) et est devenue aujourd'hui centrale et très âprement discutée.

Une question afférente a également été très largement débattue et est encore de nos jours placée au centre des préoccupations épistémologiques. Cette question concerne en propre le rapport des théories aux faits d'expérience et a donné lieu à la formulation de deux thèses qui ne font pas encore consensus de nos jours. La première de ces thèses pose que l'expérience ne détermine jamais complètement la connaissance

empirique que nous articulons sous la forme de théories scientifiques (thèse de la sous-détermination des théories par les faits) ; la seconde pose que toute observation est nécessairement marquée au coin des croyances d'arrière-plan et des suppositions qu'un scientifique accepte lorsqu'il explore la réalité et tente d'expliquer les phénomènes qui l'intéressent (thèse de la surdétermination de l'observation par la théorie). Déjà Whewell (1847) soutenait qu'il existe une interaction cyclique et mutuelle entre l'expérimentation (« fact » gathering) et la théorie (« fact » interpreting). Il faut voir en particulier selon lui que le fait d'accepter une certaine théorie rend certains faits accessibles qui, autrement, ne seraient tout simplement pas observés. Mais ces « faits » sont par ailleurs soumis à des expérimentations et à des mises à l'épreuve (tests) supplémentaires qui, à leur tour et le cas échéant, renforcent l'adhésion aux théories en question. Cette interaction fonde le holisme épistémologique, particulièrement systématisé par Quine, lui-même, du reste, en s'appuyant fortement sur les arguments de Duhem - d'où l'expression de thèse de Duhem-Quine. Suivant Quine, non seulement une hypothèse isolée ne saurait être mise à l'épreuve de manière concluante en science (c'est la partie proprement classique entre proposition synthétique et proposition analytique est sans fondement rigoureux ; ainsi tout énoncé, même s'il s'agit d'une loi de la logique, doit être tenu pour éminemment révisable, en principe du moins. Selon Quine, l'ensemble de la science, mathématique, naturelle, sociale et humaine, est sous-déterminé par l'expérience. Les contours du système doivent, certes, cadrer avec l'expérience ; le reste, avec tout son assortiment de mythes et de fictions, sert seulement à atteindre à la simplicité des lois. C'est pourquoi aucun fait ne saurait nous contraindre à penser d'une manière plutôt que d'une autre puisque tout est affaire d'ajustement interne du système global de la connaissance scientifique, le but étant de faire en sorte que notre conception scientifique du monde soit maximumment cohérente.

Prétendre qu'il y a une essentielle sous-détermination des théories par les faits, c'est affirmer que les théories des sciences de la nature sont radicalement sous-déterminées par les données observables. S'il en est ainsi, c'est essentiellement parce que les concepts théoriques ne sont pas étroitement amarrés aux données ; ils ne sont que partiellement interprétés du point de vue empirique. Dès lors, dans le choix d'une théorie peuvent intervenir des considérations d'un tout autre ordre, par exemple, d'élégance ou de simplicité mathématique. Il résulte de cette sous-détermination que deux théories qui diffèrent, voire se contredisent, peuvent néanmoins s'accorder avec le même ensemble de données observables, et même de données possibles. En un mot, elles peuvent être logiquement incompatibles mais empiriquement équivalentes, de sorte que, même contradictoires, elles se trouvent toutes deux confirmées ou réfutées par le même

ensemble d'observations, effectives ou possibles. Comme le remarque Quine, la thèse de la sous-détermination des théories scientifiques n'évoque pas une simple limitation contingente de notre esprit situé dans un certain espace-temps : plus audacieuse en fait que le holisme épistémologique, pour qui une pluralité de théories peuvent rendre compte des observations réelles, la thèse de la sous-détermination affirme que, même si nous disposons de toutes les observations possibles, nous ne serions pas encore assurés qu'il n'existe qu'une seule théorie capable de les systématiser. Par ailleurs, l'idée de la charge théorique de l'observation (*theory ladenness of observation*), familière aux lecteurs de Duhem, a été réarticulée au tournant des années 1960 pour battre en brèche le dogme positiviste de l'existence d'une langue d'observation neutre. Par la suite, des auteurs comme Feyerabend ont exagéré dans l'autre sens en soutenant non pas simplement que les faits sont surdéterminés par les théories, mais qu'ils sont en quelque sorte créés par elles. Suivant cette thèse anti-empiriste, il n'y a pas de faits purs et durs, c'est-à-dire de faits bruts indépendants des théories : les « faits » ne peuvent être appréhendés qu'à travers le filtre de la théorie qui en commande l'observation. Si, pour les positivistes logiques comme pour leurs prédécesseurs, il existe effectivement une langue d'observation neutre, dont les termes, dépourvus d'ambiguïté, ont la même signification pour tout le monde, Hanson provoque la remise en question de ce postulat à travers un exemple devenu célèbre. Lorsque le géocentriste Tycho Brahé et l'héliocentriste Kepler contemplant le Soleil, leur rétine a beau être bombardée par des photons semblables, ils ne voient pas la même chose ; Tycho voit un objet brillant qui tourne autour de la Terre, Kepler voit un objet brillant fixe, autour duquel tourne la Terre. Les nombreuses illustrations que l'on doit à la psychologie de la Forme (*Gestalt*) sont particulièrement révélatrices à cet égard : on peut alternativement voir dans un même dessin une tête d'oiseau à long bec et une tête d'antilope, ou encore, dans un autre dessin, une vieille dame et une jeune femme. Hanson en conclut que le vocabulaire observationnel, censé destiné à dénoter des faits bruts, est toujours empreint de théorie. D'ailleurs, se demandait-il, à quoi ressemble un fait ? Si l'on peut photographier des objets (voire des situations ou des événements) ou en faire collection, de quoi la photographie ou la collection de faits serait-elle faite ? Pour Hanson, poser la question, c'est y répondre : les faits ne sont pas des entités représentables, observables, manipulables. On peut certes considérer que Hanson traite le verbe voir comme un verbe d'attitude propositionnelle. Tous les termes référentiels employés dans des phrases où ils suivent une occurrence de « voir » (« voir X », « voir que Y est plus haut que Z ») deviennent référentiellement opaques : plutôt que leur référent ordinaire, s'il en est, ils ont pour référence oblique la croyance que leur associe le sujet du verbe voir dans la phrase. Scheffler est prompt à faire remarquer que les arguments censés établir le changement de

référence ou d'ontologie du vocabulaire descriptif à partir d'un changement de croyance ou de théorie commettent l'erreur triviale d'inférer une absence de corréférence ou de coextensivité entre des termes à partir d'une absence de synonymie : que Tycho Brahé et Kepler n'aient pas les mêmes croyances au sujet du Soleil ou qu'ils n'en donnent pas la même définition n'implique pas qu'ils ne parlent pas du même objet et qu'il n'est pas possible de déduire de leurs théories respectives des énoncés vrais ou faux au sujet de cet objet.

Enfin, un troisième débat crucial est toujours en cours aujourd'hui : il concerne la distinction classiquement faite entre faits et valeurs. Dans la mesure où les jugements de fait sont susceptibles d'être dits « vrais » ou « faux » selon que ce qui est affirmé correspond ou non à ce qui est observé dans le monde, il est devenu de rigueur de distinguer radicalement les jugements de fait des jugements de valeur. Par opposition aux jugements de fait, les jugements de valeur sont des énoncés normatifs qui stipulent une règle de conduite (par ex., « Il faut toujours respecter la parole donnée ») ou encore des énoncés évaluatifs qui blâment ou louangent quelqu'un ou son action par référence à une certaine norme (par ex., « Richard Nixon était indigne d'être le président des États-Unis »). On doit à Hume d'avoir mis en lumière que, logiquement, on ne saurait dériver valablement un énoncé normatif d'un ou plusieurs énoncés factuels : ce qui doit ou devrait être n'est jamais impliqué logiquement seulement par ce qui est. Autrement dit, tout raisonnement dont la conclusion est une proposition normative doit inévitablement comporter au moins une prémisses normative. En ce sens, on conviendra que les sciences empiriques, qu'il s'agisse, du reste, des sciences naturelles ou des sciences sociales, sont – ou, à tout le moins, devraient être – exclusivement intéressées à établir des faits, contrairement à la philosophie, et à la philosophie des sciences en particulier, qui vise plutôt à établir des principes. On s'attendra donc à ne trouver en science aucun jugement normatif ou évaluatif si ce n'est, bien sûr, ceux qui ont une portée proprement méthodologique et qui sont, tout compte fait, d'un autre ordre puisqu'ils sont de niveau métascientifique (par ex., la norme épistémologique selon laquelle « Une théorie doit prendre tous les faits disponibles en considération », ou encore la thèse soutenue par Popper suivant laquelle « La théorie darwinienne de l'évolution des espèces par sélection naturelle est à proprement parler irréfutable »). On s'attendra également à n'y trouver aucun énoncé prescriptif inconditionnel, les prescriptions en science (par ex., en médecine) étant analysables comme des propositions technologiques de type « si... alors » (« Si vous souffrez d'un sérieux mal de tête, prenez de l'aspirine mais respectez la posologie »). Cela dit, la doctrine de Hume ne nous empêche pas de considérer que les jugements de valeur peuvent faire l'objet d'une analyse empirique, par exemple dans le cadre de la psychologie génétique. Dans cette perspective et comme le veut H. Putnam, le seul critère à utiliser pour considérer que nous avons

affaire à un fait, c'est que ce dont il s'agit soit rationnellement acceptable. C'est convenir alors qu'il existe des « faits normatifs ». Ainsi, s'il est rationnel d'accepter qu'un tableau soit beau, alors c'est un fait que, pour nous du moins, le tableau est beau. Toutefois, l'acceptabilité rationnelle et la vérité sont deux notions distinctes, quoique reliées. Un énoncé peut être rationnellement acceptable à un moment donné sans être vrai pour autant, et il convient certainement de préserver cette intuition. Mais alors, pour revenir à notre exemple, la seule conclusion légitime à tirer d'une éventuelle observation psychosociologique de cette sorte, c'est que c'est un fait que ce tableau est (probablement) considéré comme beau par tous ceux qui acceptent d'affirmer que ce tableau est beau – mais non pas que ledit tableau est beau en lui-même. Ce n'est certes pas une propriété du tableau qu'il soit beau ; c'est une caractéristique de ce tableau, par contre, que d'aucuns puissent le dire beau. Lui attribuer la beauté doit rester un geste évaluatif et non un geste descriptif : cette intuition fondamentale doit, elle aussi, être sauvegardée. Il existe donc des faits évaluatifs ou normatifs, mais, ainsi que l'a fait valoir G.E. Moore en matière d'éthique, l'on ne saurait considérer que des prédicats comme « beau » ou « bon » soient naturalisables, c'est-à-dire explicitement et exclusivement définissables en termes de propriétés empiriques des objets du monde ou des comportements humains. Ce débat autour de la naturalisation possible de l'éthique et de l'épistémologie, deux disciplines essentiellement normatives, est, des trois dont nous avons parlé relativement au statut du concept de « fait », certainement le plus actuel et peut-être aussi pour nous le plus fondamental.

► BLOOR D., *Knowledge and Social Imagery*, Londres, Univ. of Chicago Press, 1976, 2^e éd. augm. d'une post-face, 1991 (trad. fr. D. Ebnöther, *Sociologie de la logique. Les limites de l'épistémologie*, Paris, Pandore, s.d.). – DAVIDSON D., *Inquiries into Truth and Interpretation*, Oxford, Clarendon Press, 1984 (trad. fr. P. Engel, *Enquêtes sur la vérité et l'interprétation*, Nîmes, Jacqueline Chambon, 1993 ; « Essai 3. Vrai en vertu des faits (1969) », p. 69-92). – DUHEM P.M., *La théorie physique : son objet, sa structure*, repr. fac-similé de la 2^e éd. rev. et augm., avec avant-propos, index et bibliogr. P. Brouzeng, Paris, Vrin, 1981. – FEYERABEND P.K., *Against Method*, Londres, New Left Books, 1975 (trad. fr. B. Jurdat & A. Schlumberger, *Contre la méthode. Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Paris, Le Seuil, 1979). – GOODMAN N., *Ways of World-making*, Indianapolis/Cambridge, Hackett Publ. Co., 1978 (trad. fr. M.D. Popelard, *Manières de faire des mondes*, Nîmes, Jacqueline Chambon, 1992 ; chap. I : « Mots, œuvres et mondes », p. 9-35 ; chap. V : « La fabrication des faits », p. 121-142). – GRÜNBAUM A., « Is the Method of Bold Conjectures and Attempted Refutations Justifiably the Method of Science ? », *The British Journal for the Philosophy of Science*, 27, 1976, p. 105-136. – HANSON N.R., *Patterns of Discovery*, Cambridge (Mass.), Cambridge Univ. Press, 1958. – HUME D., *A Treatise of Human Nature*, Book 3, Part 1, section 1, éd. et index analytique L.A. Selby-Bigge, 2^e éd., texte rev. P.H. Niddich, Oxford, Clarendon Press, 1978 (trad. fr. P. Baranger & P. Saltel, *Traité de la nature humaine*, Paris, GF-Flammarion, 1995). – KUHN T.S., *The Structure of Scientific*

Revolutions, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962/1970 (trad. fr. L. Meyer, *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion « Champs », 1983). – NEURATH O., CARNAP R. & MORRIS C. éd., *International Encyclopedia of Unified Science*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 2 vol., 1938-1969. – POPPER K.R., *Logic of Scientific Discovery*, Londres, Hutchinson, 1959 (1^{re} éd. orig. all. *Logik der Forschung*, Vienne, Julius Springer Verlag, 1934-1935 ; trad. fr. N. Thyssen-Rutten & P. Devaux, préf. J. Monod, *La Logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1973) ; *The myth of the framework, in defence of science and rationality*, éd. M.A. Notturmo, Londres, Routledge, 1994. – POPPER K.R. & MILLER D., « Une démonstration de l'impossibilité de la probabilité inductive », Appendice (1983), *Le réalisme et la science. Postscriptum à la Logique de la découverte scientifique*, vol. I, éd. établie et annotée W.W. Bartley III (trad. fr. A. Boyer & D. Andler, Paris, Hermann, 1990, p. 413-416 ; extrait de *Nature*, n° 5910, 21 avril 1983, p. 687-688). – PUTNAM H., *Reason, Truth and History*, Cambridge (Mass.), Cambridge Univ. Press, 1981 (trad. fr. A. Gerschenfeld, *Raison, Vérité et Histoire*, Paris, Minuit, 1984). – QUINE W.V.O., *From a Logical Point of View : 9 Logico-Philosophical Essays*, 3^e éd. rev., Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1971 (1^{re} éd., 1953). – SCHEFFLER I., *The Anatomy of Inquiry. Philosophical Studies in the Theory of Science*, New York, Alfred A. Knopf, 1963 (trad. fr. partielle P. Thuillier, *Anatomie de la science. Études philosophiques de l'explication et de la confirmation*, Paris, Le Seuil « Science ouverte », 1966) ; *Science and Subjectivity*, Indianapolis, Bobbs Merrill, 1967. – VAN FRAASSEN B.C., *The Scientific Image*, New York, Oxford Univ. Press, 1980. – WHEWELL W., *The Philosophy of the Inductive Sciences* (1847), Londres, Parker, 1945. – WITTGENSTEIN L., *Tractatus Logico-Philosophicus*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1922 (éd. crit. B. McGuinness & J. Schulte, Francfort, Suhrkamp, 1989 ; trad. fr. G.G. Granger, avec préambule et notes, *Tractatus Logico-Philosophicus*, Paris, Gallimard « Bibliothèque de philosophie », 1993).

Robert NADEAU

→ Cercle de Vienne ; Découverte ; Donné ; Épistémologie ; Évidence ; Expérience ; Méthode ; Nécessité ; Objectivité ; Popper ; Quine ; Réalisme ; Validation ; Van Fraassen ; Whewell ; Wittgenstein et le positivisme logique.

FEIGL Herbert, 1902-1988

Philosophe d'origine autrichienne. Il était en 1929 Dozent à l'Université populaire de Vienne. Il a publié un premier livre, au moment du Manifeste, *Theorie und Erfahrung in der Physik (Théorie et expérience en physique)* où il aborde les théories physiques et le problème de leur validation. En rejetant le kantisme pour ces jugements synthétiques a priori, il valorise la preuve expérimentale des théories. Aussi prépare-t-il un autre ouvrage, en 1929, *Zufall und Gesetz (Hasard et loi)* poursuivant sa réflexion sur l'extension de ses considérations sur la probabilité appliquée au réel. H. Feigl est membre du Cercle de Vienne dont il introduira les auteurs aux États-Unis. Lecteur de philosophie dans l'Iowa en 1931, professeur au Minnesota en 1940, il y crée en 1953 le Center for Philosophy of Science et commence à éditer avec May Brodbeck *Readings in the Philosophy of Science*. En 1949 il rédige, avec Wilfrid Sellars, *Readings in Philosophical Analysis*, qui

deviendra un texte standard sur l'empirisme logique. En 1958, H. Feigl rédige un article intitulé « The "mental" and the "physical" » qui présente son monisme neuroscientifique.

● « The "mental" and the "physical" », *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. II *Conceptions, theories and the Mind Body Problem*, Univ. of Minnesota Press, 1958. – *Inquiries and Provocations : Selected Writings 1929-1974*, éd. R.S. Cohen, Vienna Circle Collection, vol. XIV, Dordrecht/Boston, Reidel, 1980.

Bernard ANRIEU

→ Cercle de Vienne ; Physicalisme ; Wittgenstein et le positivisme logique.

FEYERABEND Paul K., 1924-1994

Philosophe autrichien et éclectique, d'une grande culture scientifique précisément dans les domaines de la physique contemporaine, Feyerabend fut aussi chanteur professionnel (ténor) et assistant de Brecht au théâtre. Élève du philosophe K. Popper, il a fréquenté tous les philosophes de quelque importance de ce siècle : Carnap, et les élèves de Popper tout particulièrement, Agassi, mais aussi Lakatos avec lequel il a gardé des contacts constants jusqu'à la mort de ce dernier.

Dans son principal ouvrage *Contre la méthode*, son objectif avoué est de « laisser parler les sciences pour elles-mêmes et ne pas résumer leur message dans une théorie ou un système méthodologique ». Contre la philosophie des sciences dominantes, il s'attaque à des entités comme la raison, l'objectivité, suivant en cela son inspiration wittgensteinienne première. Mettant l'accent sur le rôle des luttes politiques dans le développement des sciences, il a semblé réduire l'activité scientifique à des prises de pouvoir successives.

Parfois taxé de relativisme, quoique l'auteur s'en défende, il s'oppose aux « reconstructions » ou aux « interprétations » : « Beaucoup des conflits et des contradictions qui apparaissent dans les sciences sont causés par cette hétérogénéité du matériel... Ils ont beaucoup à voir avec les problèmes qui surgissent quand on a besoin d'une centrale électrique à côté d'une cathédrale gothique... » (*Contre la méthode*).

Quoi qu'il en soit, Feyerabend a mis l'accent sur l'importance des éléments esthétiques ou dramatiques intrinsèques aux théories scientifiques. Il a réussi à défaire nombre de constructions théoriques ou du moins à les faire voir en deçà des effets internes qu'elles produisent. Il a montré que les prétendues observations ou perceptions ne sont jamais neutres mais que les conditions de la perception peuvent aller jusqu'à construire l'objet perçu et ce dans la construction scientifique. *Adieu la Raison, Dialogues sur la connaissance* (Paris, Le Seuil, 1996) reprennent ces thèmes en durcissant les thèses sur l'insertion du langage scientifique dans les formes de vie.

© *Against method* (1975), trad. fr., *Contre la méthode*, Paris, Le Seuil, 1979. – *Science in a free society*, Londres, 1978. – *Philosophical Papers*, Cambridge Univ. Press, 1981. – *Farewell to reason* (1988), trad. fr., *Adieu la raison*, Paris, Le Seuil, 1989. – *Three dialogues on knowledge*, Oxford, Univ. Press, 1991. – *Criticism and the growth of knowledge*, éd. I. Lakatos & A. Musgrave, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1970.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Continuité ; Expérience ; Expérience cruciale ; Validation.

FEYNMAN Richard, 1918-1988

Richard Feynman, physicien américain (États-Unis), a profondément modifié non pas tant la physique de son époque elle-même que la manière d'en « faire », c'est-à-dire à la fois la manière de considérer ses rapports aux mathématiques et la façon de l'enseigner. Il y a un « avant Feynman » et un « après Feynman ».

Dès sa thèse, achevée en 1942, Feynman renouvelle la formulation de la théorie quantique en remplaçant les fonctions d'onde par des intégrales « de chemin » (encore appelées intégrales de Feynman). L'idée fondamentale est que l'amplitude de probabilité d'un certain événement doit être considérée (et obtenue) comme la superposition de toutes les amplitudes de probabilité relatives à toutes les manières possibles de réaliser un tel événement ; la probabilité d'un événement apparaît alors comme le module au carré d'une intégrale portant sur tous les « chemins » possibles. Il introduit dès cette époque des diagrammes, initialement présentés comme des sortes d'aide-mémoire lors de la réalisation d'un calcul, mais qui deviendront vite indispensables et feront pleinement partie du formalisme de la théorie quantique. Après avoir travaillé deux ans à Los Alamos à la conception et fabrication de la bombe A (nucléaire), Feynman généralise sa méthode des diagrammes et produit une théorie électrodynamique quantique satisfaisant aux exigences de la théorie quantique et de la relativité einsteinienne. La méthode utilisée sera ensuite amplement reproduite et servira de base au traitement d'autres interactions élémentaires.

Simultanément Feynman publie ses *Lectures on Physics*, transcription faussement naïve des cours qu'il donne à l'Institut Caltech. Il introduit un nouveau style d'apprentissage de la physique caractérisé par l'abandon des calculs que l'on développe sur plusieurs lignes et dont on entoure le résultat, et l'accent mis au contraire sur la manière dont « ça marche », telle qu'on la lit sur la forme des résultats littéraires. Cette conception de l'enseignement, qui fait une large place à l'explication « avec les mains » et où c'est le geste opéré par le physicien qui compte, n'est que la traduction en termes pédagogiques de sa propre méthode de recherche.

© *The Character of Physical Law* (1965), trad. fr., *La nature de la physique*, Paris, Le Seuil, 1980. – *Light and matter*,

Princeton Univ. Press, 1983 (trad. fr., *Lumière et matière : une étrange histoire*, Paris, Le Seuil 1987). – FEYNMAN R.P., LEIGHTON R.B. & SANDS M., *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley (USA), 1963 (trad. fr., Paris, Inter-Éditions, 1979).

► LAVERNE A., « Feynman », *Encyclopædia Universalis*, vol. 9.

Françoise BALIBAR

→ Corpuscule ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Probabilité [PHYSIQUE] ; Quantique ; Renormalisation.

FIN THERMIQUE DE L'UNIVERS

Dissipation de l'énergie, augmentation de l'entropie

Le problème de la dissipation de l'énergie et de la mort thermique de l'univers se pose pour la première fois dans les pages que William Thomson consacre à la conciliation de la théorie des machines à vapeur de Sadi Carnot avec les observations de James Joule sur la transformation de la chaleur en travail. Dans un mémoire de 1850 *Sur la théorie dynamique de la chaleur* qui représente l'acte de naissance de la thermodynamique moderne, Thomson écrit que la chaleur se transforme effectivement en mouvement comme l'avait observé Joule (premier principe), mais que cette transformation ne peut se produire que lorsque la chaleur passe d'un corps chaud à un corps froid et seulement partiellement comme le soutenait Carnot (second principe). Or, si la transformation de chaleur en travail est seulement partielle, qu'en est-il de l'énergie potentielle qui ne s'est pas transformée en mouvement ?

Hermann Helmholtz, dans son célèbre ouvrage *Sur la conservation de la force* (1847) – que Thomson lit seulement en janvier 1852 – avait divisé la totalité de l'énergie de l'univers en énergie potentielle et en énergie cinétique, affirmant la convertibilité réciproque totale entre les deux. En avril 1852, dans son article « Sur une tendance universelle de la nature à la dissipation de l'énergie mécanique », Thomson précise qu'il existe un sous-ensemble de l'énergie cinétique, la chaleur, qui, une fois générée, n'est pas complètement reconvertible en énergie potentielle ou en une autre forme d'énergie cinétique. Donc, étant donné que la reversion (partielle) de la chaleur en travail n'est possible qu'en présence d'un écart de température, alors que la chaleur tend à passer des corps les plus chauds aux plus froids en se diffusant à température uniforme dans l'espace, cela signifie que l'univers tend à un état final de complète cessation des transformations énergétiques, du mouvement et de la vie. Dès lors, il faut supposer l'existence, dans le passé, d'un état initial de concentration maximale de l'énergie potentielle. Un état qui est scientifiquement dépourvu de tout antécédent physique et que William Thomson, en tant que croyant, ne peut s'empêcher d'assimiler à la création divine (voir l'article de 1854 sur « Les

antécédents mécaniques du mouvement, de la chaleur et de la lumière »).

Dans trois mémoires publiés en 1854, 1862 et 1865, Clausius approfondissait l'élaboration conceptuelle des principes de la thermodynamique, en introduisant le concept de transformation et reformulait, à travers lui, les deux principes. Le premier principe – équivalence de la chaleur et du travail – énonce la possibilité de la transformation de la chaleur en travail ; le principe de Carnot, au contraire, rebaptisé principe d'équivalence des transformations, instaure une relation entre deux types de transformations : la transformation de chaleur en travail et le passage de la chaleur d'un corps chaud à un corps froid (passage qui peut être considéré comme la transformation d'une quantité de chaleur à température élevée en chaleur à température plus basse).

En 1862, Clausius explique que dans un cycle de transformations fermé, parfaitement réversible, les deux sortes de transformations – de la chaleur en travail et du travail en chaleur – seront équivalentes, c'est-à-dire telles qu'elles se compenseront mutuellement, leurs valeurs différant seulement en signe et leur somme algébrique étant égale à zéro. Dans des cycles non réversibles, à savoir pour la plupart des phénomènes naturels, se produira au contraire un déséquilibre, parce que la transformation du travail en chaleur prévaudra sur la transformation inverse. Clausius attribue, par convention, un signe positif aux transformations du premier type et un signe négatif à ceux du second, concluant que la somme algébrique de toutes les transformations qui surviennent dans un cycle irréversible devra être nécessairement positive. La somme algébrique des transformations qui se produisent en cycle fermé (réversible ou irréversible) est appelée par Clausius valeur de transformation. Dans un cycle réversible la valeur de transformation sera égale à zéro. Dans un cycle irréversible la valeur de transformation est toujours positive.

Dans son mémoire de 1865, cherchant à mieux définir l'action de la chaleur sur les corps (qui tend à amollir ou à liquéfier les solides, qui vaporise les liquides, dilate les aériques, en général tend à affaiblir et à dissoudre complètement les liens intermoléculaires ou à éloigner les molécules l'une de l'autre), Clausius introduit une autre grandeur qu'il nomme désagrégation. Sous le terme d'entropie sont réunies ces deux grandeurs : la valeur de transformation et le degré de désagrégation. L'entropie correspond au « contenu de transformation d'un corps », c'est-à-dire à sa capacité de subir des transformations spontanées. Plus grande est la valeur de l'entropie plus faible est la capacité du corps à se transformer et plus fort est son degré de désagrégation. Dans la dernière partie de ce texte, Clausius pose l'hypothèse que l'univers tout entier est un système fermé et tire les conséquences qui dérivent de l'extrapolation cosmique du concept d'entropie, selon la fameuse formule : « L'énergie du monde est constante ; l'entropie du monde tend à une valeur maximale. »

État final ou cercle éternel ?

Alors que les quelques pages dans lesquelles William Thomson, en 1852, prophétisait la mort thermique de l'univers n'avaient pas suscité de réactions à l'extérieur du cercle restreint de ses collègues, à partir de la fin des années 1860 commence une deuxième phase du débat sur la fin thermique de l'univers, au cours de laquelle les concepts de cette nouvelle discipline sont vulgarisés et provoquent un débat entre philosophes et hommes de science.

La date de commencement de cette nouvelle phase peut être située en 1867, lorsqu'au 41^e congrès des savants et des médecins allemands Clausius prononce une conférence « Sur le second principe de la théorie mécanique de la chaleur », où il nie vigoureusement la possibilité de considérer l'univers comme un cycle éternel s'autorégénérant, au sein duquel force et matière seraient en transformation perpétuelle. Cela constituait un désaveu scientifique implicite de la cosmologie matérialiste de Jacob Moleschott, Karl Vogt, Ludwig Büchner qui, ayant appliqué à l'univers le premier principe de la thermodynamique, soutenaient que : « Plus la science naturelle avance dans ses recherches, plus elle apprend à connaître que rien ne se crée et rien ne disparaît, mais que tout reste dans un cercle éternel qui se subvient à lui-même, dans lequel tout commencement est une fin et toute fin un nouveau commencement » (Büchner, *Science et nature*, Paris, 1868, p. 79).

Mais désormais, écrit Clausius en 1867, « le deuxième principe de la théorie mécanique de la chaleur contredit sans aucun doute cette opinion ». En réalité, le monde, suivant la loi de l'augmentation de l'entropie « doit graduellement évoluer dans un sens déterminé » qui correspond à l'équilibre thermique et à la plus grande désagrégation moléculaire possible.

Quelques années plus tard, en Angleterre, deux importants physiciens anglais – Balfour Stewart et Peter Tait – firent du principe de la dissipation de l'énergie un instrument apologetique dans la lutte contre le matérialisme et l'athéisme scientifique. Le livre de Stewart et Tait, *L'univers invisible, spéculation physique sur un état futur* (Londres, 1875 ; trad. fr., Paris, 1883) est la première d'une longue série de tentatives de récupération théologique, ou plus généralement spiritualiste, du second principe de la thermodynamique. Dans ce cas également, ce sont les « doctrines sophistiques du matérialisme » et, plus généralement, tous ceux qui ont affirmé que la science est incompatible avec la religion qui sont visés. Étant donné que l'univers visible, d'après ce qu'on peut déduire du principe de dissipation de l'énergie, a eu une origine et est destiné à avoir une fin dans le temps, nos auteurs, au nom du principe de continuité dans l'explication des phénomènes naturels, postulent l'existence d'un univers invisible, c'est-à-dire d'un ordre de choses qui a précédé l'univers visible et qui viendra après lui.

La réponse des partisans de l'éternité de cet univers

ne se fit pas attendre. Les philosophes, bien conscients de la portée spéculative des deux principes de la thermodynamique, tentèrent d'y répondre avec trois arguments principaux.

Tout d'abord en démontrant l'impossibilité de l'état final de l'univers à partir de l'idée d'infinité temporelle régressive. S'il existait un état final, il aurait dû se réaliser pendant le temps infini écoulé jusqu'à maintenant et le mouvement aurait dû s'interrompre à jamais ; or, cela est faux car le monde est encore en mouvement. Si les conséquences sont fausses, l'hypothèse doit l'être aussi : l'état final de l'univers n'a pas été atteint dans le passé infini et ne pourra pas l'être dans le futur. Cet argument, qui était déjà celui d'Arthur Schopenhauer lorsqu'il voulait nier la possibilité d'une philosophie de l'histoire (*Le monde comme volonté et représentation*, § 53), a été utilisé dans la seconde moitié du siècle contre la mort thermique de l'univers par des savants et des philosophes comme Adolf Fick, Friedrich Mohr, Hans Vaihinger, Wilhelm Wundt, Otto Liebmann, Otto Caspari. Friedrich Nietzsche utilise cet argument (« Si un équilibre de forces eût été atteint à un moment quelconque, il durerait encore : donc il n'est jamais intervenu ») en conjonction avec l'hypothèse du nombre fini des combinaisons de la force, pour formuler son idée de l'éternel retour du même, selon laquelle « tout devenir se meut dans la répétition d'un nombre déterminé d'états absolument identiques » (fragment posthume 11[245] de l'épître 1881).

La deuxième objection – qui se trouve, par exemple, chez Gustav Reuschle et Wilhelm Wundt – part du concept d'infinité temporelle future. La validité de la théorie de Clausius n'est pas révoquée, l'énergie se dégrade sans cesse, la valeur de l'entropie tend vers un maximum, le monde se rapproche de l'état final mais ne l'atteint jamais, car, dans un temps infini, le rapprochement ne peut qu'être asymptotique. Une objection ultérieure, très répandue et souvent liée à la précédente, s'appuie sur l'infinité de l'espace : le deuxième principe de la thermodynamique ne vaut que pour des systèmes fermés, et ne peut être appliqué à des systèmes qui sont en interaction avec d'autres, et, encore moins, à un complexe infini.

Le temps cyclique de Ludwig Boltzmann

La solution scientifique définitive au problème de la mort thermique de l'univers se trouve dans la théorie statistique de la thermodynamique de Boltzmann, même si souvent on n'a pas assez insisté sur ce point. La théorie de Boltzmann se situe au sein de la troisième phase du débat sur la thermodynamique et la cosmologie. Alors que dans les deux premières, c'est le mécanisme de Thomson qui prédit la mort thermique de l'univers, dans la troisième phase – dont les caractéristiques sont bien résumées dans l'article de Poincaré : « Le mécanisme et l'expérience », publié en 1893 dans la *Revue de Métaphysique et de Morale* – se produit un glissement du sens du terme « mécanisme » qui fait que maintenant c'est le courant énergétiste qui

souligne la nécessité de la fin thermique de l'univers, tandis que ceux qui sont restés fidèles au matérialisme mécaniste essayent de garantir l'éternité du monde.

À la fin du XIX^e s. – en accord avec le climat apocalyptique de cette période dominé par la « renaissance de l'idéalisme », le « dépassement du matérialisme scientifique » (Wilhelm Ostwald) et la « banqueroute de la science » (Ferdinand Brunetière) –, le paradigme mécaniste qui avait accompagné la naissance de la science moderne était contesté en raison du deuxième principe de la thermodynamique. En effet, d'après le théorème de la quasi-périodicité des mouvements des systèmes mécaniques démontré par Henri Poincaré dans le cadre du problème des trois corps, un système mécanique doit évoluer suivant un mouvement quasi périodique de façon à toujours retourner (à condition d'attendre un temps suffisant) à l'état initial. « Un théorème facile à établir nous apprend qu'un monde limité soumis aux seules lois de la mécanique, repassera toujours par un état très voisin de son état initial. Au contraire, d'après les lois expérimentales admises (si on leur attribue une valeur absolue et qu'on veuille en pousser les conséquences jusqu'au bout), l'univers tend vers un certain état final dont il ne pourra plus sortir. Dans cet état final, qui sera une sorte de mort, tous les corps seront en repos et à la même température » (Poincaré, *art. cit.*, p. 534-537).

Le théorème de Poincaré paraît donc en désaccord avec le deuxième principe de la thermodynamique, qui prévoit un mouvement unidirectionnel des phénomènes naturels jusqu'à l'arrêt total de l'univers tout entier. Wilhelm Ostwald, ainsi que tout le courant énergétiste, soutenait que les principes de la thermodynamique constituaient des lois fondamentalement nouvelles, qui ne pouvaient être réabsorbées au sein de la physique traditionnelle et qui devaient servir de bases pour une science nouvelle qui accepte en tant qu'axiomes la diversité qualitative de l'énergie et sa tendance à la dégradation.

Contre l'énergétisme et afin de ramener les phénomènes entropiques dans le cadre théorique du mécanisme, Ludwig Boltzmann introduit le concept de probabilité en physique, non pas en tant qu'instrument, mais comme principe explicatif. Dans la thermodynamique statistique de Boltzmann, l'augmentation de l'entropie supposée par Clausius est réinterprétée comme augmentation du désordre moléculaire. Cela permet d'expliquer en termes mécanistes, au niveau atomique, tous les phénomènes macroscopiques observés et expliqués par le deuxième principe de la thermodynamique. De la sorte, le deuxième principe perd son statut épistémologique : il n'exprime pas une loi universelle de la nature sur la base de laquelle, comme le voulait Ostwald, aurait dû être reformulée toute la physique, mais il est seulement l'effet d'une tendance, statistique vers le désordre moléculaire. Une tendance statistique admettant des exceptions, il ne faut plus craindre la mort thermique de l'univers, car l'état d'équilibre ne sera jamais complet et laissera ouverte la

possibilité de fluctuations vers des états moins probables, mais toujours possibles.

Les critiques de Boltzmann remarqueraient cependant que cette hypothèse engendrait deux paradoxes : celui de la réversibilité et celui de la répétition. Nous ne nous occuperons que du second, puisqu'il concerne directement le problème de la fin thermique de l'univers. En s'appuyant sur le théorème de Poincaré cité ci-dessus, Ernst Zermelo, objectait à Boltzmann que dans son modèle de l'univers, après un temps très long mais fini, le système reviendrait à l'état initial. En répondant une première fois à Zermelo, Boltzmann évite de s'engager directement dans des questions cosmologiques et se limite à observer que le temps de récurrence dans le cas de systèmes thermodynamiques concrets est extrêmement long. Par exemple un centimètre cube de gaz, en conditions normales de température et pression, nécessite de 10¹⁰ années pour atteindre une configuration moléculaire identique à celle du début ! Mais à la suite d'une réplique de Zermelo, Boltzmann tracera, dans un nouvel article, un tableau cosmologique qu'il reprendra par la suite, en conclusion de ses célèbres *Leçons sur la théorie du gaz* (Leipzig, 1895-1898).

Dans ce tableau, Boltzmann considère l'univers comme un système fermé à entropie constante, à l'intérieur duquel se produisent des fluctuations, se créent des îles à entropie négative. Notre système solaire doit son origine à une de ces fluctuations. L'entropie de notre système solaire, comme l'avait justement remarqué Clausius, s'accroît continuellement au fur et à mesure que ce dernier se rapproche de l'état de chaos et de mort thermique du reste du cosmos. Mais dans d'autres zones de l'univers de nouvelles fluctuations et de nouvelles îles naissent, de sorte que la mort thermique n'est jamais généralisée. Si, de plus, on considère fini le nombre d'éléments dans l'univers, notre île devra renaître, se développer et mourir de façon toujours identique ; il en a été ainsi une infinité de fois pendant l'éternité passée et il en sera de même une infinité de fois pendant toute l'éternité à venir. Le « paradoxe » de la récurrence est donc accepté par Boltzmann comme une conséquence légitime de la conception probabiliste de la thermodynamique, qui substitue à l'image de l'univers créé et orienté vers sa fin thermique un univers qui existe depuis toujours, à l'intérieur duquel se produisent et se reproduisent des fluctuations négentropiques qui donnent naissance au mouvement et à la vie.

► BRUSH S., *The Kind of motion we call heat. A history of kinetic theory of gases in the 19th century*, Amsterdam, NPHC, 1976 ; *The Temperature of History*, New York, Franklin, 1978. – CLAUDIUS R., *Théorie mécanique de la chaleur*, Paris, 1868 ; *Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie*, Braunschweig, 1867. – HIERBERT E., « The Uses and Abuses of Thermodynamics in Religion », *Daedalus*, 1966, n° 95, p. 1046-1080. – LIEBMAN O., *Zur Analysis der Wirklichkeit*, Strasbourg, 1880. – NIETZSCHE F., « Fragments posthumes de l'épître 1881 », in *Œuvres Philosophiques Complètes*, t. V, Paris, Gallimard, 1982. – OSTWALD W., « La Déroute de l'atomisme contemporain », *Revue générale des sciences*, 1895, p. 953 sq. ;

L'énergie, Paris, 1910. – REUSCHLE G., *Philosophie und Naturwissenschaft*, Bonn, 1874. – THOMSON W., *Mathematical and Physical Papers*, Cambridge, 1882-1911. – VAHINGER H., « Der Gegenwärtige Stand des kosmologischen Problems », *Philosophische Monatshefte*, 1875, p. 193-219. – WUNDT W., « Über das Kosmologische Problem », *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Philosophie*, 1877, p. 80-136. – ZERMELO E., « Über einen Satz der Dynamik und die mechanische Wärmetheorie », *Annalen der Physik*, 1896, n° 57, p. 485-494.

Paolo D'ORIO

→ Chaleur ; Crise de la physique moderne ; Énergie ; Entropie ; Probabilité (PHYSIQUE).

FONCTEURS → Catégories et foncteurs

FORCE

PHYSIQUE

Nous construisons une première notion de force en manipulant les choses autour de nous : il faut faire des efforts pour déplacer une table, dépenser plus d'énergie pour porter un sac plus lourd que pour un moins lourd, avoir de la force pour lancer une pierre au loin ; les termes « force », « puissance », « énergie », « effort » sont dans ce contexte à la fois confus et confondus. On ne peut cependant faire l'histoire de la notion de force sans en avoir acquis une détermination claire et distincte ; c'est dans l'œuvre newtonienne qu'une telle détermination apparaît : la force est ce qui agit sur un corps de manière à modifier son état inertiel, elle mesure une variation de mouvement. Quoique l'histoire de la notion de force soit plus généralement celle des fondements de la mécanique classique (le principe d'inertie, la loi de la chute des corps, les règles du choc), seuls quelques moments de cette histoire sont évoqués ici, liés aux noms d'Aristote, de Galilée et de Newton ; ce qui est exclu d'autres noms, par exemple ceux de Kepler, Descartes, Torricelli, Huygens et Leibniz. Quoiqu'une certaine téléologie narrative soit inévitable, il s'agira de ne pas dissimuler les ambiguïtés constitutives de la notion classique de force.

Aristote

La physique aristotélicienne, pour être une théorie au sens propre du terme, n'en reste pas moins proche des intuitions quotidiennes lorsqu'elle associe à tout mouvement un moteur : si en général tout effet a une cause, tout mouvement a en particulier un moteur. La définition du mouvement comme acte conjoint d'un mobile et d'un moteur signifie plus précisément que le mouvement s'arrête avec l'action du moteur : il ne peut persévérer de lui-même. On peut bien distinguer les mouvements naturels et les mouvements violents : les premiers procèdent d'une tendance intérieure, alors que les seconds dépendent d'une puissance extérieure ; dans les deux cas cependant, une force est cause du

mouvement. Aristote ayant ajouté que l'action du moteur sur le mù suppose leur contact, la persistance du mouvement des projectiles constituait un problème ; la théorie scolastique de l'*impetus* tente de résoudre ce problème, mais ne sort pas du paradigme aristotélicien. D'après cette théorie, lorsque le moteur est en contact avec le mobile, il peut lui communiquer un *impetus*, lui imprimer un élan ou une force capable de le mouvoir un certain temps ; cette impulsion s'use progressivement : c'est bien pourquoi les projectiles finissent par s'arrêter. Les scolastiques reconnaissent donc au corps la capacité d'intérioriser une force, mais ils ne rompent pas avec l'idée qu'il n'y a pas de mouvement sans l'exercice actuel d'une force.

Certains commentateurs ont attribué à Aristote une loi quantitative selon laquelle la force motrice d'un corps en mouvement serait proportionnelle à sa vitesse et à la résistance qui s'oppose à ce mouvement ; en particulier, lorsque la résistance est nulle, seule une force constante pourrait mouvoir un corps à vitesse constante. En réalité, les textes aristotéliciens, loin de formuler une loi universelle, se contentent de verbaliser des intuitions immédiates : j'ai besoin de plus de force si je veux mouvoir un corps plus lourd, ou dans un milieu plus dense, ou à une vitesse plus grande. Leur objectif n'est pas de déterminer des invariants mécaniques, mais de montrer que les proportions qui régissent l'ordre naturel excluent des entités disproportionnées ou démesurées comme un corps sans poids, un corps de poids ou de grandeur infinie, une vitesse infinie. Il est cependant vrai que cette loi quantitative a été partie intégrante de la tradition aristotélicienne ; on peut dire en ce sens que la notion de force s'est constituée contre deux propositions : il n'y a pas de mouvement sans force motrice ; la force motrice est proportionnelle à la vitesse et à la résistance.

Galilée

La *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632) et les *Discours sur deux sciences nouvelles* (1638) de Galilée ont contribué sur deux points décisifs à cette constitution. En premier lieu, ils affirmaient que certains mouvements n'avaient pas besoin de cause pour persévérer : c'était briser l'ancienne alliance du mouvement et de la force. Pour Galilée, le mouvement n'est pas un processus qui affecte la nature même des choses, mais une modification de leurs relations ; c'est dire qu'il relève de la même catégorie ontologique que le repos, défini comme la conservation de ces mêmes relations. Bien plus : il existe de fait une classe de mouvements équivalents au repos, puisque les corps animés d'un mouvement uniforme horizontal continuent naturellement de se mouvoir comme les corps au repos demeurent naturellement au repos — on aura ici reconnu notre principe d'inertie, à ceci près que, pour Galilée, le mouvement horizontal est celui qui se fait circulairement à la surface de la terre. L'existence d'un mouvement sans moteur constitue un bouleversement

conceptuel : désormais, ce n'est pas le mouvement qui doit être expliqué, mais le changement de mouvement.

En second lieu, Galilée a montré que la chute libre des graves était un mouvement uniformément accéléré : à chaque instant, la vitesse du corps qui tombe augmente de la même façon et ces augmentations de vitesse s'ajoutent les unes aux autres. Nous sommes tentés de traduire cette proposition en termes post-newtoniens : l'action continue d'une force constante comme la gravité ne produit pas une vitesse constante, mais une accélération uniforme. Une telle traduction serait pourtant en partie anachronique : l'analyse galiléenne de la chute des corps n'est pas un cas particulier de l'idée générale que l'application d'une force produit une variation de mouvement. Pour Galilée en effet, les corps ne tombent pas sous l'action d'une force extérieure, mais en vertu d'une tendance naturelle qu'ils ont tous en tant que graves vers le centre de la terre. Parce que cette tendance est naturellement inhérente aux corps, elle ne peut servir de paradigme pour comprendre les changements violents que des forces imposent aux corps de l'extérieur. À vrai dire, la notion de force qu'on trouve chez Galilée s'inspire de l'étude des machines simples plutôt que de l'analyse de la chute libre : la force est ce qu'on applique à une machine simple, par exemple à un levier, pour élever un poids ; c'est quelque chose de violent qui s'oppose à la tendance naturelle des corps vers le bas.

Newton

Au début des *Principia Mathematica* (1687), Newton distingue deux espèces de force : d'une part la *vis insita*, « pouvoir de résistance par lequel chaque corps persévère, autant qu'il est en lui de le faire, dans son état actuel de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite », d'autre part la *vis impressa*, « action exercée sur un corps, qui a pour effet de changer son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme ». Le sens de ces termes est précisé dans la suite de l'ouvrage, et tout d'abord dans les deux premières lois du mouvement. La première loi, que l'on appelle « principe d'inertie », pose que le mouvement rectiligne uniforme et le repos sont des états au sens fort du terme, qui se conservent d'eux-mêmes ; dès lors la force d'inertie est superflue pour expliquer le mouvement inertiel des corps : elle se manifeste seulement lorsqu'un corps résiste à une action extérieure. La première loi recèle également une détermination en creux de la force imprimée : c'est ce qui n'agit pas sur un corps lorsqu'il est dans l'état neutre que constitue l'état inertiel ; lorsqu'on imprime une force à un corps, on le fait donc dévier par rapport à une situation de référence, un degré-zéro du mouvement. La seconde loi précise que le changement de mouvement est proportionnelle à la force imprimée ; c'est dire qu'à chaque instant et en chaque point de sa trajectoire, le mouvement d'un corps est déterminé par les forces qui lui sont imprimées ; l'analyser, c'est mettre en place des procédures mathématiques capables de montrer

comment il s'engendre continuellement sur des temps et des espaces infiniment petits.

Sans examiner ces procédures, on peut souligner certaines des difficultés que présente la notion newtonienne de force. On remarquera tout d'abord que Newton ne définit pas à proprement parler la force, mais deux espèces de force ; il n'est cependant pas évident que ces deux entités partagent quoi que ce soit qui justifie leur appellation commune, puisque la force inertielle est ce qui résiste à un changement de mouvement, alors que la force imprimée est précisément ce qui engendre un tel changement. Il est en général difficile de dire ce qu'est la force : une capacité à produire du mouvement est par définition virtuelle, invisible et impalpable ; on dit qu'elle s'accumule et se conserve, mais on ne sait pas comment elle existe dans les corps. Faute de pouvoir appréhender la force comme telle, Descartes, et dans une moindre mesure Galilée, en avaient fait un concept de second ordre en l'identifiant aux effets qu'elle produisait. Newton, non content d'évaluer indirectement la force par ses effets (encore une fois, il est par principe impossible de procéder autrement), la place au fondement de sa physique. Bien plus, il privilégie une espèce de force particulièrement incompréhensible, la gravitation universelle : une masse ponctuelle m_1 exerce sur une masse ponctuelle m_2 une force dirigée de m_1 vers m_2 , proportionnelle au produit de m_1 et de m_2 et inversement proportionnelle au carré de leur distance.

La gravitation universelle est une force qui s'exerce à distance et instantanément ; poser une telle force, c'est admettre qu'un corps peut agir sur un autre au sens fort du terme, c'est-à-dire lui insuffler un mouvement qui n'existait pas auparavant ; et cette action saute par-dessus l'espace et le temps au lieu de s'exercer instant après instant et pas à pas. Des auteurs comme Leibniz ou Huygens, tout en reconnaissant la validité mathématique de la déduction newtonienne, jugèrent que de telles propositions ne pouvaient être admises en bonne physique : d'où vient ce mouvement qui auparavant n'existait nulle part ? Un corps ne peut être attiré par un autre sans savoir où ce dernier se trouve, et qui peut savoir ce qui se passe là où il n'est pas sinon un esprit tout-puissant ? La position de Newton lui-même varie selon les textes : dans les *Principia*, il refuse de se prononcer sur le statut ontologique de la gravitation et prétend se limiter à l'analyse mathématique des phénomènes ; dans des manuscrits qu'il n'a pas publiés, il la compare à des phénomènes électriques, magnétiques et surtout chimiques, qui montrent selon lui qu'il existe dans la nature des principes actifs et des forces incompréhensibles. Si donc les incursions de Newton hors de la mécanique lui ont permis de mettre de côté la méfiance que lui inspirait la notion d'attraction, son œuvre a instauré une séparation de fait entre son analyse mathématique et son explication physique — parce que la notion d'attraction est physiquement incompréhensible, la seule chose que peut faire le physicien, c'est la mettre en équation.

La cristallisation de la notion scientifique de force

dans le domaine particulier de la mécanique ne constitue que le premier versant de son histoire ; le second est la manière dont elle a été exportée dans d'autres domaines de la physique. Jusqu'au milieu du XIX^e s., l'objectif des physiciens fut en effet d'adapter l'analyse newtonienne à toute la physique, autrement dit de décrire tout phénomène en termes de forces conçues sur le mode de l'attraction universelle ; l'interaction entre des charges électriques ponctuelles était par exemple comprise comme une force électrique, proportionnelle au produit de ces charges et inversement proportionnelle au carré de la distance les séparant. La notion de champ indique rétrospectivement les limites de ce programme général de recherche.

► ARISTOTE, *Physique*, trad. H. Carteron, Paris, Les Belles Lettres, 1926. — BALIBAR F., *Galilée, Newton, lus par Einstein*, Paris, PUF, 1984. — CLAVELIN M., *La Philosophie naturelle de Galilée*, Paris, A. Colin, 1968. — DE GANDT F., *Force and Geometry in Newton's Principia*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1995. — GALILÉE, *Discours sur deux sciences nouvelles*, trad. M. Clavelin, Paris, A. Colin, 1970 ; *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, trad. M. Fréreau et F. De Gandt, Paris, Le Seuil, 1992. — HERIVEL J.W., *The Background to Newton's Principia*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1965. — McMULLIN E., *Newton on Matter and Activity*, Notre Dame, Notre Dame Univ. Press, 1978. — NEWTON, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, éd. I.B. Cohen & A. Koyré, Cambridge, Harvard Univ. Press, 3^e éd., 1972. — SÉRIS J.-P., *Machine et communication*, Paris, Vrin, 1987. — WESTFALL R.S., *Force in Newton's Physics*, Londres, MacDonald, 1971.

Sophie Roux

→ Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Champ ; Constantes physiques ; Énergie ; Gravitation ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Loi de la nature ; Mouvement ; Virtuel.

FORCE VIVE → Entropie ; Travail

FORMALISATION EN MATHÉMATIQUES →
Axiomatisation et Formalisation

FORMALISME

MATHÉMATIQUES

Le terme « formalisme » désigne, depuis la fin du XIX^e s., la doctrine selon laquelle les mathématiques sont une activité de manipulations de signes vides de sens et les vérités des mathématiques sont donc purement formelles, c'est-à-dire qu'elles reposent sur des conventions ou définitions implicites. On peut se faire une première idée de cette doctrine en raisonnant par analogie avec le jeu d'échecs. Pour le formaliste ce sont les règles qui régissent les mouvements d'une pièce quelconque qui font que celle-ci soit, par exemple, le « roi » plutôt que le « fou ». N'importe quel objet, peu importe sa forme, peut faire office de « roi » si on le déplace en suivant les mêmes règles. Ce

n'est certainement pas parce qu'elle tient lieu d'un vrai roi qu'une pièce est ainsi nommée et qu'elle est appelée à se déplacer selon des règles précises. Par analogie, les termes numériques de l'arithmétique sont définis par les règles qui régissent leur manipulation. Les nombres naturels ne sont donc pas des entités en soi, abstraites, mais sont définies par les règles de l'arithmétique récursive primitive ou de l'arithmétique de Peano.

Le formalisme s'oppose donc aux diverses conceptions comme celle de Gottlob Frege, selon lesquelles les énoncés mathématiques ont un « contenu » sémantique (*Inhalt*). Pour Frege, dont la position peut être qualifiée de platoniste, ce contenu sémantique de la mathématique est une réalité en soi et c'est bel et bien de celui-ci que découlent les règles. Le formalisme s'oppose aussi aux diverses positions constructivistes, qui réclament aussi un contenu sémantique mais qui, à l'opposé du platonisme fregeen, ne conçoivent pas la réalité mathématique comme étant indépendante mais bien plutôt dépendante du mathématicien et de ses constructions mentales, comme c'est le cas pour l'intuitionnisme de Brouwer. Puisque le formalisme nie l'existence de toute autre entité que les signes concrets qui sont l'objet des manipulations du mathématicien, donc l'existence d'entités abstraites, on a fréquemment tendance à le concevoir comme une version moderne du nominalisme (N. Goodman, H. Field).

La doctrine formaliste a son origine dans les progrès des mathématiques au XIX^e s., dont notamment le grand essor que connurent la formalisation et l'axiomatisation des théories mathématiques durant ce siècle. Par extension, le terme « formalisme » désigne parfois, de façon quelque peu équivoque, la notion même de système formel. Aussi parlera-t-on d'un « formalisme mathématique » ou des « limitations des formalismes ». La doctrine formaliste prit vers les années 1920 sa forme la plus élaborée dans le « programme de Hilbert », dont la version originale fut fortement ébranlée, mais non détruite, par divers résultats de limitations tels que les théorèmes d'incomplétude de Gödel. Malgré cela, le formalisme est devenu depuis le point de vue implicite d'un grand nombre de mathématiciens, en particulier sous la forme que lui a donnée Bourbaki.

Axiomatization et formalisation

Le cinquième axiome de la géométrie d'Euclide dit que sur un plan par un point donné on ne peut faire passer qu'une et une seule droite parallèle à une droite donnée. On démontra au XIX^e s. l'impossibilité de déduire cet axiome des parallèles sur la base des autres axiomes de la géométrie euclidienne. Cette preuve laissa le champ libre à l'élaboration de géométries non euclidiennes, celles de Gauss-Bolyai et de Lobatchevski-Riemann, construites à partir d'axiomes contredisant celui d'Euclide (respectivement, que l'on peut faire passer une infinité ou aucune droite parallèle, plutôt qu'une seule). Mais les mathématiciens, habitués à considérer que les axiomes de la géométrie

euclidienne sur la structure de l'espace physique sont vrais, crurent d'abord que les géométries non euclidiennes devaient néanmoins receler quelque contradiction ; et ces géométries ne semblent avoir pu acquérir une certaine forme de légitimité mathématique que lorsqu'on put leur donner un modèle euclidien. Ainsi, par exemple, un plan de Riemann devient la surface d'une sphère euclidienne et les droites deviennent des géodésiques. Celles-ci, une fois prolongées, se rencontrent et il n'y a donc pas de parallèles.

Pour des formalistes tels que Hilbert, le fait que les géométries non euclidiennes eurent ainsi acquis leur légitimité indique que le mathématicien possède une grande liberté dans sa possibilité de créer de nouvelles théories par la modification des systèmes axiomatiques. (Un autre exemple abordé par Hilbert dans *Grundlagen der Geometrie* est celui des géométries non archimédéennes [Veronese] ; celles-ci seront à l'origine de l'analyse non standard de Robinson.) La seule restriction minimale possible à la libre construction des théories mathématiques ne pouvait donc être que la non-contradiction, qui n'était comprise à l'époque que de façon syntaxique, c'est-à-dire l'impossibilité de déduire des axiomes de la théorie deux énoncés contradictoires *p* et non-*p*. Aux yeux d'un Hilbert la non-contradiction devenait le critère d'acceptation d'une théorie mathématique.

Cependant, si la non-contradiction des géométries non euclidiennes était assurée par le fait qu'on pouvait en produire un modèle euclidien, cette « preuve » restait « relative » ou « indirecte » puisque rien n'assurait en retour qu'une contradiction puisse apparaître dans la géométrie euclidienne elle-même. Dans *Grundlagen der Geometrie*, Hilbert réussit à donner un modèle algébrique de celle-ci. Ce résultat implique que, si la théorie algébrique en question est non contradictoire, alors la géométrie euclidienne l'est aussi. Le point de vue adopté dans cet ouvrage était obligatoirement formaliste, puisque la possibilité de donner une interprétation algébrique des axiomes de la géométrie euclidienne est fondée sur la reconnaissance même du fait que les termes primitifs introduits par les axiomes en question sont définis implicitement par ceux-ci et sont donc indépendants des connotations géométriques usuelles de « point », « ligne », « plan », etc.

Pour poursuivre ce programme de preuves de non-contradiction avec toute la rigueur qui se doit, les mathématiciens ont dû développer un outil, la notion de système formel ou « formalisme ». C'est ainsi que se mit en place, au tournant du siècle, la notion de système formel, tel que défini par ce que Curry appellera son « cadre primitif » : la liste des symboles, des termes, des règles de bonne formation des formules, ainsi que les axiomes et la ou les règles d'inférence qui permettent d'obtenir les théorèmes à partir de ceux-ci. Cette « codification » du langage des mathématiques, dont Bourbaki dira qu'elle ne constitue « qu'une face, et la moins intéressante » de la méthode axiomatique, ouvre la porte aux questions métasystémiques : il faut, par exemple, s'assurer de l'adéquation entre le système

formel et la théorie « naïve » considérée. Il faut surtout s'assurer de la non-contradiction du système formel.

Selon le même raisonnement, la preuve hilbertienne de non-contradiction de la géométrie euclidienne ne pouvait être qu'une preuve « relative », puisqu'il se pourrait que la contradiction tant crainte se retrouve au niveau de la théorie algébrique. En poursuivant donc ce raisonnement on doit nécessairement en venir à rechercher une preuve « absolue » ou « directe » de non-contradiction, qui assurerait la solidité de tout l'édifice. Le deuxième de la fameuse liste des problèmes de Hilbert, dans son fameux discours au deuxième Congrès international des mathématiciens à Paris, en 1900, était d'ailleurs celui de la non-contradiction des axiomes de l'arithmétique. La découverte, au tournant du siècle, de paradoxes tels que ceux de Russell-Zermelo ou de Burali-Forti avait rendu d'autant plus pressante l'obtention d'une preuve de non-contradiction que ces paradoxes ne faisaient pas que remettre en doute les premiers systèmes formels tels que celui de Frege. La théorie des ensembles de Cantor, qui n'était pas encore formalisée, était aussi visée. Pour un formaliste, la non-contradiction de tels systèmes aurait assuré la non-contradiction de l'arithmétique élémentaire, voire de la théorie des nombres réels. Hilbert résumait ainsi l'approche axiomatique, dans son discours de 1900 : « Lorsqu'il s'agit de poser les principes fondamentaux d'une science, l'on doit établir un système d'axiomes renfermant une description complète et exacte des relations entre les concepts élémentaires de cette science. Ces axiomes sont en même temps les définitions de ces concepts élémentaires ; aucune affirmation relative à la science dont nous examinons les principes fondamentaux ne sera admise comme exacte, à moins qu'on ne puisse la tirer des axiomes au moyen d'un nombre fini de déductions. »

Hilbert en vint ainsi à concevoir une première version de son programme, vers 1904. La preuve qu'envisageait Hilbert était syntaxique, puisqu'il s'agissait de démontrer l'impossibilité de déduire des axiomes de l'arithmétique deux énoncés contradictoires, et Hilbert y faisait entièrement abstraction du « contenu » des formules de l'arithmétique, pour ne les considérer que comme concaténations de symboles. Henri Poincaré fit de nombreuses objections, dont celle de la circularité : la preuve de non-contradiction proposée par Hilbert devra faire appel au principe d'induction mathématique et donc assumer un des principes mêmes dont elle doit prouver qu'il ne mène pas à la contradiction.

Le programme de Hilbert

La version originale de la doctrine formaliste, que l'on retrouve par exemple chez un H. Heine ou J. Thomae, qui introduisit l'analogie avec le jeu d'échecs, fut sévèrement critiquée par Frege, dans la troisième partie des *Grundgesetze der Arithmetik* (1903). Ces auteurs ont cru voir dans l'aspect tangible des signes concrets, tels que des marques de craies sur le tableau, la garantie de l'existence des nombres. Pour

Frege, ce n'est là que la marque d'une confusion qui devient évidente lorsqu'on considère une suite infinie : en adhérant aux préceptes formalistes on ne peut évidemment pas en produire une (le tableau serait littéralement infiniment long) et même si on met l'accent sur la simple possibilité de produire une telle suite, cette possibilité n'existerait que pour Dieu. De telles confusions étaient, pour Frege, une preuve par l'absurde de la validité de son point de vue, celui d'une arithmétique à contenu ou « interne » (*inhaltliche Arithmetik*).

Hilbert fit place à un « contenu » lorsqu'il rénova son programme, dans les années 1920, pour répondre à l'objection de Poincaré, introduisant par le fait même une variante plus sophistiquée du formalisme. Il distinguait entre les énoncés « réels », qui se voient reconnaître un sens parce qu'ils se rapportent à des objets concrets et à leurs propriétés « visualisables », et énoncés « idéaux », qui sont pour leur part vides de sens. Ceux-ci ne seraient que de simples manières de parler, extrêmement utiles en pratique car ils simplifient grandement les raisonnements, mais ils devraient être en principe éliminables de toutes les preuves d'énoncés réels dans lesquelles ils apparaissent. Répondant ainsi à l'objection de Poincaré, Hilbert reconnut qu'une preuve « directe » de non-contradiction est impossible et proposa alors, à l'intérieur de la métamathématique, une preuve de « cohérence » ou « consistance » de l'ensemble de l'arithmétique (énoncés réels et idéaux confondus) qui ne contiendrait que des énoncés réels. Cette preuve montrerait en outre comment éliminer les énoncés « idéaux » des preuves d'énoncés réels dans lesquels ils apparaissent. C'est ce qu'on appellerait aujourd'hui un résultat de « conservativité », en accord avec l'idéal de la « pureté des méthodes ». Les deux aspects sont reliés, puisque la consistance n'est en fait que la conservation par rapport à l'impossibilité d'une contradiction « réelle », élémentaire, telle que, pour reprendre l'exemple de Hilbert, $0 = 1$.

Le programme de Hilbert avait une ambition « mécaniciste » évidente : les énoncés réels étant décidables, l'élimination de principe de l'usage des énoncés idéaux laissait miroiter le rêve d'une méthode générale de décision qui permettrait pour toute formule de déterminer mécaniquement, en un nombre fini d'étapes, si elle est ou non un théorème. C'est là le « problème de la décision » (*Entscheidungsproblem*), énoncé pour la première fois en 1928 par Hilbert et Ackermann dans *Grundzüge der theoretischen Logik*.

Les raisonnements sur énoncés réels sont par définition décidables et finitaires. C'est ici que le « finitisme » de Hilbert trouve sa source. Ces raisonnements et méthodes « élémentaires », portant sur les propriétés « visualisables » des objets concrets que sont les suites de symboles (les preuves formalisées) seront admis comme étant certains sans plus de justification. Hilbert suivait en cela Kant, qui disait dans la *Critique de la raison pure* que les raisonnements algébriques « sont garantis contre l'erreur par cela seul que chacun

d'eux est mis devant les yeux » (A734/B 762). Hilbert s'autorisa en effet d'une lecture de Kant, qui est le seul philosophe qu'il cite, toujours avec approbation. Cela ressort clairement dans un long mais très instructif passage de son article de 1925, « Sur l'infini » : « Et la logique interne de la déduction [*inhaltliche logische Schliessen*], nous a-t-elle jamais trompés ou laissés dans l'embarras lorsque nous l'appliquions à des objets ou à des événements réels ? Non : la logique interne de la déduction nous est indispensable. Elle ne nous a trompés que lorsque nous avons arbitrairement construit des notions abstraites, et particulièrement de ces notions où rentre une infinité d'éléments ; et nous avons fait de la logique interne de la déduction une application illégitime, nous n'avons pas tenu compte des conditions préalables qui étaient nécessaires pour une telle application. Et en reconnaissant l'existence de pareilles conditions, et la nécessité d'en tenir compte, nous nous trouvons en accord avec les philosophes, en particulier avec Kant. Kant enseignait déjà – et c'est là une partie intégrante de sa doctrine – que la mathématique porte sur un contenu donné indépendamment de toute logique, et ne peut donc en aucune manière être fondée sur la logique pure... Pour qu'on puisse, en effet, appliquer les formes logiques de raisonnement, et effectuer des opérations logiques, une condition préalable est qu'il y ait déjà quelque chose de donné dans la représentation, à savoir de certains objets concrets, extra-logiques, présents à l'intuition et immédiatement perçus antérieurement à toute pensée. Si le raisonnement logique doit donner la certitude, il faut que ces objets se laissent embrasser parfaitement dans toutes leurs parties, et que leurs propriétés, leurs différences mutuelles, leur ordonnance à la suite ou à côté l'un de l'autre, soient immédiatement données à l'intuition, en même temps que les objets eux-mêmes, comme quelque chose d'irréductible et qui n'a d'ailleurs pas besoin de réduction. Voilà le postulat philosophique fondamental, la condition nécessaire, à mon avis, pour les mathématiques aussi bien que pour toute pensée, toute connaissance, tout procédé scientifiques. Et dans les mathématiques, en particulier, les objets de notre étude sont les signes concrets eux-mêmes, dont la figure, conformément à notre condition, est immédiatement perceptible et reconnaissable. »

Les propos de Hilbert rappellent la philosophie pré-critique de Kant. Au deuxième paragraphe de la « considération première » de sa *Recherche sur l'évidence des principes de la théologie naturelle et de la morale*, Kant présentait les mathématiques comme considérant la généralité à partir des signes *in concreto*. Pour lui, en arithmétique et en algèbre « [...] sont d'abord posés, au lieu des choses elles-mêmes, leurs signes, avec les désignations particulières de leur accroissement et de leur diminution, de leurs rapports, etc., et on procède ensuite avec ces signes selon des règles simples et certaines, par permutation, combinaison et soustraction, et par toutes sortes de transformations, de telle sorte que les choses significatives elles-mêmes soient ici laissées complètement en dehors

des pensées, jusqu'à ce qu'enfin, lors de la conclusion, la signification de la déduction symbolique soit déchiffrée ».

Cette influence kantienne dans le renouvellement du formalisme est à mettre au compte d'un philosophe néokantien peu connu, Leonard Nelson, dont Hilbert aida grandement la carrière (contre Husserl) et dont les idées influencèrent aussi Wilhelm Ackermann et Paul Bernays, qui furent étudiants et collaborateurs de Hilbert. Il faut donc se garder de rapprocher trop rapidement, comme l'avait fait Jean Cavaillès, la métamathématique formaliste de Hilbert de la phénoménologie de Husserl, bien que ce dernier ait modelé sa théorie des multiplicités définies sur l'axiomatique hilbertienne.

Les résultats de limitation et les suites du programme de Hilbert

Le programme de Hilbert, auquel il faut rattacher les travaux de Jacques Herbrand, n'a eu qu'un succès mitigé. En 1931, Gödel publie son mémoire « Sur les propositions formellement indécidables des *Principia Mathematica* et des systèmes apparentés I » dans lequel il présente ses deux célèbres théorèmes. Le premier énonce l'existence de ce que Hilbert appellerait un énoncé « réel » qui est à la fois vrai et non prouvable (et non réfutable) dans l'arithmétique de Peano. Puisque ce système est censé contenir toutes les méthodes élémentaires de preuves (et même plus) il existerait donc des vérités arithmétiques élémentaires sans preuves élémentaires, ce qui rend impossible l'obtention du résultat de conservativité mentionné ci-dessus. Le deuxième résultat de Gödel montre que l'énoncé de la consistance de l'arithmétique de Peano est lui-même un énoncé vrai mais non prouvable au sens du premier théorème. Ce deuxième résultat indique donc qu'une preuve finitiste de consistance est impossible à obtenir. En 1976, deux logiciens anglais, J.B. Paris et L. Harrington ont montré qu'un théorème de combinatoire (une version finitaire du théorème de Ramsey) est non prouvable dans l'arithmétique de Peano. Il s'agissait du premier exemple mathématique d'incomplétude.

Le « problème de la décision » a aussi reçu une réponse négative en 1936 avec un théorème d'indécidabilité de A. Church (A.M. Turing obtint un résultat similaire l'année suivante). Ces résultats de limitation furent cependant pas interprétés comme signifiant la mise à mort du programme de Hilbert. Seul l'aspect réductionniste aurait été rendu caduque. Pour Paul Bernays, par exemple, ces résultats indiquent seulement « qu'il faut un moyen plus puissant que les méthodes élémentaires combinatoires pour prouver la non-contradiction de la théorie axiomatique des nombres ». C'est dans cette optique d'élargissement du point de vue finitiste que des preuves de consistance de l'arithmétique récursive primitive furent obtenues, par Ackermann et Gerhard Gentzen. Il faut dire que ces résultats sont dénués de valeur épistémologique

puisque'ils ne possèdent plus la certitude associée à la preuve finitiste.

Dans la lignée des travaux issus du programme de Hilbert il faut mentionner les travaux en théorie de la preuve, à la suite des travaux de Gentzen, de l'école allemande de K. Schütte, qui n'ont pas donné de résultats d'intérêt majeur hors de la logique et qui ne contournent pas plus les résultats de Gödel. Dans une autre optique, qui n'est plus d'élargir le point de vue finitiste mais plutôt d'étudier l'étendue, certes plus restreinte, des mathématiques que l'on peut fonder du point de vue finitiste, s'inscrivent la « reverse mathematics » de H. Friedman et S. Simpson, qui proposent une réalisation partielle du programme de Hilbert, et les travaux de S. Feferman, qui a montré, entre autres, que toutes les mathématiques appliquées peuvent être capturées dans des extensions conservatrices de l'arithmétique récursive primitive.

Il faut aussi mentionner Georg Kreisel, qui à très tôt voulu modifier le programme de Hilbert en appliquant la théorie des preuves à l'analyse de démonstrations de la théorie des nombres ; il fit en outre ressortir à titre d'exemple le contenu effectif du théorème de Littlewood concernant les changements de signe de la fonction $\pi(x) - li(x)$. Dans un autre ordre d'idées, il faut dire que l'introduction du système de déduction naturelle par Gentzen est à l'origine d'une révolution conceptuelle d'une grande profondeur, dont la logique linéaire de Jean-Yves Girard semble prendre la pleine mesure, en se débarrassant entre autres des aspects réductionnistes et axiomatiques de théorie de la preuve hilbertienne.

La doctrine formaliste aujourd'hui

L'échec du programme de Hilbert sous sa forme originale ne signifia pas non plus la mort du formalisme en tant que doctrine. Certes, après les années 1930, rares furent les logiciens qui, tels que Abraham Robinson ou Haskell Curry, ont continué à se définir comme formalistes. Selon Curry, les mathématiques sont la science des systèmes formels tels que définis par leur « cadre primitif ». Les mathématiques ne seraient donc pas autre chose que l'étude des systèmes formels. Afin d'éviter les objections que l'on pourrait tirer des résultats de limitation, il se contentait de rejeter la preuve de consistance recherchée en vain par Hilbert comme condition nécessaire et suffisante pour l'acceptation d'un système formel.

Une version simplifiée de la doctrine formaliste fut popularisée par le groupe de mathématiciens français Bourbaki. Ceux-ci ne confondent pas la mathématique avec l'étude des systèmes formels. Cette nouvelle figure du formalisme, qui se rapproche en fait beaucoup de celle des prédécesseurs de Hilbert, peut se résumer en deux points. Premièrement, les bourbakistes reconnaissent que le langage commun des mathématiques modernes est celui de la théorie des ensembles (celle de Zermelo-Fraenkel) et adoptent une attitude qu'ils qualifient d'« antidogmatique » sur la

nature des objets mathématiques : libre à chacun de penser ce qu'il veut, du moment que l'on peut traduire les théorèmes dans ce langage commun. En d'autres mots, les bourbakistes suspendent leur jugement sur ce qu'ils considèrent n'être qu'une question métaphysique inutile pour le mathématicien. Deuxièmement, les bourbakistes adoptent par rapport au problème de la non-contradiction une attitude pragmatique selon laquelle la non-contradiction de la théorie des ensembles – le langage commun – est « vraisemblable » et qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter puisque, advenant qu'une contradiction fasse un jour surface, on pourra toujours apporter les modifications nécessaires pour la contourner. Les travaux de logique dans la lignée de ceux de Hilbert visant à des preuves de consistance sont donc dénués d'intérêt pour un bourbakiste. Cette doctrine se rapproche du positivisme le plus élémentaire puisqu'elle ne peut guère se reconnaître autrement que comme résidu spéculatif inévitable que l'on tend à faire rapprocher de zéro. Les bourbakistes ne peuvent donc pas justifier leur formalisme par des arguments philosophiques et se contentent de faire ultimement appel à l'opinion de la majorité silencieuse des mathématiciens. Cependant cet appel n'est à vrai dire qu'un sophisme. Quoi qu'il en soit, la position de Bourbaki ne fait pas l'unanimité, ne serait-ce qu'en France où, par exemple, les mathématiciens de l'école de Strasbourg, réunis autour de Georges Reeb, ont développé en réaction au formalisme une fructueuse approche intuitionniste de l'analyse non standard.

► BERNAYS P., « Sur le platonisme dans les mathématiques », *L'enseignement mathématique*, 1935, vol. 34, p. 52-69.
 – BOURBAKI N., « L'architecture des mathématiques », in LE LIONNAIS F. dir., *Les Grands courants de la pensée mathématique*, Paris, A. Blanchard, 1948. – CAVAILLÈS J., *Méthode axiomatique et formalisme. Essai sur le problème du fondement des mathématiques*, Paris, Hermann, 1981. – CURRY H., *Outlines of a Formalist Philosophy of Mathematics*, Amsterdam, North-Holland, 1951. – DIEUDONNÉ J., « La philosophie des mathématiques de Bourbaki », *Choix d'œuvres mathématiques*, t. 1, Paris, Hermann, 1981, p. 27-39. – DUBUCS J., « La logique depuis Russell », in BLANCHÉ R. & DUBUCS J., *La logique et son histoire*, Paris, A. Colin, 1996, p. 355-394. – FEFERMAN S., « Infinity in Mathematics : Is Cantor Necessary ? », in TORALDO DI FRANCA G. dir., *L'infinito nella scienza*, Rome, Enciclopedia Italiana, 1988, p. 151-211 ; « What Rests on What ? The Proof-Theoretic Analysis of Mathematics », in CZERMAK J. dir., *Philosophy of Mathematics. Proceedings of the 15th International Wittgenstein-Symposium*, vol. 1, Vienne, Hölder-Pichler-Tempsky, 1993, p. 147-171. – FIELD H., *Science without Numbers. A Defense of Nominalism*, Oxford, Basil Blackwell, 1980. – FREGE G., *Grundgesetze der Arithmetik*, Hildesheim, Georg Olms, 1966. – GENTZEN G., *Recherches sur la déduction logique*, trad. R. Feys & J. Ladrière, Paris, PUF, 1955 ; *Collected Papers*, Amsterdam, North-Holland, 1969. – HARTHONG J. & REEB G., « Intuitionnisme 84 », in BARREAU H. & HARTHONG J. dir., *La mathématique non standard*, Paris, Éd. du CNRS, 1989, p. 213-252. – HERBRAND J., *Écrits logiques*, Paris, PUF, 1968. – HILBERT D., *Grundlagen der Geometrie*, Zweite Auflage, Leipzig, Teubner, 1903 ; « Sur l'infini », trad. Weil, in *Acta Mathematica*, vol. 48, 1925, p. 91-122, 1926 ; *Gesammelte Abhandlungen*, vol. III, Berlin,

Springer, 1935. — HILBERT D. & ACKERMANN W., *Grundzüge der theoretischen Logik*, Berlin, Springer, 1928. — KREISEL G., « On the Interpretation of Non-Finitist Proofs », *Journal of Symbolic Logic*, vol. 16, 1951-1952, p. 241-267, et vol. 17, p. 43-58 ; « A Variant to Hilbert's Theory of the Foundations of Arithmetic », *British Journal for the Philosophy of Science*, 1954, vol. 4, 107-129. — LADRIÈRE J., *Les limitations internes des formalismes*, Louvain/Paris, Nauwelaerts/Gauthier-Villars, 1957. — LARGEAULT J. dir., *Intuitionnisme et théorie de la démonstration*, Paris, Vrin, 1992. — NAGEL E., NEWMAN J.R., GÖDEL K. & GIRARD J.-Y., *Le théorème de Gödel*, Paris, Le Seuil, 1989. — NELSON L., *Beiträge zur Philosophie der Logik und Mathematik*, Francfort, Öffentliches Leben, 1958. — PARIS J.B. & HARRINGTON L., « A Mathematical Incompleteness in Peano Arithmetic », in BARWISE J. dir., *Handbook of Mathematical Logic*, Amsterdam, North-Holland, 1978, p. 1133-1142. — ROBINSON A., « Formalism 64 », *Selected Papers*, Amsterdam, North-Holland, 1979, vol. 2, p. 505-523. — SIMPSON S.G., « Partial Realizations of Hilbert's Program », *Journal of Symbolic Logic*, 1988, vol. 53, p. 349-363.

Mathieu MARION

→ Abduction ; Analyse complexe ; Axiomatisation et formalisation ; Bourbaki ; Dédution ; Ensemble ; Frege ; Géométries ; Local et global ; Modèle ; Structure ; Transformation géométrique.

FORME

Devant ce qui est donné et qui demande une explication, Platon a eu recours aux « formes » ou idées qui sont l'élément rationnel présent dans les faits ou les choses tels qu'ils sont simplement donnés. Ces formes sont des universaux, des propriétés, des fonctions que nous pouvons prédiquer des choses, objets, arguments. Qu'elles soient innées, comme dans la philosophie platonicienne, ou « acquises originellement » comme intuitions de l'espace et du temps, conditions d'une acquisition « dérivative » de la représentation des choses « dans la forme de la spatialité » (Kant, *Réponse à Eberhard*, trad. fr., Paris, Vrin, 1973, p. 72-73), comme dans la philosophie kantienne, les formes ne sont pas dans ces deux cas le résultat d'expériences ou d'exercices. Pourtant, vue sous l'angle dynamique d'une opération, la forme est plutôt marquée d'une activité, elle semble « inséparable de la perception spatiale et par conséquent se donne d'abord comme concept empirique » (G.-G. Granger, *Formes opérations objets*, p. 381). La psychologie de la *Gestalt* (forme externe des choses) a élargi ce concept puisque la notion de forme a été rapportée à des perceptions non spatialisées, et est devenue l'opposée du fond. Cette opposition indique que la condition nécessaire pour l'apparition d'une forme est une situation de frontière.

La psychologie de la forme

Les gestaltistes mettent l'accent sur l'appréhension globale de la forme et veulent mettre en difficulté les théories analytiques du type de celle de Helmholtz qui sont fondées sur la décomposition de la perception en sensations. Helmholtz avait en effet dénoncé l'illusion

d'une perception immédiate des formes ; celles-ci sont constituées à partir de nos sensations : « Nous utilisons les sensations que la lumière suscite dans l'appareil de nos nerfs optiques pour nous constituer à partir d'elles des représentations sur l'existence, la forme et la position des objets externes. Nous appelons les représentations de cette sorte des perceptions visuelles » (*L'optique physiologique*, p. 427).

Le caractère immédiatement unifié de ce qui est perçu semble un défi lancé à une telle méthode atomiste ; c'est ce même caractère qui justifie l'usage du concept de forme : lorsqu'un objet se déplace dans mon champ de vision, sa grandeur et sa forme apparentes demeurent constantes. La forme identifiée comme invariable rend donc compte d'une constance perceptuelle. Ainsi le problème de l'émergence de formes stables à partir d'impressions sans cesse modifiées ne se trouve pas même posé vu que sa pertinence n'est pas reconnue. Ce qui est forme perçue est une image détachable et actualisée sur un fond où subsistent les potentialités de formes non identifiées. Les gestaltistes parviennent ainsi à construire une opposition image-fond : « Tant que la méditerranée "a une forme", l'aire qui correspond à l'Italie est sans forme et inversement. Il n'y a pas du tout de forme qui soit donnée sur la rétine comme une réalité fonctionnelle, ni celle de l'Italie, ni celle de la méditerranée » (Köhler, *Gestalt Psychology*, p. 151). On peut ainsi dire que d'elle-même, la perception ne détermine pas ce qui est à considérer comme forme, que donc la forme correspond bien plus à un mode d'expression qu'à une réalité de perception. Pourtant, elle est considérée par Köhler comme une unité primitive de perception, unité qui ne suppose ni évaluation ni interprétation des sensations mais qui repose sur une organisation adaptée du système nerveux. Un principe d'économie visant la simplicité et l'homogénéité des formes perçues régirait les excitations sensorielles.

Pour beaucoup, les explications gestaltistes sont simplistes et la question de la forme réelle des objets est plus que jamais difficile à résoudre. Austin doute qu'on puisse dire en quoi elle consiste : « Quelle est la forme réelle d'un chat ? Celle-ci change-t-elle à chacun de ses mouvements ? Si vous niez cela, dans quelle posture direz-vous qu'il manifeste sa forme réelle ? Par ailleurs, peut-on esquisser sa forme d'un trait continu et harmonieux ou doit-on la serrer dans le détail de manière à tenir compte de chaque poil ? De toute évidence ces questions sont sans réponse. » (*Sense and Sensibilia*, p. 71). Et Wittgenstein reproche aux gestaltistes de n'avoir pas reconnu que la forme dont ils parlaient est structurée comme une signification. Il est faux de penser selon lui que la perception des formes soit préalable à la signification : « La question de savoir s'il s'agit d'un voir ou d'un interpréter apparaît par le fait qu'une interprétation devient l'expression de l'expérience. Et l'interprétation n'est pas une expérience indirecte, mais son expression première » (*Letzte Schriften über die Philosophie der Psychologie*, vol. I, § 20).

Avec les analyses de Wittgenstein, une analogie se trouve fondée entre les images picturales et les propositions du langage : images et propositions délivrent une forme du monde. La logique, science de la forme, mesure jusqu'où peut être porté l'isomorphisme entre la structure de la syntaxe et celle du monde.

Matière et forme d'une proposition

La logique est dite formelle car elle se présente souvent comme une analyse des formes de pensée dans une proposition ou formule, abstraction faite des objets sur lesquels cette pensée s'applique. Le recours à des lettres schématiques qui tiennent lieu de représentants d'idées ou de concepts permet de mettre l'accent sur les structures symboliques et fixes du raisonnement, qui sont alors dites des structures formelles : « Quand je parle des représentations, propositions ou arguments qui seraient contenus dans telle ou telle forme, j'entends par "forme" une certaine combinaison de mots ou de signes en général qui peuvent être mis pour une certaine sorte de représentation, de proposition ou d'argument. Ainsi quand la lettre A est mise pour une représentation-sujet, et la lettre B pour une représentation-attribut, la proposition "A a B" est la forme générale de toute proposition, vu que toutes les propositions peuvent être représentées par cette combinaison de signes » (Bolzano, « Die Wissenschaftslehre », I, § 81, note 1, 1837, in *Grundlegung der Logik*, p. 159).

L'usage des variables dans une proposition signe le caractère formel d'une logique, mais comme le souligne à juste titre Łukasiewicz, une logique formelle n'est pas nécessairement formaliste : user de variables ne suffit pas, il faut encore que les signes utilisés aient un sens univoque : « Le formalisme requiert que la même pensée soit toujours exprimée au moyen d'une série de mots exactement la même, ordonnée d'une manière exactement la même. Quand une preuve est mise en forme d'après ce principe, nous sommes en mesure de contrôler sa validité sur la base de sa forme extérieure seulement, sans faire référence à la signification des termes employés dans la preuve » (J. Łukasiewicz, *Aristotle's Syllogistic from the standpoint of modern formal logic*, p. 16).

Or, il arrive à Aristote d'utiliser par exemple les expressions « être prédiqué de », « se dire de », « suivre de » de façon interchangeable. Mais bien qu'étant non formaliste au sens où elle tolère de telles fluctuations, la logique d'Aristote permet de faire des distinctions de forme, qui s'avèrent opératoires. Ainsi dans une proposition, on a appris à distinguer, depuis les commentateurs d'Aristote, une matière et une forme ; cette distinction recoupe la distinction entre *categoremata* et *syncategoremata*, c'est-à-dire entre sujets et prédicats d'une part et des éléments de liaison d'autre part. Cette distinction est essentielle car elle permet de mettre en évidence les constantes logiques, autrement dit les *syncategoremata*. J.M. Bochenski (*Formale logik*, Base, 1956, p. 157) fait remonter cette distinction à Boèce et nous pouvons en trouver une

trace chez Averroès qui dit dans son commentaire à *Peri hermeneias* que les modalités dans une proposition sont dans celle-ci comme une forme par rapport à une matière. De même A. de Saxe indique : « Nous parlons ici de la matière et de la forme au sens où l'on comprend la matière de la proposition ou de la conséquence, comme des termes purement catégorématiques, c'est-à-dire des sujets et des prédicats, à l'exclusion des termes syncatégorématiques, qui leur sont adjoints, par lesquels ils sont reliés, niés ou distribués, et par lesquels un certain mode de supposition leur est donné. On dit en revanche que tout le reste appartient à la forme » (cité par P. Boehner, *Medieval logic*, Manchester Univ. Press, 1952, p. 25).

S'occuper de la forme des propositions c'est donc s'occuper des syncatégorèmes, c'est-à-dire des constantes logiques comme « et », « ou », « implique », « non ».

La forme logique

Dans *On Scientific Method in Philosophy*, B. Russell souligne que l'étude de la logique consiste en deux parties non totalement distinctes : « D'un côté elle s'occupe de ces énoncés généraux qui peuvent se rapporter à tout sans mention de chose, de prédicat ou de relation, comme par exemple, "si x est membre de la classe a et si chaque membre de a est un membre de b, alors x est un membre de la classe b, quels que soient x, a et b". D'un autre côté, elle s'occupe de l'analyse et de l'énumération des formes logiques, *Le* des espèces de propositions, des différents types de faits, et de la classification des constituants des faits. »

Les « formes logiques » renvoient aux divers modes d'inférence qu'Aristote avait déjà fixés dans les figures et les modes du syllogisme : à chaque fois qu'une conclusion de syllogisme est donnée en vertu de la quantité (universelle, particulière) et de la qualité (affirmative, négative) des propositions, une forme logique se trouve identifiée. Mais la syllogistique est loin d'être la seule théorie des raisonnements qui concluent par « la force de la forme » comme dit Leibniz, il y a toutes sortes de raisonnements qui sont des « arguments en forme » et qui permettent, abstraction faite du contenu induit par les propositions, de conclure de façon valide : « Je tiens que l'invention de la forme des syllogismes est une des plus belles de l'esprit humain, et même des plus considérables. C'est une espèce de mathématique universelle dont l'importance n'est pas assez connue ; et l'on veut dire qu'un art d'infailibilité y est contenu, pourvu qu'on sache et qu'on puisse s'en bien servir, ce qui n'est pas toujours permis. Or, il faut savoir que par les arguments en forme, je n'entends pas simplement cette manière scolastique d'argumenter dont on se sert dans les collèges, mais tout raisonnement qui conclut par la force de la forme, où l'on n'a besoin de suppléer aucun article, de sorte qu'un sorite, un autre tissu de syllogismes qui évite la répétition, même un compte bien dressé, un calcul d'algèbre, une analyse des

infinimentales me seront à peu près des arguments en forme, parce que leur forme de raisonner a été prédéterminée, en sorte qu'on est sûr de ne s'y point tromper » (Leibniz, *Nouveaux essais sur l'entendement humain*, chap. XVII, p. 425).

Les « arguments en forme » qui permettent de conclure avec infailibilité reposent sur la règle de substitution des identiques, règle qui permet à l'esprit de ne pas errer et se perdre dans la particularité des sujets examinés. La régularité de la forme, sensible aussi bien dans les raisonnements des mathématiciens que dans ceux des juriconsultes – au point qu'on « aurait à distinguer Ulpian de Papinien la même peine qu'à discerner Euclide d'Apollinios » (Leibniz, *Projet de préface à la science générale*, p. 149) – permet de conclure par la force de la forme, c'est-à-dire en opérant une « substitution en lieu et place de l'exemple donné » (*ibid.*, p. 148).

La forme logique est ici étroitement liée à une règle de substitution qui suppose qu'une « caractéristique » représente adéquatement les matières à analyser qui sont en jeu. Pour la garantie qu'une telle règle puisse être l'efficace de la forme, il convient donc de construire un langage qui sera à la fois une langue et un calcul et dans lequel la forme logique trouve les moyens de s'exprimer sans subir les fluctuations et les ambiguïtés de la forme grammaticale. De Leibniz à Carnap, en passant par Frege, Russell et le Wittgenstein du *Tractatus*, s'est affirmée en philosophie et en logique la nécessité de préserver la forme logique en cours dans les raisonnements des imprécisions de la forme grammaticale. La forme « sujet-prédicat » laissant place chez Frege à la forme « argument/fonction », empruntée aux mathématiques et dont le rôle est d'assurer l'unité de la proposition de façon immédiate, sans recours aux pouvoirs indus de la copule ; la distinction russellienne entre noms propres logiques (les constantes descriptives du calcul des prédicats du premier ordre) et noms propres de la langue ordinaire (qui sont en réalité des descriptions définies abrégées) sont autant d'exemples d'éléments constitutifs de cette forme logique aux vertus d'exactitude et de précision qui peut dès lors déployer sa force de façon régulière pour les besoins du raisonnement.

Mais cette force, dans la mesure où elle met entre parenthèses l'analyse des facultés humaines, est-elle illusoire ?

Le pouvoir générateur des formes

Selon que l'on exploite la première ou la deuxième définition que Kant donne de la logique, on aboutit à une caractérisation différente de la forme logique : moyen faible à puissance non autonome ou réelle matérialisation de la pensée qui se déploie selon ses propres règles. Si l'on dit (première définition) que la logique est « la science des lois nécessaires de l'entendement et de la raison » (Kant), on pensera que la forme logique n'est réalisée dans le symbole qu'une fois ce symbole compris ; si on privilégie la seconde

définition : « La logique est la science de la forme pure de la pensée en général » (Kant), alors « la forme logique » ne suppose plus un préalable de compréhension : « Il n'y a pas de différence qui revienne à la moindre contradiction entre ces deux points de vue. Le point de vue psychologique est que ces formes ne se réalisent que dans la pensée et que le langage est essentiel à la pensée. Le point de vue non psychologique est que ce sont les formes de tous les symboles aussi bien externes qu'internes, mais qu'elles ne le sont qu'en vertu d'une pensée possible. Bref, je dis que la forme logique est déjà réalisée dans le symbole lui-même ; les psychologues disent qu'elle n'est réalisée qu'une fois le symbole compris » (Peirce, *The annotated catalogue of the papers of C.S. Peirce*, Univ. of Massachusetts Press, 1967, n° 340, cité par C. Tiercelin, *La pensée-signe, études sur C.S. Peirce*, p. 32).

Ce qui est mis en jeu dans cette conciliation de la forme logique qui a pour préalable la compréhension (niveau psychologique) ou qui en est le substitut (niveau logique) est bien le pouvoir générateur de la forme. Celui-ci suppose des règles de dérivation qui font partie d'un système formel où interviennent des schémas d'axiomes : non pas tel ou tel axiome spécifique mais la forme générale d'une série d'axiomes qu'on appelle un schéma d'axiomes. Exemple : le schéma d'axiomes dit « schéma de compréhension » et pour lequel il y a autant d'axiomes que de formules $s(x)$: cet axiome dit que, pour chacune de ces formules $s(x)$, on peut trouver un ensemble dont les éléments sont ceux qui la vérifient.

Alors qu'un tel schéma d'axiomes suppose une distinction d'une forme et d'un contenu, au sens où il faut pour chaque formule $S(x)$ spécifier le domaine d'individus dans lequel la formule s'interprète, un schéma d'axiomes qui n'engage que le calcul propositionnel, sans formule prédicative, donne lieu à une indiscernabilité de la forme et du contenu : « Toutes les parties de la logique dite formelle reposent, on le remarquera, sur une spécification des objets, et sur une spécification relative des énoncés qui en parlent. Le calcul des prédicats, déjà, nous ouvre un monde déterminé dans lequel on distingue des individus et leurs propriétés, ou si l'on préfère, des éléments et leurs classes. Seul le calcul des énoncés traite donc de l'objet en général, ou plutôt d'une virtualité d'objets, et dans son univers seulement forme et contenu paraissent difficilement discernables » (G.-G. Granger, *op. cit.*, p. 40).

Il y a ainsi une relativisation de l'opposition forme-contenu qui peut prendre une autre expression : le rôle de forme peut être joué par le contenu et vice versa. Par exemple, les constantes universelles de la physique, comme la constante de Planck, la constante de la gravitation, la constante de la vitesse de la lumière, et la constante de Boltzmann. Ce sont là à la fois les contenus ultimes de notre connaissance de l'univers et des formes de cette connaissance. Elles sont formelles dans la mesure où elles indiquent les limites de la connaissance humaine de l'univers et en même temps

elles fournissent des informations sur l'univers, informations qui sont autant de contenus.

De cette double relativisation de l'opposition forme-contenu – relativisation logique (le calcul des propositions) et relativisation physique (les constantes universelles) – il ressort que la distinction féconde est peut-être moins celle de la forme et du contenu que celle de l'opération et de l'objet. En se libérant d'un contenu, une forme devient, comme opération, génératrice d'un autre contenu. Aussi, n'est-il pas toujours adéquat d'opposer le formel à l'intuitif, puisque aussi bien les formes symboliques induisent des « intuitions abstraites » selon l'expression de Cavallès. Celui-ci a pu montrer qu'il y avait une plasticité du rôle de la forme en mathématiques qui interdit de l'isoler du contenu d'une quelconque façon. En prenant comme exemple l'addition, on peut indiquer la plasticité de ce rôle et le caractère opératoire de la forme : l'addition entre deux nombres entiers peut être idéalisée pour ne plus tenir qu'entre éléments non spécifiés. Dès lors l'intérêt matériel que l'on portait aux nombres se déplace vers les propriétés de l'addition comme loi de composition : associativité, commutativité, etc. Il y a donc un caractère opératoire de la forme qui lui fait jouer tour à tour le rôle de contenu (les propriétés formelles de l'addition) après lui avoir fait jouer le rôle de forme (addition valant entre deux nombres spécifiés) : « Ainsi l'addition que le procès longitudinal rend indifférente aux nombres, lettre ajoutée qui devient multiplication ou addition abstraite et dont le procès transversal donne les lois d'associativité et de commutativité : dans le premier cas la notion se purifie suivant la même ligne en quelque sorte, par position de formes de plus en plus abstraites, dans le deuxième apparaît sur un autre plan la nouvelle forme que constituent les principes de la première » (J. Cavallès, *Sur la logique et la théorie de la science*, p. 513-514).

Ce caractère opératoire de la forme implique l'idée qu'une structure mathématique repose sur une extrême abstraction d'objets mathématiques d'un type particulier comme les groupes (comme le montre l'exemple de l'addition sur les nombres entiers) et les schémas d'axiomes ; groupes et schémas sont susceptibles d'exemplifications multiples et en ce sens ils sont formels, c'est-à-dire principe de constitution de plusieurs objets. Leurs rôles dépassent largement le domaine proprement mathématique.

La structure de groupe, par sa propriété de transformer un ensemble d'objets en ce même ensemble, a ainsi une application directe en cristallographie puisqu'elle permet de comprendre comment la forme externe des choses, en allemand la *Gestalt*, se détermine par l'arrangement de leurs constituants internes » (F. Balibar, *La science du cristal*, p. 79). La propriété des groupes permet de montrer comment les symétries d'orientation concernant les faces du cristal, autrement dit sa forme, reflètent les symétries de position en rapport avec « l'arrangement spatial des atomes » (*ibid.*) ; elle explique ainsi le passage du groupe de position au groupe d'orientation.

Morphologie : la forme entre continu et discontinu

L'exemple de la cristallographie indique combien les formes mathématiques sont sous-jacentes dans les formes physiques. « Les problèmes de forme sont d'abord mathématiques, ceux de genèse sont physiques » (D'Arcy Thompson, *On Growth and Form*, p. 10). En ce sens la morphologie est dynamique : « La morphologie n'est pas seulement une étude des choses matérielles et de leurs formes, elle a un aspect dynamique sous lequel nous rencontrons l'interprétation, en termes de force, des opérations de l'énergie, et là il faut remarquer qu'en embryologie ou en théorie de l'évolution, le langage habituel de la littérature tient trop grand compte des éléments matériels comme les causes du développement, de la variation ou de l'hérédité » (*ibid.*, p. 19-20).

René Thom, qui invoque souvent D'Arcy Thompson, concentre ses efforts sur l'analyse de cet aspect dynamique en prenant l'outil mathématique de la géométrie et en montrant que les formes, même celles des solides les plus apparemment statiques, sont toujours sujettes à un dynamisme. Ainsi dans toute structure stable, il y a un dynamisme sous-jacent qui est son principe d'engendrement.

Pour Thom, l'apparition d'une forme est liée à une discontinuité du milieu (cf. le contour des objets physiques). Seul un moyen mathématique permet de décrire ce passage de la continuité à la discontinuité ; ce passage se fait à l'occasion d'un exercice des forces : « La forme particulière du tourbillon de l'écume sur les vagues est le résultat d'une discontinuité due en général à des forces antagonistes, dans le mouvement du liquide » (H. Atlan, *Entre le cristal et la fumée*, p. 222). Les explications géométriques sont à la base de toutes les formes même les plus compliquées, observées lors du développement des êtres vivants. R. Thom fait un usage de la topologie car cette branche des mathématiques « étudie dans une figure les propriétés qui ne changent pas quand celle-ci subit des transformations de proche en proche sans discontinuité. C'est ainsi qu'un cercle, une ellipse, un carré ou un triangle inscrit dans le cercle ont les mêmes propriétés topologiques, celles d'une courbe fermée » (H. Atlan, *op. cit.*, p. 221).

Cette analyse donnant la priorité au pouvoir générateur des mathématiques rappelle celle des intuitionnistes comme Brouwer pour lesquels ce sont les objets mathématiques qui suscitent les formes par les relations qu'ils entretiennent entre eux : les formes logiques ou linguistiques ne sont donc pas génératrices des objets mathématiques. Dans la théorie de R. Thom, cette thèse s'exprime par une dérivation des formes linguistiques : « Avant même le niveau linguistique qui est celui de l'homme il y a l'étage morphologique de la classification d'un processus phénoménologique en formes prégnantes, processus de reconnaissance des formes qui existe chez l'animal et dont on a toutes raisons de penser que l'activité linguistique est

directement issue » (R. Thom, « Prédication et grammair universelle », p. 24).

La question première n'est dès lors pas une question d'enveloppe linguistique ou de forme logique : elle est plutôt celle-ci : comment rendre compte des phénomènes naturels en tant qu'ils sont organisés, complexes et divers ?

Le retour à Aristote se trouve alors éclairant. Par son concept de forme à base ontologique et existentielle, il permet de penser la forme sous un versant concret où le qualitatif prime sur le quantitatif : « J'entends par matière, par exemple l'airain, par forme la configuration qu'elle revêt (*schema tès ideas*), et par le composé des deux, la statue, le tout concret » (*Métaphysique* Z, 3, 1029a5). À partir de là on peut relativiser le pouvoir formel de la syllogistique elle-même : celle-ci est moins le cadre d'une invariabilité de diverses formes d'inférence, que « la saisie intuitive d'un emboîtement ou d'un non-emboîtement de totalités naturelles [...] ». Lorsque les espèces immuables eurent été abandonnées et qu'à la place on considéra des groupements quelconques, les syllogismes perdirent leur interprétation originelle et leur raison d'être. De substrats autonomes les substances, devenues sujets et prédicats grammaticaux, se confondirent avec la fonction de ceux-ci d'être des supports d'opérations linguistiques ou logiques. Les formes seules conservées, la syllogistique devient une logique formelle » (J. Largeault, *Apologie de la logique*, p. 83).

Le rapport de l'espèce au genre est donc ce qui motive en premier la forme syllogistique, qui ne devient « un argument en forme » selon l'expression de Leibniz, qu'une fois que les sciences physique et biologique n'y ont plus trouvé leur expression adéquate. Mais, dans sa valeur pleinement opératoire chez Aristote, la forme entretient avec la matière le rapport de l'espèce au genre : dans les deux cas on a un continu (le genre, la matière) qui va se « trouver découpé en *eidè* distinctes » (R. Thom, *Matières, formes et catastrophes*, in *Penser avec Aristote*, p. 377).

Principe d'organisation de la matière, la forme n'est pas chez Aristote un être qui se suffit à lui-même comme cela est le cas pour l'*eidòs* de Platon ; c'est plutôt comme le dit Leibniz, commentant Aristote : « Ce qui est un principe de l'action et se trouve dans celui qui agit » (*Essais de Théodicée*, § 87, Paris, GF, p. 151). La forme n'est pas donc pas totalement une substance, c'est un concept relatif. Ajoutons à cette caractérisation relationnelle le facteur téléologique : la forme suppose une causalité formelle qui elle-même ressortit à une causalité finale ; celle-ci a donné lieu à « un schème hylémorphique » dans lequel la « matière est capturée par la forme » (R. Thom, *Aristote et l'avènement de la science moderne*, p. 492) ; schème dans lequel la forme possède une activité d'information et de structuration, un dynamisme que la science moderne attribue aux théories, qui, en mathématiques s'occupent de stabilité structurelle (groupe de Lie, groupe topologique, groupe de Lorenz, etc.).

Sur cette base aristotélicienne, R. Thom construit

deux concepts introduits pour caractériser la notion de forme : ce sont ceux de « saillance » et de « prégnance ». Dans le premier on retrouve la propriété de stabilité structurelle de la forme : « La notion de saillance que j'introduis peut être vue comme une réduction au topologique de l'*oussia* aristotélicienne – le *tode ti koriston* – j'appelle saillante toute forme extérieure qui se sépare de son fond par un bord net. La forme peut être temporelle : un tintement de sonnette, segment temporel entre deux intervalles vides de son, un disque coloré sur un plan mat, un corps solide dans l'espace sont des formes saillantes » (R. Thom, *Matières, formes catastrophes*, p. 381). En dehors de ces formes concrètes aux contours déterminés, il y a des formes plus abstraites, celles qui engagent les universaux et pour laquelle R. Thom choisit la notion de « prégnance ». Cette notion, de facture plus dynamique, a une origine biologique, et se rapporte à des entités où il y a propagation : « Le tintement de sonnette, forme auditive saillante, qui précède immédiatement l'arrivée de la viande, va susciter chez le chien un réflexe de salivation ; j'interprète ce fait en disant que la forme saillante du tintement de sonnette est investie de prégnance alimentaire. À partir de cette forme investie, on pourra obtenir d'autres formes saillantes investies par un processus d'association temporelle, ou par "similarité" » (*id.*, p. 384).

► ATLAN H., *Entre le cristal et la fumée*, Paris, Le Seuil, 1979.
 – AUSTIN J.L., *Sense and Sensibilia* (1962), trad. fr. P. Gochet, *Le langage de la perception*, Paris, A. Colin, 1971.
 – BALIBAR F., *La science du cristal*, Paris, Hachette, 1991.
 – BOCHENSKI J.M., *Fomale logik*, Bâle, 1956. – BOLZANO B., *Die Wissenschaftslehre*, I, 1837, in *Grundlegung der Logik*, Hambourg, 1963. – BOVERESSE J., *Langage, perception et réalité*, Nîmes, J. Chambon, 1995. – CAVAILLES J., *Sur la logique et la théorie de la science*, in *Œuvres complètes*, Paris, Hermann, 1994. – GOLDSTEIN K., *La structure de l'organisme*, Paris, Gallimard, 1952. – GRANGER G.G., *Formes opérations objets*, Paris, Vrin « Mathesis », 1994. – GUILLAUME P., *La psychologie de la forme*, Paris, Flammarion, 1947. – HELMHOLTZ H., *L'optique physiologique* (1867), trad. fr. et rééd., Sceaux, 1989. – KOFFKA K., *Principles of Gestaltpsychology*, New York, Harcourt, 1935. – KÖHLER W., *La psychologie de la forme*, Paris, Gallimard « Idées », 1964. – LARGEAULT J., *Apologie de la logique*, in *Passion des formes. Dynamique qualitative. Sémio-physique et intelligibilité*, Paris, ENS Éd., 1995. – LEIBNIZ, *Nouveaux essais sur l'entendement humain*, Paris, Garnier-Flammarion, 1966, chap. XVII, p. 425 ; *Projet de préface à la science générale*, in *Recherches générales sur l'analyse des notions et des vérités*, trad. fr., Paris, PUF, 1998. – LUKASIEWICZ J., *Aristotle's Syllogistic from the standpoint of modern formal logic*, Oxford Clarendon Press, 2^e éd., 1957. – RUSSELL B., *On Scientific Method in Philosophy*, in *Mysticism and logic* (1917), Londres, Unwin, 1989, p. 109. – THOM R., *Prédication et grammair universelle in Fundamenta scientiæ*, vol. 1, 1980 ; *Aristote et l'avènement de la science moderne : la rupture galiléenne*, in *Penser avec Aristote*, Paris, Eres, 1991 ; *Esquisse d'une sémio-physique*, Paris, InterÉditions, 1988 ; *Stabilité structurelle et morphogénèse*, 2^e éd., Paris, InterÉditions, 1977. – THOMPSON D'ARCY W., *On Growth and Form*, Cambridge, Univ. Press, 1917, nouv. éd., 1942. – THERCELIN C., *La pensée-signé, études sur C.S. Peirce*, Nîmes, J. Chambon, 1993.

– WITTGENSTEIN L., *Letzte Schriften über die Philosophie der Psychologie*, Oxford, Basil Blackwell, 1982.

Ali BENMAKHOULOU

→ Déduction ; Démonstration ; Image ; Méthode ; Proposition ; Rationalisme.

FOSSILE

Dans son acception contemporaine, le mot fossile (du latin *fodere* : creuser) désigne des restes, empreintes ou traces d'activité d'organismes anciens conservés dans des roches sédimentaires. Les fossiles constituent ainsi des témoins irremplaçables de l'histoire de la vie grâce auxquels il est possible de se faire une idée des êtres qui peuplèrent notre planète aux époques anciennes. Le premier usage de ce mot dans la langue française est dû à Richard Le Blanc (~ 1510–1580) qui traduisit en 1556 le *De Subtilitate* de Jérôme Cardan. À cette époque, conformément à l'usage introduit précédemment par Agricola, on regroupait indistinctement sous le vocable *fossilis* tous les objets extraits du sol. Cet usage allait se maintenir jusqu'au milieu du siècle des Lumières puisque Holbach introduisait ainsi en 1757 l'article « Fossile » de l'*Encyclopédie* : « On appelle fossiles en général toutes les substances qui se tirent du sein de la terre. » Il distinguait ensuite « deux espèces de fossiles, 1^o ceux qui ont été formés dans la terre, & qui lui sont propres ; on les appelle *fossiles natifs* – (ce sont les terres, pierres, pierres précieuses, cristaux, métaux, etc.), 2^o ceux qui ne sont point propres à la terre, que l'on appelle *fossiles étrangers à la terre* – (il s'agit des coquilles, ossements, bois, plantes, etc.). Seuls ces derniers nous intéressent ici. Ils ont été nommés différemment selon les auteurs. Parmi les vocables les plus cités, citons les « pierres figurées » (Hooke, 1668), « pétrifications » (Hooke, 1668), « lapides sui generis » (Lister, 1671), « pierres idiomorphes » (Mercati, 1717), « fossiles accidentels » (Bertrand, 1763), etc.

Les Anciens

Dans l'Antiquité, la notion de fossiles ou d'organismes pétrifiés ne semble pas avoir donné lieu à une réflexion très approfondie, du moins si l'on en croit les rares fragments qui nous sont parvenus ou les résumés qu'ont donnés des œuvres disparues des témoins tardifs des premiers siècles de notre ère. On sait néanmoins que, d'après saint Hippolyte de Rome (III^e s. apr. J.-C.), Xénophane de Colophon (VI^e s. av. J.-C.) avait observé « des coquilles au milieu de la terre et dans les montagnes » et prétendait « qu'à Syracuse, dans les carrières, il a trouvé l'empreinte d'un poisson et de phoque, et à Paros, une empreinte de sardine dans l'épaisseur de la pierre » (deux affirmations qui n'ont pas été confirmées par les études modernes). D'autres observateurs anciens établissent une relation causale entre la présence de coquilles pétrifiées et l'ancien

séjour de la mer. Ainsi, au V^e s. avant J.-C., Hérodote écrivait qu'en Égypte, « des coquillages s'y voient sur les montagnes ». Au tout début de notre ère, Strabon (~ 58 av. J.-C. – 21 ou 25 apr. J.-C.) rapporte les interrogations d'Ératosthène (III^e s. av. J.-C.), qu'intriguait le fait qu'« à deux ou trois mille stades de la mer, vers l'intérieur des terres, on constate en beaucoup d'endroits la présence d'une grande quantité de coquillages, d'écaillés d'huîtres, de valves, d'eaux saumâtres, comme c'est le cas [...] aux environs du temple d'Ammon et sur la route qui y mène et qui a quelque trois mille stades de long ». Il rappelle également l'opinion de Straton pour qui « l'Égypte, dans les temps anciens, aurait été baignée par la mer jusqu'aux marais proches de Péluse et jusqu'au mont Casios et au lac Sirbonis » (*Géographie*, livre I, 3, 4). Cela prouve bien que, dès cette époque, certains observateurs considéraient les coquilles pétrifiées comme des restes d'anciens êtres vivants marins.

Les Pères de l'Église

Les explications de Strabon parurent sans doute attrayantes à certains Pères de l'Église qui cherchaient surtout à prouver la véracité du Déluge. En ce sens, le témoignage le plus probant est celui d'Eusèbe Pamphile, évêque de Césarée (~ 265-340). Originaire de Palestine, il mentionna dans ses *Chroniques* « certains poissons trouvés à notre époque en altitude sur les sommets mêmes du Liban les plus élevés : car certains ouvriers qui en extrayaient des pierres de construction en taillant dans les montagnes, trouvèrent différentes espèces de poissons de mer, qui avaient été solidifiés avec le limon dans les cavités en haut des montagnes, et il arriva qu'ils restèrent jusqu'à présent, à la manière des salaisons ». Il y voyait la preuve que « le Déluge s'éleva au-dessus des plus hautes montagnes ».

Avicenne et la congélation des pierres

Ibn Sinâ (980-1037), connu en Occident sous le nom d'Avicenne, a inclus dans son *Livre des Remèdes (Kitâb alchifâ')* un petit texte d'essence géologique qui fut traduit en latin vers la fin du XI^e s. sous le titre *De congelatione et conglutinatione lapidum*. Il y explique que la cause de la pétrification des animaux et des plantes « est une puissante vertu minéralisatrice et pétrificatrice ». D'après lui, cette vertu « émane soudainement du sol pendant les tremblements de terre [...] et pétrifie tout ce qui vient à son contact ». Cette vertu a souvent été assimilée à tort à une « force plastique ».

On sait qu'après la longue période d'obscurantisme qui suivit la chute de l'Empire romain, le renouveau des sciences dans l'Occident chrétien se produisit en Andalousie sous l'influence des Arabes qui y développèrent une civilisation extrêmement raffinée. C'est par leur médiation que furent introduites en Europe occidentale les œuvres d'Aristote, sensiblement enrichies

au passage d'éléments qui leur étaient étrangers. Dans les *Météorologiques*, Aristote avait expliqué la formation des fossiles (c'est-à-dire des pierres qui ne peuvent être fondues lorsqu'on les chauffe avec certaines substances) et des métaux par l'action d'exhalaisons produites par l'action du soleil sur les quatre éléments : feu, air, eau et terre. À ce corps de doctrine, les Arabes ajoutèrent une composante astrologique héritée de Ptolémée, ainsi que des conceptions anciennes selon lesquelles il existerait des correspondances entre objets célestes et terrestres.

Les fossiles et la renaissance des sciences en Occident

L'éveil intellectuel de l'Occident chrétien se produisit principalement à partir du XIII^e s. sous l'influence des Arabes d'Espagne. L'intérêt pour les pierres se traduisit alors à la fois dans des ouvrages à vocation encyclopédique dont le *Speculum mundi* de Vincent de Beauvais, écrit vers 1250, est le prototype, et par la composition de lapidaires dont le plus connu est sans aucun doute le *De Mineralibus* d'Albert le Grand (~ 1193-1280), écrit vers 1260. L'impression de cet ouvrage à la fin du XV^e s. (1476) – deux siècles après la mort de son auteur – prouve qu'il continua longtemps à être considéré comme une œuvre de référence. Le chapitre VIII du livre I traite des « pierres ayant intérieurement ou extérieurement des figures d'animaux » dont il explique la genèse en admettant avec Avicenne que ce sont des animaux généralement transformés en pierres salées sous l'action d'une exhalaison de force pétrifiante.

Les fossiles, curiosités naturelles

Au XVI^e s., l'intérêt pour les curiosités naturelles engloba le monde minéral : minéraux et objets présentant d'évidentes ressemblances avec des êtres vivants. C'est à cette époque que commencèrent à se constituer les premiers cabinets de curiosités. Le plus ancien dont on ait gardé la mémoire est celui de Johann Kentmann (1518-1574) dont Conrad Gesner publia en 1565 le catalogue. À la même époque, une « Métallothèque » fut constituée au Vatican par Michele Mercati (1541-1593). Sa description ne fut publiée que plus d'un siècle plus tard (1717). De même, à Bologne, Ulysse Aldrovandi (1522-1605) réunit un « Musaeum metallicum » dont le catalogue parut en 1648. À la même époque, à Vérone, Francesco Calzeolari (1522-1609) possédait également un cabinet de curiosités réputé dont on peut se faire une idée d'après le *Musaeum Calzeolarianum Veronense* de Benedicto Ceruti et Andrea Chiocco (1622). La vogue des cabinets de curiosités allait s'amplifier en Europe occidentale au cours des deux siècles suivants, permettant ainsi l'accumulation de matériaux de qualité offerts à la sagacité des esprits éclairés.

Agricola et la définition du mot « fossile »

Dans son *De Natura Fossilium* (1546), Agricola (1494-1555) ne traite qu'incidemment de certains fossiles d'origine organique car cet ouvrage est consacré, de manière plus générale, à l'ensemble des objets « fossiles » (c'est-à-dire extraits du sol) et notamment aux roches, aux minéraux, aux métaux, aux terres, etc., dont il énumère caractères, propriétés et usages. Il y mentionne néanmoins, parmi les pierres (*lapides*), un certain nombre d'organismes fossiles : *ostracites* (huîtres fossiles), *strombites* (gastéropodes fossiles), *trochites*, *lapis judaicus* (radioles de cidaris), *encrinos* (nos encrines, ou lis de mer), *bélemnites* (livre V). Il note également la présence d'insectes et d'araignées dans l'ambre (livre IV) et cite le *lapis eislebanus* sur lequel des empreintes de poissons sont parfois visibles (livre I).

Conrad Gesner : naissance de l'icongraphie

La connaissance des organismes fossiles fit un progrès décisif avec la publication en 1565 par Conrad Gesner (1516-1565) de son *De rerum fossilium, lapidum et gemmarum...*, illustré de bois gravés. Toutefois, dans cet ouvrage, comme dans celui d'Agricola, les fossiles véritables (au sens actuel) sont relativement peu nombreux, l'objectif de l'auteur étant de dresser un tableau de l'ensemble des objets susceptibles d'être extraits du sol. La classification adoptée est déroutante pour un esprit moderne : on est surpris, au chapitre I, par le rapprochement de deux figures illustrant, l'une des prismes basaltiques et l'autre des articles de tige de pentacrine (*asterias*). Au chapitre V, consacré aux pierres qui ressemblent à des objets artificiels, sont réunis des articles de tige d'encrines (*entochos*), comparés à des roues, et des rostres de bélemnites, interprétés comme des flèches. Toutefois, la plupart des fossiles véritables sont réunis au chapitre XIV, consacré aux pierres ressemblant à des animaux aquatiques, dans lequel l'auteur regroupe l'empreinte d'un poisson sur une pierre d'Eisleben (*Lapis islebianus*), des glossopètres (dents de requins fossiles), diverses ammonites, des coquilles de lamellibranches (l'une d'elles est baptisée *Pecten*), des moules internes d'oursins, un crabe pétrifié nommé *Pagurus* et des phragmocônes de bélemnites. Mais au chapitre suivant qui traite des pierres ressemblant à des serpents et des insectes, on trouve encore une ammonite, assimilée à un serpent lové, et deux oursins cidaridés étonnamment interprétés comme des œufs de serpent (*ovum anguinum*). On voit ainsi que si, pour Gesner il n'était pas difficile de reconnaître l'identité de certains objets fossiles dont la ressemblance avec des êtres vivants actuels est patente (poissons, crabes, certains lamellibranches, certains oursins), les restes d'animaux disparus demeuraient énigmatiques. On notera en outre que cette classification, fondée sur des ressemblances, naturelles ou accidentelles, traduit simplement une volonté d'ordonner les objets fossiles,

sans que soit nécessairement recherchée une correspondance avec les êtres vivants connus.

La question de l'origine organique des fossiles

Chercheur solitaire, Léonard de Vinci (1452-1519) fut l'un des tout premiers à réfléchir à la signification des fossiles, rejetant aussi bien l'idée alors largement répandue d'une influence astrale, responsable de leur genèse dans les roches, que celle du Déluge, popularisée par les Pères de l'Église. Son argumentation repose à la fois sur une observation minutieuse de la morphologie et des conditions de gisement des coquilles fossiles et sur des considérations déduites du mode de vie des coquillages actuels. Il s'agit là d'une démarche de type véritablement actualiste. Ses carnets étant restés de son vivant à l'état manuscrit, son influence demeura malheureusement très limitée.

Dans ses *Discours admirables...* (1580), Bernard Palissy (~ 1510-1590) expliqua que la présence, dans « une veine de pierre » des anciennes carrières souterraines de Paris, de coquilles « faites en limace pyramidale », résulte du fait « qu'il y a eu autrefois quelque grand lac [...] rempli de quelque semence salstative & generative ». Il dit également avoir observé en Champagne des coquilles « semblables à quelques espèces d'aucuns genres de pourpres, de buccines, & autres grandes limaces, desquels genres ne s'en trouve point en la mer Oceane, & n'en void on sinon par le moyen des nautonniers, qui en apportent bien souuent des Indes et de la Guinée » (p. 226). Ce passage suggère implicitement, que ces animaux avaient dû vivre sous un climat tropical. On doit encore à Palissy d'avoir – cette fois explicitement – remarqué l'existence d'espèces disparues parmi les coquilles dont il a vu « un grand nombre qui sont petrifiées, dont la semence en est perdue » (p. 215).

Si Palissy fait ainsi figure de précurseur, la reconnaissance de la nature organique des fossiles demanda encore près d'un siècle pour être acceptée malgré l'éclatante démonstration de Fabio Colonna (~ 1567-1640), qui avait prouvé dans sa *De Glossopetris Dissertatio* (1616) que « les langues de serpents, dites aussi glossopètres de Malte, ne sont pas en pierre, comme l'affirment certains, mais en os, et sont des dents de requins, de roussettes, ou chiens de mer, et d'animaux semblables autrefois recouverts par la marée d'une terre légère et boueuse ». Il avait en effet montré que la calcination des glossopètres conduit à leur carbonisation, alors qu'elles se seraient transformées en chaux si elles avaient été constituées de pierre calcaire.

Dans une digression insérée dans ses *Elementorum myologiae specimen... Canis Carchariae dissectum caput* (1667), Nicolas Sténon (1638-1686) a confirmé, en se fondant sur une comparaison des glossopètres avec les dents du grand requin blanc (*Carcharodon carcharias*), l'interprétation de Fabio Colonna. On peut cependant regretter que sa prudence extrême ait affaibli la portée de son message, bien que le passage suivant

soit dénué d'ambiguïté : « Comme la figure des glossopètres ressemble aux dents de chien de mer comme un œuf à un œuf ; comme ni leur nombre, ni la situation de la terre ne conseillent le contraire, ceux qui affirment que les plus grandes glossopètres sont des dents de chien de mer ne me semblent pas beaucoup s'écarter de la vérité » (p. 141-142).

Robert Hooke (1635-1603) publia en 1667 un ouvrage intitulé *Micrographia* dans lequel il rapportait ses observations microscopiques, dont certaines concernent les fossiles. Il y consacra quelques pages aux bois et à d'autres corps pétrifiés parmi lesquels des coquillages dont il tenta d'interpréter la genèse. À l'issue de ses observations, il livra le fruit de ses réflexions : « Je ne puis que penser que tous ces [corps] et la plupart des autres sortes de corps pierreux que l'on trouve ainsi étrangement figurés, doivent leur formation et leur nature figurative, non à quelque sorte de vertu plastique inhérente à la terre, mais aux coquilles de certains coquillages qui, soit par quelque déluge, inondation, tremblement de terre, ou par quelque autre moyen, vinrent à être jetées en ce lieu, et remplies de quelque sorte de boue ou argile, ou d'eau pétrifiante, ou de quelque autre substance qui, au cours du temps, a été déposée et durcie dans ces moules coquilliers jusqu'à devenir ces substances modelées que nous trouvons présentement » (p. 111).

La théorie des semences pétrifiantes

Cette notion paraît remonter à l'alchimiste allemand Andreas Libavius (1560-1616) qui rapporta des croyances populaires selon lesquelles des rameaux d'or pousseraient dans certains vignobles hongrois. Elle acquit davantage de consistance avec Estienne de Clave qui, dans ses *Paradoxes ou Traitez philosophiques des pierres et pierreries...* (1635), imaginait que les eaux de pluie qui pénètrent dans la terre dissolvent certaines substances, et notamment le nitre balsamique. En atteignant le feu central, elles seraient volatilisées et remonteraient vers la surface terrestre chargées d'un pouvoir séminal comparable à celui de semences mâles des êtres vivants qui, dans des circonstances favorables, seraient capables d'engendrer des semences femelles avec lesquelles elles s'uniraient pour former une graine susceptible de former un « fossile » (*sensu lato*).

Cette théorie rencontra un vif écho chez Edward Lhwyd (1660-1709) qui publia en annexe à ses *Lithophylacii Britannici Ichnographia* (1699) une lettre à John Ray dans laquelle il écrit qu'il « soupçonne que les vapeurs qui s'élèvent de la mer, et pénètrent sous forme de pluie ou de brouillard, les couches supérieures de la terre à la profondeur requise, sont imprégnées assez souvent de la semence de testacés et de nombreux poissons ; et ensuite, selon la part donnée de semence et la conformité de la matrice, sont formés, tantôt des poissons entiers, tantôt seulement leurs contours, tantôt des dents, des mâchoires, des vertèbres ou d'autres petits os » (p. 134).

Toutefois, la théorie des semences pétrifiantes connut son apogée avec la publication par Karl Nikolaus Lang (1670-1741) de son *Tractatus de Origine lapidum figuratorum...* (1709) dans lequel il affirmait : « Personne ne doutera que tous les êtres vivants sont produits par une force plastique séminale de leur propre espèce », avant de préciser que « cette force plastique séminale consiste en une exhalaison très subtile du corps vivant, qui est le principe intime du mouvement et le principal instrument de l'Idée divine... » (p. 36).

Les fossiles témoins du Déluge

Dès le milieu du XVI^e s., Luther avait considéré les fossiles comme des témoins du Déluge. Il fallut toutefois attendre la fin du siècle suivant pour que cette thèse rencontrât un certain succès. Une interprétation quelque peu similaire fut exposée par Leibniz (1646-1716) dans le résumé de sa *Protogée* publié en 1693 dans les *Acta eruditorum* de Leipzig. On y lit que « la mer, autrefois, a couvert une grande partie de la Terre aujourd'hui découverte et qu'elle a séjourné sur les montagnes élevées... », comme le prouve le fait que « l'on rencontre entre les montagnes des couches de ruines inclinées souvent pleines de coquillages, de glossopètres et d'autres dépourilles marines, emprisonnées dans des sédiments durcis ». Il souligne cependant que « l'on ne doit point uniquement imputer tous ces faits au déluge : certains découlent de grandes inondations locales ». Les arguments de Leibniz sont détaillés dans son livre posthume publié en 1749.

Mais le succès du Diluvianisme fut principalement consécutif à la publication par John Woodward (1665-1728) de son *Essay toward a Natural History of the Earth* (1695) que Johann Jakob Scheuchzer (1672-1733) traduisit en latin. Ce dernier en fut l'un des plus ardents propagandistes, comme en témoignent les titres de plusieurs de ses œuvres : *Herbarium diluvianum* (1709), *Musaeum diluvianum* (1716) et *Homo Diluvii testis* (1726).

Buffon, Lamarck et les fossiles

Dans l'article VIII des *Preuves de la Théorie de la Terre* (1749), Buffon, après avoir rapporté de nombreux témoignages de voyageurs relatifs aux pétrifications, remarque qu'« on trouve en France non seulement les coquilles de nos côtes, mais encore des coquilles qu'on n'a jamais vues dans nos mers » (p. 287-288). C'est le cas de certaines « pétrifications, comme les grosses vis, le buccin appelé abajour, les sabots, etc., dont l'analogie vivante est étranger ou inconnu » (p. 288). À son avis, « Il est à croire que les cornes d'ammon & quelques autres espèces qu'on trouve pétrifiées, & dont on n'a pas encore trouvé les analogues vivants, demeurent toujours dans le fond des hautes mers [...] ; il peut se faire aussi qu'il y ait eu de certains animaux dont l'espèce a péri, ces coquillages pourroient être du nombre : les os fossiles extraordinaires qu'on trouve en Sibérie, au Canada, en

Irlande & dans plusieurs autres endroits, semblent confirmer cette conjecture... » (p. 290). Trente ans plus tard, Buffon développa son argumentation dans les *Époques de la Nature* (1778). Ainsi, la « quatrième époque » nous a laissé des « monuments authentiques de la Nature ; savoir, les coquilles dans les marbres, les poissons dans les ardoises, & les végétaux dans les mines de charbon » (p. 161), tandis que la « cinquième époque » est définie comme suit, « lorsque les Éléphants & les autres animaux du Midi ont habité les Terres du Nord » (p. 165), ce qui constituait un argument décisif à l'appui de sa thèse d'un refroidissement progressif du globe.

Les idées de Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) sur les fossiles se situent dans le droit fil de celles de Buffon. Bien que les fossiles n'aient joué qu'un rôle très réduit dans son œuvre, Lamarck étudia une collection principalement constituée de mollusques de l'Éocène du bassin de Paris, dont la description fit l'objet de son *Mémoire sur les fossiles des environs de Paris...* (1802-1809). On y lit dans l'introduction que, « en joignant cette connoissance [des fossiles] à d'autres faits qui attestent le déplacement des mers, on sent qu'elles ne se sont retirées des lieux où elles se trouvoient, qu'en obéissant à une cause lente et toujours active... » (p. 3). Il y expose la thèse selon laquelle « la connoissance des fossiles, par différents faits importants qu'elle présente, devient encore l'indice d'un changement continu, quoiqu'infiniment lent, qui s'opère dans les climats, relativement à chaque point de la surface du globe » (*ibid.*).

Les fossiles, témoins des catastrophes

Les promenades géologiques en Ile-de-France, en compagnie d'Alexandre Brongniart avaient convaincu Georges Cuvier (1769-1832) que de nombreuses révolutions ont bouleversé la surface du globe, que la mer « n'a point constamment déposé des pierres semblables entre elles » (*Discours préliminaire*, p. 8) et que, « dans de pareils changements du liquide général, il étoit bien difficile que les mêmes animaux continuassent à y vivre » (*ibid.*, p. 9). Il en déduisait que les « changemens arrivés dans les productions des couches coquillères » sont la conséquence de « diverses irrptions et retraites successives » des eaux (*ibid.*, p. 10).

Impressionné par la découverte de nombreux ossements de mammouths et d'autres grands mammifères le long des rivières de Sibérie, Cuvier s'était convaincu que « la plupart de ces catastrophes [...] ont été subites » ; notamment la dernière qui « a laissé encore, dans les pays du Nord, des cadavres de grands quadrupèdes que la glace a saisis, et qui se sont conservés jusqu'à nos jours avec leur peau, leur poil et leur chair » (*ibid.*, p. 10-11).

Par ailleurs, Cuvier considérait le témoignage des fossiles comme capital car « c'est aux fossiles seuls qu'est due la naissance de la théorie de la terre ». En effet, « sans eux, l'on n'auroit peut-être jamais songé

qu'il y ait eu dans la formation du globe deux époques successives, et une série d'opérations différentes » (*ibid.*, p. 35). En particulier, les « os fossiles de quadrupèdes » sont importants car leur apparition « annonce, ou que la couche même qui les porte étoit autrefois à sec, ou qu'il s'étoit au moins formé une terre sèche dans le voisinage. Leur disparition rend certain que cette couche avoit été inondée, ou que cette terre sèche avoit cessé d'exister » (*ibid.*, p. 37). Par leur truchement, « nous apprenons, d'une manière assurée, le fait important des irrptions de la mer [...] ; et c'est par leur étude approfondie que nous pouvons espérer de reconnoître le nombre et les époques de ces irrptions » (*ibid.*, p. 37-38). On voit que le catastrophisme de Cuvier fait appel à l'existence de déluges successifs alors qu'à la même époque, son ami William Buckland (1784-1856) défendait encore dans ses *Reliquiae Diluvianae* (1823) un diluvianisme orthodoxe.

Des « fossiles caractéristiques » de William Smith au développement de la stratigraphie paléontologique

William Smith (1769-1839) est généralement considéré à la fois comme le fondateur de la stratigraphie et l'inventeur de la cartographie géologique moderne. Il réalisa dès 1801 une carte géologique manuscrite de l'Angleterre et du pays de Galles (imprimée en 1815). Pour l'essentiel, Smith fonda ses recherches stratigraphiques sur l'observation de la superposition des strates successives, ce qui ne l'empêcha pas de reconnaître dans celles-ci la présence de « fossiles caractéristiques » utilisables comme critères d'identification des strates, bien qu'il ne se fût pas préoccupé d'en faire l'étude paléontologique approfondie. Ce n'est en effet qu'en 1816 que Smith figura les « fossiles organisés » qui lui avaient servi à caractériser les strates en quelque sorte à la manière d'antiques médailles.

Dans leur *Essai sur la Géographie minéralogique des environs de Paris*, Georges Cuvier et Alexandre Brongniart (1811) distinguèrent onze « terrains » depuis la « Craie » jusqu'au « limon d'atterrissement ». Tous ne renferment pas des restes fossiles mais chaque fois que cela a été possible, une liste en a été dressée. Ce fut le cas pour le « calcaire grossier », subdivisé en trois groupes de couches dont le contenu fossilifère a été inventorié. L'intérêt de ces relevés tient à ce que « ces fossiles sont toujours généralement les mêmes dans les couches correspondantes, et présentent d'un système de couches à un autre système, des différences d'espèces assez notables. C'est un signe de reconnaissance qui jusqu'à présent ne nous a pas trompés » (p. 19).

Dix ans plus tard, Alexandre Brongniart (1770-1847) allait définir ce qu'il appela les « caractères zoologiques des formations » dans un article publié aux *Annales des Mines* (t. 6, 1821). Il y affirmait : « Je regarde [...] les caractères d'époque de formation tirés de l'analogie des corps organisés, comme de première valeur en géognosie et comme devant l'emporter sur

toutes les autres différences, quelque grandes qu'elles paraissent » (p. 543).

En 1831, Gérard-Paul Deshayes (1795-1875) qui étudiait les coquilles fossiles des terrains tertiaires de l'Europe, eut l'idée de diviser ces terrains en « trois grandes époques zoologiques parfaitement distinctes par l'ensemble des espèces qui sont dans chacune d'elles, et par les proportions constantes entre le nombre des espèces analogues vivantes et celles qui sont perdues » (*Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 1, p. 186). Ses travaux permirent bientôt à Lyell de diviser le Tertiaire en Éocène, Miocène et Pliocène (*Principles of Geology*, vol. 3).

C'est sur ces bases qu'Alcide d'Orbigny (1802-1857) a fondé la stratigraphie moderne en créant de nombreux étages (dix, dont huit sont encore usités, pour le Jurassique et sept, dont cinq toujours valides, pour le Crétacé, sans oublier le Stampien). Il a exposé ses conceptions dans son *Cours élémentaire de Paléontologie et de Géologie stratigraphiques* (1849-1852). Elles traduisent un catastrophisme à répétition, dans le droit fil des idées de Cuvier : « Une première création s'est montrée avec l'étage silurien. Après l'anéantissement de celle-ci, par une cause géologique quelconque, après un laps de temps considérable, une seconde création a eu lieu dans l'étage devonien ; et successivement vingt-sept fois des créations distinctes sont venues repeupler toute la terre de ses plantes et de ses animaux, à la suite de chaque perturbation géologique qui avait tout détruit dans la nature vivante » (II, 1, p. 251). Cette interprétation repose sur le fait que, d'après lui, « on trouve toujours (à peu d'exceptions près) que dans les dernières couches de l'étage inférieur s'arrête la faune de cet étage ; que là, elle s'est complètement anéantie : car les premières couches fossilifères de l'étage qui le recouvre renferment, de suite, des êtres très-différents des premiers et constituant une faune distincte de la faune de l'autre étage » (*ibid.*, p. 252). En conséquence, « chacun des étages qui se sont succédé dans les âges du monde renferme sa faune spéciale » (*ibid.*).

Quatre ans plus tard, Albert Oppel (1831-1865) mit en œuvre dans *Die Juraformation Englands, Frankreichs und des südwestlichen Deutschlands* (1856-1858) des conceptions voisines de celles d'Alcide d'Orbigny pour subdiviser les dix étages jurassiques de ce dernier en une trentaine de « zones » stratigraphiques caractérisées chacune par une espèce fossile, choisie le plus souvent parmi les Ammonites.

Les fossiles et l'évolution

Il est surprenant de constater que les fossiles jouèrent un rôle négligeable dans la naissance du Transformisme. En effet, ni Lamarck, ni Darwin ne leur accordèrent d'importance dans les textes fondateurs que constitue la *Philosophie zoologique* (1809) et l'*Origine des Espèces* (1859). Toutefois, la découverte du premier squelette d'*Archaeopteryx*, décrit par Richard Owen (1804-1892), allait donner à Thomas

Huxley (1825-1895) l'occasion de souligner en 1868 que ce fossile représente une « approximation du "chaînon manquant" entre reptiles et oiseaux ». Pour sa part, Albert Gaudry (1827-1908) se disait convaincu dans les *Animaux fossiles et Géologie de l'Attique* (1862-1867) que « peu à peu les découvertes conduisent à adopter la théorie de la filiation des espèces ; nous tendons vers elle, comme vers la source où nous démêlerons le pourquoi de tant de ressemblances que nous apercevons entre les figures des vieux habitants de la terre » (p. 368). Cette conviction le conduisit à proposer les premiers arbres phylétiques destinés à retracer l'histoire évolutive des chevaux et des éléphants.

Plus près de nous, George Gaylord Simpson (1902-1984) contribua à intégrer les fossiles dans la théorie transformiste en jouant un rôle majeur dans la tentative de « Nouvelle synthèse » néodarwinienne, notamment avec *Tempo and Mode in Evolution* (1944). Fortement influencé par les études statistiques de génétique des populations, il y traite les fossiles essentiellement sous un angle statistique, afin de définir indices morphologiques, pourcentages de présence/absence de caractères, taux d'évolution ou de survivance, coefficients de variation, etc. Simpson étudie alors les modalités de l'évolution : « différenciation spécifique », « évolution phylétique » régissant la transformation des caractères au sein des lignées évolutives, et « évolution quantique », responsable de l'apparition d'unités systématiques nouvelles, quelle qu'en soit la taille. Son idée dominante est que l'évolution est un processus graduel, un point de vue auquel Niles Eldredge et Stephen J. Gould opposèrent en 1972 la théorie des « équilibres intermittents » (« punctuated equilibria ») selon laquelle l'évolution se produit sous l'action de brutales ruptures d'équilibre venant interrompre de longues périodes de stase.

► ACCORDI B., *Storia della Geologia*, Bologne, Zanichelli, 1984. — ADAMS F.D., *The birth and development of the geological sciences*, nouv. éd., New York, Dover publ., 1954 (1^{re} éd., 1938). — ARCHIAC A. D', « Précis de l'histoire de la Paléontologie stratigraphique », *Cours de Paléontologie stratigraphique*, t. 1, Paris, F. Savy, 1862. — BROCCHI G.B., « Discorso sui progressi dello studio della conchiologia fossile in Italia », *Conchiologia fossile subappennina con osservazioni geologiche sugli Apennini e sul suolo adiacente*, Milan, Stamperia reale, 1814. — BUFFETAUT E., *Histoire de la Paléontologie*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1998. — DUHEM P., *Le système du monde — Histoire des doctrines cosmologiques de Platon à Copernic*, vol. IX., rééd., Paris, Hermann, 1959. — EDWARDS W.N., *The Early history of Palaeontology*, Londres, British Museum (Natural History), 1967. — ELLENBERGER F., *Histoire de la Géologie*, t. 1 : *Des Anciens à la première moitié du XVII^e siècle*, Paris, Technique et Documentation — Lavoisier, 1988 ; *Histoire de la Géologie*, t. 2 : *La grande éclipse et ses prémices 1660-1810*, Paris, Technique et Documentation — Lavoisier, 1994. — GOHAU G., *Les sciences de la Terre aux XVII^e et XVIII^e siècles — La naissance de la Géologie*, Paris, Albin Michel, 1990. — HÖLDER H., *Geologie und Paläontologie in Texten und ihrer Geschichte*, Munich, Karl Alber, 1960 ; *Kurze Geschichte der Geologie und Paläontologie*, Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1989. — MORELLO N., *La nascita della*

paleontologia nel seicento, Milan, Franco Angeli Ed., 1979. — RUDWICK M.J.S., *The meaning of fossils — Episodes in the History of Palaeontology*, éd. rév., New York, Neale Watson Acad. Publ., Inc., 1976. — WALCH J.E.E., « L'histoire de la connaissance des pétrifications », in KNORR G.W. & WALCH J.E.E., *Recueil des monuments des Catastrophes que le Globe terrestre a éprouvées etc.*, trad. fr., Nuremberg, 1773. — ZITTEL K.A. VON, *Geschichte der Geologie und Paläontologie bis Ende des 19. Jahrhunderts*, Munich/Leipzig, R. Oldenbourg, 1899.

Jean GAUDANT

→ Anatomie comparée ; Buffon ; Catastrophisme ; Gaudry ; Lamarckisme ; Stratigraphie.

FOUCAULT Michel, 1926-1984

Il enseigne dans les universités de Clermont-Ferrand, Tunis puis Vincennes avant d'être élu en 1970 au Collège de France à la chaire d'histoire des systèmes de pensée qu'il occupera jusqu'à sa mort.

Michel Foucault ne s'est jamais voulu ni historien des sciences, ni épistémologue, ni philosophe des sciences. Il a même expressément récusé ces étiquettes. Son œuvre néanmoins, par ses ascendances comme par certains de ses aspects, se rattache à la tradition de pensée qu'on a désignée comme « épistémologie française » ou « épistémologie historique ». Foucault s'est en effet toujours reconnu comme maître le philosophe et médecin Georges Canguilhem dans la collection duquel il a publié l'un de ses livres les plus importants (*La naissance de la clinique*, 1963). Son intérêt constant pour les questions de normes, normalité et normalisation, s'inscrit dans la lignée des analyses menées par Canguilhem dans *Le normal et le pathologique*.

Par ailleurs, *L'archéologie du savoir*, ouvrage publié en 1969, présente une réflexion méthodologique sur la démarche qu'il avait mise en œuvre dans ses précédents ouvrages : *Histoire de la folie à l'âge classique* (1961), *Naissance de la clinique* (1963) et *Les mots et les choses* (1966).

La démarche intellectuelle que Foucault désigne comme « archéologie » indique un rapport polémique à l'encontre des conceptions dominantes de l'histoire. L'archéologie vise à montrer comment les objets tels qu'ils paraissent offerts à l'investigation sont en réalité constitués par les règles qui commandent des pratiques discursives historiquement déterminées. Foucault s'attache à faire apparaître de tels *a priori* historiques.

De là une conception discontinuiste de l'histoire qui vaut évidemment aussi pour l'histoire des sciences : « Ainsi sont apparues à la place de la chronologie continue de la raison, qu'on faisait remonter à l'inaccessible origine, à son ouverture fondatrice, des échelles parfois brèves, distinctes les unes des autres, rebelles à une loi unique, porteuse souvent d'un type historique qui est propre à chacune, et irréductibles au modèle général d'une conscience qui acquiert, progresse et se souvient. »

Cette conception a été parfois rapprochée de la conception discontinuiste de l'histoire du savoir défendue par Thomas Kuhn dans *La structure des révolutions scientifiques* (1962), mais le propos de Foucault ne se situe pas au niveau de la seule succession des théories scientifiques et des critères de scientificité. L'archéologie, histoire des énoncés, enregistre plus fondamentalement les ruptures qui interviennent dans la perception et la conception des objets.

● *Maladie mentale et psychologie*, Paris, PUF, 1954. — *Histoire de la folie à l'âge classique*, Paris, Plon, 1961. — *Naissance de la clinique*, Paris, PUF, 1963. — *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966. — *L'archéologie du savoir*, Paris, Gallimard, 1969. — *Surveiller et punir. Naissance de la prison*, Paris, Gallimard, 1975. — *Histoire de la sexualité*, I : *La volonté de savoir*, II : *L'usage des plaisirs*, III : *Le souci de soi*, Paris, Gallimard, 1976-1984. — *Dits et écrits, 1954-1988*, Paris, Gallimard, 4 vol., 1994.

► DELEUZE G., *Foucault*, Paris, Minuit, 1986. — Coll. : *Le débat*, « Michel Foucault », n° 41, Paris, Gallimard, sept./nov. 1986 ; *Critique*, « Michel Foucault du monde entier », 471-472, août/sept. 1986. — *Michel Foucault, rencontre internationale* (Paris les 9, 10, 11 janvier 1988), Paris, Le Seuil, 1989. — FOUCAULT M., *Les Anormaux. Cours au Collège de France*, Paris, Le Seuil, 1999. — *Le Pouvoir psychiatrique : Cours au Collège de France, 1973-1974*, Paris, Le Seuil, 2003 ; *L'Herméneutique du sujet : Cours au Collège de France (1981-1982)*, Paris, Le Seuil, 2003. — *Le Courage de la vérité*, sous la direction de Gros F., Paris, PUF, 2002 ; *Foucault au collège de France : un itinéraire*, sous la direction de J. Terrel et G. Le Blanc, Bordeaux, Presses Universitaires de Bordeaux, 2003.

Dominique LECOURT

→ Canguilhem ; Continuité ; Épistémologie ; Kuhn ; Paradigme ; Rupture.

FOURIER Joseph, 1768-1830

Mathématicien et physicien français. Issu d'une famille modeste d'Auxerre, Fourier, dont les premiers travaux mathématiques portent sur la théorie algébrique des équations, devient assistant de Lagrange à l'École polytechnique, à sa fondation en 1795. Choisi en 1798 pour accompagner le corps expéditionnaire français en Égypte (il rédigera en 1809 la préface historique de la *Description de l'Égypte*), il est ensuite nommé préfet de l'Isère (1801), et devra, jusqu'en 1815, associer ses recherches théoriques à une importante activité administrative. C'est durant cette période qu'il édifie sa théorie de la propagation de la chaleur, pièce centrale de la mécanique rationnelle après Newton : d'abord dans un mémoire de 1807 à l'Académie des sciences, dont une version révisée et étendue sera couronnée d'un prix, ensuite dans son grand œuvre de 1822, *Théorie analytique de la chaleur*. Il s'agit d'une analyse physico-mathématique de la diffusion de la chaleur entre des masses disjointes et dans des corps continus. Le problème physique y est formulé comme recherche des valeurs frontières d'une équation linéaire aux dérivées partielles. La distribution initiale de

température dans certains des corps s'exprime par les séries dites maintenant « de Fourier », source (avec l'intégrale du même nom) d'une longue et riche descendance mathématique. La Restauration laissera Fourier devenir, en 1815, directeur du Bureau des statistiques du département de la Seine, en 1817, membre de l'Académie des sciences (il en sera, à partir de 1822, le secrétaire perpétuel), en 1827, membre de l'Académie française.

● *Œuvres*, Paris, Gauthier-Villars, 1888-1889. — *Mémoire sur la théorie de la chaleur*, Bull. des Sc. pour la Sté Philomath., 1, 1807. — *Théorie analytique de la chaleur*, Paris, Firmin-Didot, 1822 ; rééd. Paris, J. Gabay, 1988.

► BACHELARD G., *Étude sur l'évolution d'un problème de physique*, Paris, Vrin, 1928, rééd., 1973. — GRATAN-GUINNESS I., *Joseph Fourier 1768-1830*, Cambridge/Londres, MIT Press, 1972.

Alain MICHEL

→ Analyse fonctionnelle ; Analyse harmonique.

FREGE Gottlob, 1848-1925

Mathématicien et philosophe allemand, ayant enseigné à l'université de Léna dans la seconde moitié du XIX^e s. Il a construit en 1879 une écriture conceptuelle (*Begriffsschrift*), dégagée de l'emprise des mots du langage ordinaire, afin de matérialiser les deux hypothèses suivantes : 1) l'arithmétique est de part en part logique ; 2) l'induction mathématique ne suppose aucune intuition. La première hypothèse dite logiciste tombe sous le coup du paradoxe des ensembles tel que B. Russell l'a formulé dans une lettre adressée à Frege en 1902. Ayant entretenu une correspondance suivie avec Hilbert, Husserl, Russell, Frege s'est toujours distingué par des thèses réalistes fondées sur l'existence d'objets logiques. Son texte de 1884, *Les fondements de l'arithmétique*, est une critique du psychologisme des mathématiciens qui, par manque de rigueur, donnent une définition confuse du nombre où l'unité est tantôt considérée comme un concept, tantôt comme le nombre un qui succède à zéro dans la suite des nombres entiers. Dans la deuxième partie de cet ouvrage, Frege définit le nombre comme l'extension d'un concept ; se démarquant à la fois des algébristes comme Schröder et des philosophes empiristes comme Mill. Dans *Les lois fondamentales de l'arithmétique* de 1893 (t. I) et 1903 (t. II), il s'oppose aux formalistes qui réduisent l'arithmétique à un jeu sur les signes et réitère son logicisme en imposant une nécessaire référence aux signes mathématiques. De nombreux textes posthumes reviennent sur ses thèses principales dans un but plus didactique.

● *Begriffsschrift, eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*, Halle, L. Nebert, 1879 ; rééd., I. Angelelli, *Begriffsschrift und andere Aufsätze*, Hildesheim, Olms Verlag, 1977 et 1993 (trad. angl., in VAN HEIJENOORT J., *From Frege to Gödel*, Harvard Univ. Press, Cambridge (Mass.)/Londres, 1967). — *Die Grundlagen der Arithmetik. Eine*

logisch-mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl, Breslau, W. Koebner, 1884; rééd., C. Thiel, F. Meiner Verlag Hamburg, 1988 (trad. fr. C. Imbert, *Les fondements de l'arithmétique*, Paris, Le Seuil, 1969). – *Grundgesetze der Arithmetik, Begriffsschrift abgeleitet*, vol. 1, Iéna, H. Pohle, 1893; rééd. avec le vol. 2, 1903, Hildesheim, G. Olms Verlag, 1962. – *Kleine Schriften*, herausgegeben und mit nachbemerkungen zur Neuauflage versehen von Ignacio Angelelli, G. Olms Verlag, 1967 (2^e éd., 1990). – *Nachgelassene Schriften*, éd. H. Hermes, F. Kambartel, F. Kaulbach, F. Meiner, Hamburg, 1970. – *Wissenschaftlicher Briefwechsel*, éd. G. Gabriel, H. Hermes, F. Kambartel, C. Thiel, A. Veraart, F. Meiner, Hamburg, 1976.

► BENMAKHOLOU A., *Gottlob Frege, logicien philosophe*, Paris, PUF, 1997. – DEMOPOULOS W. dir., *Frege's philosophy of mathematics*, Londres, Harvard Univ. Press, 1995. – DUMMETT M., *Frege philosophy of language* (2^e éd. 1981),

Londres, Duckworth, 1973; *The interpretation of Frege's philosophy*, Londres, Duckworth, 1981; *Frege and other philosophers*, New York, Oxford Clarendon Press, 1991; *Frege Philosophy of mathematics*, Londres, Duckworth, 1991. – HAAPARANTA L. & HINTIKKA J. dir., *Frege synthesized*, Pays-Bas, D. Reidel Publ. Co, vol. 181, 1986. – LARGEAULT J., *Logique et philosophie chez Frege*, Paris/Louvain, Nauwelaerts, 1970. – MARION M. & VOIZARD A., *Frege logique et philosophie*, Paris, Harmattan, 1998. – ROUILHAN P. DE, *Frege les paradoxes de la représentation*, Propositions, Paris, Minuit, 1988.

Ali BENMAKHOLOU

→ Abstraction; Axiomatisation et formalisation; Cercle de Vienne; Démonstration; Dummett; Formalisme; Langages formels; Logicisme; Logique et informatique; Monisme; Platonisme; Proposition.

GALILÉE, 1564-1642

Galilée est devenu une figure mythique, fondatrice de la modernité. De fait cet « ingénieur », très tôt passionné par les mathématiques, œuvra surtout dans deux domaines qui paraissent séparés : l'astronomie et la physique. En 1610, le *Sidereus Nuncius* décrit les observations sans précédent permises par son invention de la lunette astronomique : la Lune a des montagnes, Jupiter des satellites, le Soleil des taches : la thèse de Copernic est donc justifiée ; en 1632, le *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* le démontre. L'ouvrage est déféré à l'Inquisition et Galilée condamné à abjurer. Il entreprit alors de construire une science géométrisée du mouvement des graves : les *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638) reprennent les affirmations du *Dialogo* sur la chute des graves dans le vide, l'idée d'un mouvement inertiel et démontrent notamment la loi du mouvement parabolique des projectiles et l'isochronisme des petites variations du pendule. Toutes ces découvertes sont le produit d'une remise en cause des formes de rationalité héritées du passé. Galilée fut *Il Saggiatore*, « l'essayeur » qui pensa mathématiquement l'unité des mondes céleste et terrestre : en faisant rouler des billes sur un plan incliné ou en observant les phases de Vénus il montra que le sublunaire et le supralunaire sont soumis aux mêmes principes. Le monde est un, la création est d'essence mathématique, le compliqué sensible peut être ramené à une somme d'éléments simples de nature géométrique. Du coup, la science n'est plus descriptive mais explicative : « La philosophie est écrite dans ce vaste livre qui constamment se tient ouvert devant nos yeux (je veux dire l'Univers), et on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit or il est écrit en langue mathématique », *Il Saggiatore*, 1632.

● L'édition de référence regroupant œuvres et manuscrits est celle d'Antonio Favaro : *Le opere di Galileo Galilei*, Florence, 20 vol., 1890-1909 ; rééd. avec ajouts, 1965. – Principales trad. fr. : *Le Mécanique* (1594-1595), trad. libre Mersenne, *Les mécaniques de Galilée*, 1634. – *Sidereus Nuncius* (1610), trad. Pantin, *Le messager céleste*, Paris, Les Belles Lettres ; trad. Hallyn, *Le messager des étoiles*, Paris, Le Seuil, 1992. – *Il Saggiatore* (1623), trad. Chauvire, *L'essayeur*, Paris, Les Belles Lettres, 1980. – *Dialogo...* (1632), trad. Frereux & Gandt,

G

Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, Paris, Le Seuil, 1992. – *Discorsi...* (1638), trad. libre Mersenne, *Nouvelles pensées de Galilée*, 1638 ; trad. Clavelin, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, Paris, A. Colin, 1970.

► CANGUILHEM G., « Galilée, la signification de l'œuvre et la leçon de l'homme » (1964), in *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1968. – CLAVELIN M., *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris, A. Colin, 1968. – DRAKE S., *Galileo studies*, Univ. of Michigan Press, 1970. – DUHEM P., *Essai sur la théorie physique de Platon à Galilée*, Paris, 1908. – FAVARO G., *Bibliografia Galileiana di A. Favaro*, Venise, 1942. – FEYERABEND P., *Against Method*, New Jersey, Humanities Press, 1975. – GEYMONAT L., *Galileo Galilei*, Milan, 1957. – KOYRÉ A., *Études Galiléennes*, Paris, Hermann, 1939. – REDONDI P., *Galilée hérétique*, trad. fr., Paris, Gallimard, 1985. – SHEA W., *La révolution galiléenne*, trad. fr., Paris, Le Seuil, 1992.

François REMOISENET

→ Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Expérience ; Force ; Héliocentrisme ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Maîtrise de l'erreur ; Marées ; Mouvement ; Technique ; Temps ; Terre.

GAUDRY Albert Jean, 1827-1908

Géologue de formation, A.J. Gaudry, né à Saint-Germain-en-Laye en 1827, allait consacrer sa vie à la paléontologie. D'abord aide-naturaliste de son beau-frère Alcide d'Orbigny, il s'éloigne périodiquement du Muséum pour des campagnes de fouilles à Pikermi, en Grèce, sur le site qu'il a découvert en 1854. En 1872 il est nommé professeur de paléontologie au Muséum, chaire qu'il occupera pendant trente ans. À sa mort, en 1908, Gaudry était reconnu comme le maître de la paléontologie évolutive.

Les convictions transformistes de Gaudry sont antérieures à la publication de *L'Origine des Espèces*, qu'il lira avec admiration. De 1862 à 1867, Gaudry publia les résultats de ses fouilles dans *Animaux fossiles et géologie de l'Attique*. Son propos, assurait-il aux membres de l'Académie des sciences, était de « prouver que la comparaison des mammifères de Pikermi avec les autres mammifères vivants et fossiles tend à rendre probable la théorie de la transformation des espèces » (*C.R. Acad. Sc.*, t. 66, 1868, p. 103). Darwin utilisera ces travaux dans les rééditions de

L'Origine des Espèces et ne cessera d'encourager Gaudry.

Demeuré profondément spiritualiste, Gaudry n'accepta cependant jamais d'expliquer la modification graduelle des espèces par la sélection naturelle de petites variations aléatoires. Il pensait que « l'artiste qui pétrissait était le Créateur lui-même » (*Revue des cours scientifiques*, 1865-1866, p. 80). L'*Essai de paléontologie philosophique*, publié en 1896, présente une synthèse de ses travaux et de ses idées.

► CONRY Y., *L'introduction du darwinisme en France*, Paris, Vrin, 1974. — DE RICQLES A., « De la paléontologie évolutionniste à la paléontologie phylogénétique : avatars et permanence du darwinisme », in TORT P. dir., *Pour Darwin*, Paris, PUF, 1997. — JANVIER P., « Les fossiles et l'évolution », in TORT P. dir., *Pour Darwin*, Paris, PUF, 1997. — LAURENT G., « Gaudry », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996.

Jean Paul THOMAS

→ Catastrophisme ; Darwinisme ; Fossile ; Stratigraphie.

GAUSS Carl Friedrich, 1777-1855

Mathématicien, astronome et physicien allemand. Génie précoce dans une famille sans ressources, Gauss put se consacrer à la recherche mathématique dès l'âge de 14 ans grâce à une pension du duc de Brunswick. À 18 ans il obtient un résultat majeur : l'impossibilité de construire à la règle et au compas certains polygones réguliers, tel celui à 17 côtés. En 1807, il est nommé directeur de l'Observatoire de Göttingen, qu'il ne devait plus quitter jusqu'à sa mort, à l'âge de 78 ans. Unanimentement reconnu et respecté comme *princeps mathematicorum*, il incarne, à la charnière des XVIII^e et XIX^e s., la science mathématique dans son universalité et son unité. Son œuvre, dont une faible partie seulement a été publiée de son temps, couvre la quasi-totalité des domaines : arithmétique, géométrie, algèbre, analyse, probabilités et statistiques, et, en physique, abordée d'un point de vue mathématique, géométrie, astronomie, magnétisme. L'exigence de rigueur et la généralité du point de vue y renouvellent partout les méthodes, jusqu'à annoncer le traitement abstrait des modernes, mais l'inspiration la plus profonde vient de l'arithmétique, de la pratique du calcul, de l'expérimentation sur les nombres : le théoricien rigoureux pense numériquement et algébriquement. Dans les *Disquisitiones arithmeticae* de 1801, Gauss introduit la notion de loi de composition entre des objets qui ne sont plus nécessairement des nombres, et raisonne implicitement sur des classes d'entiers plutôt que sur les entiers mêmes. D'autre part, sa correspondance le montre très tôt convaincu de la possibilité de construire des systèmes de géométrie différents de celui d'Euclide, et de la validité de l'idée de géométrie intrinsèque d'une surface, indépendamment de toute immersion dans l'espace ambiant.

● *Werke*, Göttingen, 12 vol., 1870-1929 (1^{re} éd. des vol. I-VII, 1863-1871). — *Recherches arithmétiques*, trad. fr. A.C.M. Pouillet-Delisle, Paris, 1807 (rééd. J. Gabay, 1989). — *Théorie du mouvement des corps célestes*, trad. fr. E. Dubois & A. Bertrand, Paris, 1864. — *Recherches générales sur les surfaces courbes*, trad. fr. et notes E. Roger, Grenoble, 1865 (rééd. A. Blanchard, Paris, 1967).

Alain MICHEL

→ Espace ; Extension ; Groupes et symétrie ; Local et global ; Maîtrise de l'erreur.

GAZ

CHIMIE

Les rapports complexes historiquement noués entre l'observation, la description phénoménale des objets chimiques, l'interprétation théorique des phénomènes et les termes utilisés pour désigner les objets sont une des caractéristiques essentielles de l'évolution conceptuelle de la chimie à l'époque moderne. Longtemps il n'y a pas eu de liens définis entre les techniques de production des « éléments lourds », les théories relatives à la composition chimique et la nomenclature ; les chimistes ne pouvaient qu'avancer des spéculations ou des hypothèses menant à des classifications erronées sur la composition des substances que les artisans, les maîtres ouvriers et les hommes de l'art réussissaient à obtenir. Dans le cas de la chimie, l'établissement d'une relation organique entre théorie et mise en pratique, observations et nomenclature, fut une conquête de la modernité.

Il fallait en passer par ces remarques préliminaires pour comprendre les vicissitudes historiques du terme « gaz », particulièrement embrouillées et qui expliquent en grande partie le difficile rapport que le langage de la chimie entretient avec les objets de cette discipline.

L'invention du « gaz »

Bien qu'il soit difficile de préciser avec certitude quelle est au juste la racine philologique du mot « gaz », il n'est pas douteux que le terme doit beaucoup à la tradition hermétique de la philosophie de la chimie. Les écrits de Paracelse (~ 1493-1541) contiennent d'innombrables références aux « esprits », et dans l'ouvrage intitulé *Das Buch von den Tartarischen Krankheiten* le médecin suisse décrit une fermentation appelée *vergesen* en utilisant le terme *gest* pour désigner une écume en ébullition à partir de laquelle se forment les roches, produits de l'eau élémentaire. Pour Paracelse, en effet, les esprits élémentaires (dont une catégorie, les esprits aériens sont qualifiés de « sylvestres ») et l'étude des vapeurs de la fermentation, des effluves et des bouillonnements, représentent des aspects différents, mais corrélés, d'une conception hermétique, vitaliste, du cosmos, de la nature et de l'être humain.

Partisan convaincu de cette conception, le médecin

belge Jan Baptist van Helmont (1579-1644) qui a imaginé le terme « gas » rattachait ce dernier aux « chaos des Anciens ». Au vrai, « chaos » est très vraisemblablement la matrice du vocable introduit par Van Helmont. Dans plusieurs de ses traités réunis en un volume (*l'Ortus Medicinae*, publié après sa mort, en 1648), il affirme avoir observé, au cours d'expériences de combustion réalisées dans des récipients clos, une fumée légère de nature volatile jusqu'alors inconnue, bien différente de la vapeur d'eau et digne de recevoir un nom nouveau : *gas*. Il l'appelle également *spiritus sylvestris* pour indiquer sa force et les difficultés expérimentales que pose sa réduction à la forme solide. On trouve dans *l'Ortus* un traité intitulé *Gas Aquae*, où non seulement Van Helmont revendique la nouveauté de sa découverte (les Anciens ne connaissaient pas le Gas), mais où il précise en outre les différences qui la distinguent de la vapeur d'eau ou des émanations étudiées par les Anciens.

Malgré les nombreuses observations d'ordre expérimental relatives aux « gas » que comporte l'œuvre du médecin belge, il serait historiquement erroné d'admettre qu'il existe une continuité conceptuelle entre *l'Ortus Medicinae* et la pneumatique : le mot gaz a certes été repris et réutilisé au XVIII^e s., mais avec un contenu conceptuel et un statut épistémologique radicalement modifiés. Opérée en fonction de l'histoire de la pneumatique moderne, l'analyse du terme créé par Van Helmont échoue à en saisir le sens premier, qui n'apparaît qu'à la lumière de la philosophie et de la cosmologie du médecin belge.

Dans la philosophie naturelle de Van Helmont, très riche en référents métaphysiques, le « gas » remplissait des fonctions innombrables. Il n'était pas dans le corps, bien qu'il fût le corps sous une forme différente de son état solide primordial : il s'agissait en fait d'eau (la matrice de toute chose, selon Van Helmont), contenant une semence particulière. Que cette semence se dissipe, et le « gas » disparaissait, se retransformait en eau élémentaire. Ce pourquoi Van Helmont y voyait le vecteur de la spécificité des objets pris un à un, de leur programme vital essentiel. Si l'eau et l'air étaient des éléments communs à toutes les choses, le « gas » qui conférerait leur spécificité aux choses servait de pont entre la matière et l'esprit séminal. Les transformations chimiques s'assimilant, pour Van Helmont, à des transmutations, tout dégagement de « gas » était le signe qu'un corps allait se transmuter en sa substance essentielle.

« Gas » était donc un terme jusque-là inédit, utilisé à propos de fonctions naturelles définies dans le cadre d'une métaphysique de la nature qui s'inspirait essentiellement des Écritures et de la philosophie hermétique de Paracelse. Le mot tirait pourtant son origine de la philosophie chimique de la Renaissance, qui occupe une place relativement importante dans la première révolution scientifique.

Les caractères particuliers que son « découvreur » attribuait au « gas » empêchèrent pendant près d'un siècle que l'emploi du mot se généralise. Dans la

seconde moitié du XVII^e s., les idées de Van Helmont influencèrent Robert Boyle (1627-1691), surtout au cours de sa formation scientifique, mais sans qu'il aille jusqu'à qualifier de « gas » l'air « factice » (« factitious air ») qu'il recueillait et observait à l'occasion de ses expériences. Dans le *Tractatus Quinque Medico-Physici* (publié en 1674), John Mayow (1641-1679) parle quant à lui d'esprit nitro-aérien à propos d'une gamme très étendue de phénomènes (combustion, respiration, fermentation, etc.).

Délaissé par la science expérimentale moderne, le mot « gas » resta cependant en faveur auprès d'un courant bien particulier de la philosophie naturelle qui se revendiquait de Van Helmont. Mais la signification philosophique qui lui était attachée dissuadait les chimistes et les physiiciens d'y recourir lorsque la pneumatique commença à se constituer en discipline. À la fin des années 1770, le terme fut récupéré par P.-J. Macquer dans un sens général ; la plupart des gaz étaient désormais découverts, mais en l'absence d'entente sur la nature de ces corps aussi bien que sur leur dénomination l'initiative de Macquer ne rencontra d'abord aucun succès. L'usage du mot finit toutefois par s'imposer, sous une acception et dans des contextes conceptuels bien différents, une fois seulement, après bien des controverses, que la nouvelle théorie chimique pneumatique eut atteint sa forme achevée.

Chimie de l'air, chimie des airs

Les écoles rivales de la chimie mécaniste – dont les thèses sont exposées dans le *Cours de chimie* (1675) de Nicolas Lémery (1645-1715) – et de la chimie antimécaniste développée à l'instigation de Georg Ernst Stahl (1659-1734) avaient au moins un point en commun puisque, loin de considérer l'air comme une substance chimiquement active, toutes deux y voyaient un instrument de nature physique indispensable aux opérations chimiques. Au début du XVIII^e s., nul ne songeait à contester que l'air serve à autre chose qu'à véhiculer les substances solides et liquides sans pouvoir se combiner avec elles. La découverte de la nature chimique de l'air s'inscrit dans le cadre des polémiques sur la structure constitutive de la matière provoquées par les spéculations de Newton sur l'attraction et la répulsion des particules.

C'est surtout pour rendre compte de l'élasticité de l'air que Newton avait introduit le concept de force répulsive : il devenait ainsi possible d'expliquer les différences entre substances par l'intensité des forces d'attraction et de répulsion. Les premiers partisans de Newton ne s'attachèrent pas outre mesure à ce terme, occupés qu'ils étaient à essayer de formuler une théorie achevée de la matière en s'appuyant exclusivement sur les lois de l'attraction. Le problème de l'élasticité de l'air restait cependant entier ; en 1709, John Freind (1675-1728) posa que l'élasticité représente une propriété essentielle des particules aériennes (ce qui revenait à dire que l'air est une forme particulière de la

matière, distincte de la forme habituelle), alors que la seule différence établie par Newton entre l'air et la matière était d'ordre quantitatif et non qualitatif (les atomes de la matière fixe pouvant aussi entrer dans la composition de l'air élastique).

En travaillant sur ces problèmes, l'Anglais Stephen Hales (1677-1761) allait découvrir la nature chimique de l'air et confirmer ainsi l'hypothèse de Newton sur la capacité de l'air à passer d'un état élastique à un état fixe, et réciproquement. En 1727, Hales publia un traité intitulé *Vegetable Statics (La Statique des végétaux)* où il décrivait les diverses expériences qui lui avaient permis d'observer l'air dégagé par la fermentation, la distillation et l'action de réactifs sur un certain nombre de substances organiques et inorganiques. Il en arrivait à la conclusion que l'air pouvait s'unir avec des solides, se fixer dans les corps, et qu'une fois évacué par ces derniers il retrouvait toutes les propriétés des fluides élastiques. Hales avait de fait libéré de nombreux gaz, mais sans établir de distinction entre eux : tout en observant que maintes substances solides recevaient un élément aériforme, il se contentait de noter la présence d'air fixe dans les corps.

Bientôt diffusée dans l'Europe entière, l'œuvre de Hales y connut des destins différents. La découverte de l'activité de l'air entraîna les chimistes français à réviser les théories de Stahl et à considérer d'un œil neuf les éléments aristotéliens, et si elle laissa les Allemands de marbre, elle convainquit les Britanniques de s'intéresser à l'air fixe, ouvrant ainsi à la recherche un domaine encore inexploré qui allait aboutir à la découverte des airs, ou gaz. Il faut donc signaler qu'à l'exception notable des travaux menés en Suède par C.W. Scheele, c'est en Grande-Bretagne que furent effectuées les premières découvertes sur les gaz, même si elles ont au demeurant bénéficié de différents contextes culturels et institutionnels.

Le médecin écossais Joseph Black (1728-1799) s'intéressait à l'efficacité thérapeutique de la magnésie blanche (le carbonate de magnésium) lorsque, entre 1754 et 1755, il découvrit un air fixe particulier (le CO₂), qui présentait d'autres caractéristiques que l'air ordinaire et permettait d'expliquer les différences entre carbonates et oxydes. Bien qu'il lui ait appliqué le terme générique d'air fixé (*fixed air*) forgé par Hales, Black savait pertinemment qu'il s'agissait d'une substance aérienne particulière. Dans un premier temps, sa découverte servit surtout à des usages médicaux et pharmaceutiques : David MacBride (1726-1778), William Brownrigg (1711-1800), qui attira l'attention sur les constituants aériformes des eaux minérales pétillantes, Daniel Rutherford (1749-1819), qui en 1772 découvrit un air méphitique (l'azote), s'en tinrent scrupuleusement au rôle thérapeutique de l'air fixe. En 1766, Henry Cavendish (1731-1810), chimiste, physicien (il travaillait notamment sur l'électricité) et philosophe à ses heures, précisa les caractéristiques chimiques de l'air fixe de Black et annonça qu'il venait de découvrir un air inflammable (l'hydrogène).

Il faut toujours garder à l'esprit que la chimie

pneumatique est née du croisement de disciplines très différentes, ce qui explique entre autres que son histoire soit une longue suite de polémiques qui se répondent les unes aux autres. L'apparition d'un domaine nouveau – la chimie des airs – poussa les médecins, les pharmaciens, les physiciens, les « chimistes », les philosophes de la nature, les minéralogistes à se rencontrer et à confronter les perspectives sous lesquelles ils envisageaient ces objets neufs : les airs, autrement dit les gaz.

La découverte de Black se propagea discrètement au continent, en Allemagne en particulier où elle s'attira la féroce opposition du pharmacien Johann Friedrich Meyer (1705-1765) qui dans un traité intitulé *Chymische Versuche* (1764) réfute l'existence de l'air fixe (objet chimique anormal, inédit, imprévu) en lui opposant un principe chimique qualitatif traditionnel, l'*acidum pingue*. Les idées de Meyer s'imposèrent de façon remarquable dans les États allemands où la plupart des médecins, des pharmaciens et des minéralogistes qui s'occupaient de chimie avaient été formés aux conceptions de Stahl. Divers auteurs proposèrent d'opposer l'air fixe à l'*acidum pingue*, relançant ainsi les recherches et les débats souvent animés qui agitaient les milieux scientifiques européens. À la suite de Meyer, le Suédois Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) entreprit de jeter les bases d'une définition du feu et du phlogistique qui s'écarterait des thèses de Stahl puisqu'elle privilégiait le rôle chimique de l'air, ce qui lui permit d'effectuer une extraordinaire série de découvertes sur les airs et les acides.

En Grande-Bretagne, comprenant que les recherches expérimentales relatives aux airs pouvaient utilement conforter sa conception moniste et optimiste de l'être et de la divinité, le théologien et philosophe anglais Joseph Priestley (1733-1804) aboutit à des résultats importants. En peu de temps, le catalogue des airs identifiés et particularisés s'enrichit de façon surprenante. En France comme dans les États italiens, des médecins et des pharmaciens se mirent à partir des années 1770 à travailler sur les airs et, en 1772, Antoine-Laurent Lavoisier (1743-1794) parvint au terme de la première série d'expériences décisives en chimie pneumatique.

Au début des années 1770, la chimie des airs suscitait dans l'Europe entière une profusion de travaux, de découvertes, de discussions à la faveur desquels la « chimie » allait peu à peu occuper une place essentielle dans le panorama scientifique de l'époque. Comprenant qu'il était nécessaire de dresser une sorte de tableau général de la nouvelle discipline afin de préciser tant ses antécédents historiques que les recherches qu'elle suscitait, Lavoisier consacra la première partie de ses *Opuscules physiques et chimiques* (1774) à retracer et illustrer l'histoire de la pneumatique. Il la fait remonter à l'« esprit sylvestre » (ou « sauvage ») de Paracelse et au « Gas » de Van Helmont, mettant l'accent sur le dernier de ces deux concepts où il voyait un précurseur de la définition contemporaine du fluide élastique, encore appelé air. Bien qu'il eût une connaissance directe des textes de Van Helmont, c'est dans un

sens purement généalogique, et non pas moderne, qu'il effectuait ce rapprochement entre airs et gaz, puisque plusieurs années durant il continua de parler d'« airs » à propos des fluides aériformes, autrement dit des gaz. Dans le dernier quart du XVIII^e s., la chimie des airs constituait un secteur de recherches en plein essor, qui s'était imposé à l'attention de nombreux naturalistes grâce aux travaux menés en parallèle par Priestley, Scheele et Lavoisier sur des thèmes identiques et au surgissement de prises de position antagonistes, dû à l'hétérogénéité des disciplines au sein desquelles ces recherches étaient menées à des fins différentes. Dans les années 1780 deux écoles au moins s'affrontaient : d'un côté celle des Suédois (Scheele, T.O. Bergman), de l'autre celle des Anglais (Priestley). La chimie de l'époque se présentait comme un chœur de voix dissonnantes, résultat de traditions ou de courants de pensée qui tous convergeaient vers ce domaine de recherches disparates unifié par son seul nom.

Les chimistes recouraient aux termes les plus divers pour désigner les diverses substances aériformes, ou fluides élastiques (l'« air fixe » de Black fut aussi baptisé, entre autres, acide aérien et acide crayeux aériforme) : le plus souvent ils utilisaient le mot « air », aussi bien comme un terme récapitulatif général qu'à propos de substances particulières (ainsi parlaient-ils d'air phlogistique, d'air déphlogistique, d'air du feu, etc.). Alors qu'il travaillait à la deuxième édition de son *Dictionnaire de chimie* (publié en 1778), P.-J. Macquer qui avait fait siennes les découvertes sur les airs pensa à exhumer le terme imaginé par Van Helmont et à regrouper l'ensemble des substances aériennes sous le terme général de « gas », en lui accolant un qualificatif pour préciser de quel type d'air il s'agissait. Le mot « Gas » qui figure dans le tome II du *Dictionnaire* est suivi d'un historique où Macquer indique l'avoir retrouvé dans les *Opuscules* de Lavoisier, puis de différentes entrées telles que « Gas ou Air déphlogistique », « Gas méphitique ou Air fixe », « Gas inflammable », « Gas nitreux », « Gas acide marin », et de l'ensemble des anhydrides acides, jusqu'à l'ammoniac baptisé « Gas alkali volatil ».

La proposition de Macquer constituait une précieuse tentative pour surmonter les ambiguïtés inhérentes au mot « air » (d'un point de vue épistémologique, il était fondamental de déterminer si les airs identifiés comme différents étaient des composants de l'air atmosphérique, ou bien de l'air atmosphérique modifié par des substances étrangères) et en finir avec la confusion de la nomenclature traditionnelle encore embrouillée par les découvertes de la chimie pneumatique (à l'époque, l'oxygène était indifféremment appelé air déphlogistique, air pur, air du feu, air éminemment respirable, principe oxygène, etc.). La réintroduction du terme « gas » voulue par Macquer n'eut à vrai dire pas beaucoup de succès (les Anglais ne renoncèrent pas à leurs « airs »), mais désormais, et de plus en plus, la réforme de la nomenclature était à l'ordre du jour, et l'influence croissante de l'école inspirée par Lavoisier favorisa l'adoption terminologique du mot « gaz ».

Les fluides élastiques aériformes, ou gaz

La *Méthode de nomenclature chimique* (1787) de Guyton de Morveau, Lavoisier, Berthollet et Froucroy marque l'avènement d'une nomenclature chimique systématique. Fondée sur la théorie antiphlogistique de Lavoisier, elle imposa par contrecoup l'usage du mot « gaz » à propos de toute substance à l'état aériforme. Ce vocable traduisait en effet un des concepts généraux de la physico-chimie de Lavoisier. Dans son *Traité élémentaire de chimie* (1789), ce dernier précise le sens d'abord prêté au mot « gaz » par la révolution opérée en chimie. Tous les corps qui existent dans la nature, explique-t-il, sont susceptibles de se présenter sous trois états différents, solide, liquide et aériforme, un même corps pouvant passer d'un état à l'autre selon la quantité de calorique qui lui est combinée. La clarification du concept d'état aériforme des corps, la dynamique de la chaleur, autrement dit les combinaisons du calorique dans les corps et son dégagement, sont des préalables scientifiques essentiels pour comprendre le sens à l'origine attribué au mot « gaz » : « Je désignerai dorénavant ces fluides aériformes sous le nom générique de *gaz*, déclare Lavoisier ; & je dirai en conséquence que, dans toute espèce de *gaz*, on doit distinguer le calorique [...] & la substance qui est combinée avec lui & qui forme sa base » (Lavoisier, p. 17). Dans le chapitre IV, consacré à la nomenclature des composants de l'atmosphère, Lavoisier précise qu'en ce qui concerne la classe des fluides aériformes « le nom *gaz* employé par vanhelmont » a été maintenu pour suivre Macquer, et qu'il s'agit là d'« un nom générique, qui désigne le dernier degré de saturation d'une substance quelconque par le calorique ; c'est l'expression d'une manière des corps. Il s'agissait ensuite de spécifier chaque espèce de *gaz*, & nous y sommes parvenus en empruntant un second nom de celui de sa base » (*ibid.*, p. 54). Il s'ensuit que toute substance à l'état aériforme est désormais définie comme un gaz (éther + calorique = gaz éthéré), et qu'au lieu d'oxygène, d'azote, d'hydrogène et d'anhydride carbonique à l'état gazeux il convient dorénavant de parler de « gaz oxygène », « gaz hydrogène », « gaz azotique » et « gaz carbonique ».

Il faut donc se souvenir que si, grâce à Lavoisier, la proposition de Macquer finit par être adoptée, le terme de « gas » à l'origine utilisé par Van Helmont fut transformé en « gaz » pour caractériser un concept très proche de celui, cher à Lavoisier, d'état aériforme des corps.

Le destin du terme *gaz* se confond largement avec celui de la nouvelle nomenclature et de la théorie chimique antiphlogistique : d'abord objet de critiques acharnées, d'oppositions catégoriques, de plaisanteries appuyées, il s'est peu à peu imposé au sein de divers contextes culturels et l'usage s'en est généralisé. Notons toutefois qu'un nombre non négligeable des défenseurs de la théorie de Lavoisier (l'Italien Giovanni Fabbroni, par exemple) ont continué à parler

d'« air » plutôt que de « gaz », mot à leurs yeux trop barbare et trop dur. À cet égard aussi, l'introduction du « gaz » eut les mêmes effets que la plupart des termes de la nouvelle nomenclature : elle suscita maintes discussions et d'innombrables propositions de révision.

D'un point de vue historique, il n'en est pas moins significatif que le mot « gas », apparu à la faveur de la philosophie chimique de Van Helmont, ait été récupéré plus d'un siècle plus tard pour être appliqué aux « airs » puis, une fois que Lavoisier l'eut modifié en « gaz », utilisé à propos d'un concept précis et quantitatif (l'état aéroforme des corps). C'est grâce à la révolution effectuée par Lavoisier qu'il finit par être définitivement intégré au patrimoine théorique de la chimie.

▼ ABBRI F., *Le terre, l'acqua, le arie. La rivoluzione chimica del Settecento*, Bologne, Il Mulino, 1984. — BENSUADE-VINCENT B., *Lavoisier. Mémoires d'une révolution*, Paris, Flammarion, 1993. — BERETTA M., *The Enlightenment of Matter. The Definition of Chemistry from Agricola to Lavoisier*, Canton (Mass.), Science History Publ., 1993. — CROSLAND M.P., *Historical Studies in the Language of Chemistry*, Londres, Heinemann, 1962. — DAGOGNET F., *Tableaux et langages de la chimie*, Paris, Le Seuil, 1969. — LAVOISIER A.-L., *Traité élémentaire de chimie*, Paris, Cuchet, 2 vol., 1789. — PAGEL W., *Joan Baptista Van Helmont. Reformer of Science and Medicine*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1982. — VAN HELMONT J.B., *Ortus Medicinæ*, Amsterdam, apud Ludovicum Elzevirium, 1648.

Ferdinando ABBRI
(trad. O. Bonis)

→ Chimie physique ; Crise de la physique moderne ; Gaz (Théorie des) ; Lavoisier ; Molécule ; Phlogistique.

GAZ (Théorie des)

PHYSIQUE

L'étude des gaz ne saurait être dissociée de celle de la chaleur. D'abord, une part importante des propriétés du gaz concerne ses réactions à l'arrivée ou au départ de la chaleur — arrivée et départ qu'il est donc particulièrement apte à déceler et à évaluer. Mais d'autre part, et sur un plan beaucoup plus théorique, on constate que l'évolution des idées sur les gaz fait avancer les idées sur la chaleur, qu'il s'agisse de sa description classique ou de son interprétation statistique.

Avant 1800 : les explorateurs...

Au commencement, comme d'habitude, était Galilée... Et de plusieurs manières : il a inventé le « thermoscope », il a « pesé l'air », trouvant pour sa densité un ordre de grandeur satisfaisant, et enfin il est le premier à avoir délibérément ignoré les effets de la résistance de l'air sur les mouvements — sur la chute des corps en particulier : c'est encore étudier les gaz qu'évoquer leur absence, le « vide »...

Puis son élève Torricelli trouve l'explication du fonctionnement des pompes : ce n'est pas l'« horreur du vide », c'est la pression exercée par l'atmosphère, qui soutient aussi bien dix mètres d'eau dans le tuyau de la pompe que 76 cm de mercure dans le tube du baromètre. L'idée soulève de nombreuses protestations, jusqu'à ce que Pascal organise l'expérience décisive du puy de Dôme, où l'on compare la hauteur du mercure dans le baromètre au pied et au sommet de la montagne... Les montagnes vont d'ailleurs intervenir à plusieurs reprises dans l'étude physique de l'atmosphère, et cette étude n'est pas la moindre des raisons qui poussent Saussure sur les pentes du mont Blanc.

Dès le XVII^e s., la chaleur et les gaz occupent les mêmes chercheurs : Boyle est à la fois un ancêtre de la calorimétrie et l'auteur de la loi liant à température constante la pression et le volume d'une masse constante de gaz (notre « loi de Mariotte ») : leur produit est constant. Un peu plus tard, Amontons montre qu'entre deux températures données l'augmentation relative de pression d'un gaz est indépendante de la pression initiale. Il en tire le principe d'un thermomètre à gaz qui lui permet de montrer que l'eau bout à une température invariable (à pression atmosphérique normale), et de proposer d'en faire un point fixe pour graduer les thermomètres...

Avant que cette loi d'Amontons devienne l'une des lois de Gay-Lussac, il faudra qu'on identifie plusieurs gaz auxquels l'appliquer : l'« air fixe » (gaz carbonique) est découvert en 1756 par Black, l'« air inflammable » (hydrogène) par Cavendish en 1766, l'oxygène et l'azote par Priestley et Lavoisier vers 1775.

Le livre où Priestley cite toutes ces « espèces d'air » est d'ailleurs à l'origine de l'inspiration des frères Montgolfier, qui se lancent en 1783 à la conquête des airs... La même année, leur concurrent Charles fait voler le premier ballon à hydrogène, qui ne tarde pas à devenir, lui aussi, un moyen d'étudier l'atmosphère : Charles lui-même monte à 4 000 mètres avant la fin de l'année, notant à chaque instant la pression et la température...

La construction du modèle classique

Dès le début du XIX^e s., les savants parisiens s'attaquent aux gaz — et à la chaleur, plus précisément aux chaleurs spécifiques de tous les corps, solides, liquides et gazeux. C'est l'époque où l'impulsion donnée aux sciences et à l'enseignement par la Convention se traduit au bout de quelques années par l'épanouissement à Paris d'un milieu scientifique comme il n'en a jamais existé nulle part, ni avant ni après. Ainsi, parmi ceux qui cherchent une équation d'état des gaz, à Paris, vers 1810, on trouve Ampère, Bérard, Berthollet, Biot, Clément, Delaroche, Gay-Lussac, Laplace, Poisson...

Le départ est donné en 1802 par Gay-Lussac. Dans une suite d'expériences menées avec un soin scrupuleux, il établit la loi qui porte encore son nom :

l'augmentation relative de volume d'un gaz chauffé à pression constante de 0 °C à 100 °C est la même pour tous les gaz dont il dispose. La même année, Laplace charge Biot de s'attaquer au problème de la vitesse du son dans l'air. Tous les calculs tendant à évaluer cette vitesse ont jusqu'ici utilisé la loi de Mariotte, c'est-à-dire admis que la température de l'air ne variait pas au cours des compressions et détentes successives marquant le passage de l'onde sonore. Les résultats obtenus étant en désaccord avec l'expérience, on finit par se demander si l'erreur n'est pas de considérer cette température comme constante. On sait bien, d'autre part, qu'une compression ou une détente à température constante exigent que le gaz puisse perdre ou recevoir de la chaleur : réciproquement, des transformations trop rapides pour permettre ces échanges se traduisent forcément par des variations de température, et la loi de Mariotte ne s'applique plus ! Il serait donc souhaitable de trouver la loi liant pression et volume pour des transformations « adiabatiques », c'est-à-dire sans échange de chaleur. On se rend bien compte qu'on y gagnera, en prime en quelque sorte, une meilleure compréhension de la chaleur...

Dès 1802, Laplace charge Biot de cette étude. Il faudra vingt ans pour parvenir à la loi « pv puissance gamma égale constante », car la constante gamma est le rapport entre les chaleurs spécifiques du gaz respectivement à pression et à volume constants. Même une fois qu'on l'aura démontrée, il restera à mesurer ces chaleurs spécifiques... Avec Biot — et Laplace lui-même bien entendu — Clément, Desormes, Delaroche, Bérard, Dulong et Petit devront s'atteler à ces diverses tâches avant que Poisson puisse enfin énoncer la loi, en 1820.

C'est le moment où Carnot commence à rédiger ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, où les adiabatiques jouent évidemment un grand rôle : on sait que le « cycle de Carnot » définissant une machine idéale, est fait de deux isothermes... et de deux adiabatiques ! La façon dont Carnot attaque le problème lui permet de ne faire aucune hypothèse sur la nature de l'« agent » utilisé par sa machine. Mais ensuite, une fois acquis le résultat général, il considère un agent gazeux, et en tire des lois sur les échanges de chaleur des gaz : il évalue en particulier pour la première fois la quantité de chaleur échangée par un gaz lors d'une transformation isotherme — quatre ans avant que Dulong, qui ignore ses travaux, présente à l'Académie des sciences une ébauche partielle de la même loi...

Enfin, à partir de 1845, Joule parvient peu à peu à imposer l'idée que la chaleur est une forme d'énergie, et parmi les expériences qu'il présente les gaz jouent évidemment un grand rôle : « détente de Joule » dans un récipient vide — sans échange de travail ni de chaleur — « détente de Joule-Thomson » à travers un conduit obstrué... Une fois de plus, ces travaux sur la chaleur débouchent sur une loi pour les gaz : l'énergie interne ne dépend que de la température — pour un gaz « parfait », être idéal défini précisément par cette

condition et par l'extension à toutes les températures des lois de Gay-Lussac.

Il n'est pas étonnant que ce modèle du gaz parfait soit achevé au moment même où Clausius, montrant la compatibilité des résultats de Joule avec ceux de Carnot — c'est-à-dire du « Premier Principe » avec le « Deuxième » — fonde sur des bases solides la thermodynamique. Il est plus étonnant de retrouver le même Clausius au premier rang de ceux qui vont remettre en cause ce modèle classique, et qui, pendant cinquante ans, vont tenter d'imposer, sous le nom de théorie cinétique, un modèle moléculaire des gaz...

La longue gestation du modèle moléculaire

Sans remonter jusqu'aux philosophes « atomistes » de l'Antiquité, on trouve très tôt, dans la physique « moderne » du XVIII^e s., un modèle moléculaire : celui de D. Bernoulli, qui tente d'expliquer le « ressort » du gaz par les chocs de ses molécules, animées d'une certaine vitesse, sur les parois du récipient. Utilisant plus volontiers les « forces vives » de Huygens que les forces de Newton, il parvient à montrer que la pression est proportionnelle au carré de la vitesse des molécules, si on admet que celle-ci est indépendante du volume du récipient. Pour aller plus loin, pour établir un lien entre vitesse des molécules et température, il faut connaître la relation entre pression et température : c'est seulement au début du XIX^e s. que Gay-Lussac l'établit pour de bon. Dalton, lui, énonce l'addition des pressions partielles des constituants d'un mélange gazeux, et en chimie il émet l'hypothèse des proportions définies, que Gay-Lussac traduit en termes de volume : deux volumes d'hydrogène, par exemple, se combinent à un volume d'oxygène... Ces résultats ne sont évidemment pas étrangers à l'hypothèse d'Avogadro (1811) suivant laquelle des volumes égaux de gaz différents contiennent dans les mêmes conditions le même nombre de molécules. Trois ans plus tard, Ampère retrouve par un autre chemin la même loi.

Pourtant le modèle moléculaire des gaz va piétiner cinquante ans, malgré les tentatives fort intéressantes de deux « pionniers malheureux », britanniques tous les deux, Herapath et Waterston, qui ne parviennent ni l'un ni l'autre à attirer l'attention des autorités scientifiques sur des travaux où figurent pourtant (en 1845 !) le principe d'équipartition de l'énergie et la vitesse moyenne des molécules... Un peu plus tard, Waterston parvient même à estimer pour la première fois leur taille, à un ordre de grandeur près seulement !

Joule est le seul à découvrir, à citer et à utiliser ces travaux, dès 1848, dans une étude sur les chaleurs spécifiques à volume constant. Mais sa contribution principale à la théorie cinétique, celle qui va enfin relancer les études sur ce sujet, c'est l'identification de la chaleur comme forme d'énergie. Et c'est une fois de plus Clausius qui ouvre la nouvelle période, avec un article de 1857 intitulé « Le genre de mouvement que nous appelons chaleur »...

De la cinétique à la statistique

Dans cet article, Clausius fait une sorte de bilan des études antérieures, en insistant seulement sur le « nombre de degrés de liberté » des molécules, c'est-à-dire sur les différents moyens qu'elles ont d'emmagasiner de l'énergie. Aux trois termes correspondant aux vitesses de translation suivant les trois axes, combien faut-il en ajouter pour les rotations, pour les vibrations internes ? Un an plus tard, pour répondre à une critique du modèle (si les molécules filent à plusieurs centaines de mètres par seconde, pourquoi les odeurs se répandent-elles si lentement ?), Clausius invente un paramètre tout à fait fondamental, le « libre parcours moyen » entre deux collisions successives d'une molécule. Il parvient à établir une relation entre ce libre parcours moyen et la taille d'une molécule, connaissant le nombre de molécules par unité de volume : on pourrait estimer la taille des molécules si on parvenait à évaluer le libre parcours moyen.

C'est Maxwell qui trouve la méthode, dès l'année suivante (1859). Avec lui, les articles de Clausius tombent en terrain favorable, car il s'intéresse depuis longtemps déjà aux statistiques. Au lieu d'admettre, comme Clausius, que les chocs entre les molécules tendent à égaliser leurs vitesses, il affirme qu'ils entraînent une distribution de vitesses où toutes les valeurs sont représentées, avec des probabilités connues. Il en déduit par exemple que la viscosité d'un gaz (qui traduit ses « frottements internes ») est indépendante de la pression, résultat tout à fait inattendu, qu'il parvient à vérifier expérimentalement, pour le plus grand bien de la théorie cinétique... Et connaissant la viscosité, on peut remonter au libre parcours moyen, puis à la taille des molécules.

Boltzmann va beaucoup plus loin que Maxwell. D'abord, il reprend la distribution de vitesses de son aîné, et il en donne une nouvelle démonstration, étendue au cas où s'exerce une force extérieure, comme la gravitation. Puis il parvient rapidement à montrer que l'énergie moyenne d'un degré de liberté vaut $1/2 kT$, T étant la température absolue et k une constante (la « constante de Boltzmann »). Dès lors, son travail dépasse la théorie cinétique : il établit les bases de la physique statistique, et aboutit en 1877 à la définition statistique de l'entropie.

Mais les réticences au modèle moléculaire persistent jusqu'au début du XX^e s., recouvrant des enjeux qui débordent la physique, comme en témoigne la réfutation des thèses « anti-moléculaires » de Mach par... Lénine ! Et curieusement, ce n'est pas dans les gaz que l'on trouvera enfin le moyen de convaincre tous les physiciens de l'existence nécessaire des molécules. C'est dans l'eau, où l'explication du mouvement brownien par Einstein, en 1905, permettra non seulement de prouver que les molécules existent, mais aussi d'évaluer leur taille : dès 1908 J. Perrin retrouvera ainsi la valeur du nombre d'Avogadro,

Cette date tardive est d'autant plus étonnante que, trente ans avant l'article d'Einstein, Van der Waals avait publié ce qui nous semble, rétrospectivement, la meilleure preuve possible du bien-fondé du modèle moléculaire : son équation d'état des « gaz réels ».

Les gaz réels

Le gaz dont on a parlé jusqu'ici est un « gaz parfait », qui obéit à toutes les températures aux lois de Gay-Lussac et de Joule. Mais les gaz réels, eux, finissent par se liquéfier si on les refroidit suffisamment, et bien avant cela leurs propriétés mécaniques s'écartent significativement de celles du « gaz parfait ». On le sait depuis longtemps pour la vapeur d'eau, et on le constate tout au long du XIX^e s., à mesure qu'on liquéfie d'autres gaz.

En 1863 un ami de Maxwell, Thomas Andrews, publie pour le gaz carbonique un réseau complet d'isothermes, c'est-à-dire de courbes donnant, pour chaque température, la variation de la pression en fonction du volume pour un gramme de gaz. Au-dessous d'une certaine température, dite « critique », chaque courbe présente un palier horizontal qui correspond à la liquéfaction. Il devient de plus en plus court quand la température s'élève, et se réduit à un point (un point d'inflexion à tangente horizontale) pour la température critique. Au-dessus, les isothermes présentent encore une inflexion, qui s'atténue avant de disparaître quand la courbe s'approche de l'hyperbole qui constitue, d'après la loi de Mariotte, l'isotherme du gaz parfait... Il s'agit donc d'un réseau de courbes assez compliquées. Or, dix ans plus tard, en 1873, Van der Waals parvient à en rendre compte au moyen d'une seule équation très simple ! Il la tire de l'équation d'état des gaz parfaits, moyennant deux changements inspirés par l'idée de molécules de taille finie, s'attirant entre elles avec une force qui diminue très vite avec la distance... L'équation fait intervenir deux constantes, que l'on tire facilement d'une étude expérimentale de l'état critique. Ensuite, à chaque température, la formule de Van der Waals donne l'isotherme du gaz, avec une précision étonnante. Quant au palier de liquéfaction, Maxwell montre dès l'année suivante comment le tracer très simplement.

Ce travail vaudra le prix Nobel à Van der Waals, mais en 1910 seulement – quand les derniers adversaires des molécules se seront rendus devant l'interprétation donnée par Einstein du mouvement brownien !

► BOLTZMANN L., *Leçons sur la théorie des gaz*, Paris, Gauthier-Villars, 1905. – BRUSH S.G., *Kinetic Theory*, Pergamon Press, 2 vol., 1966. – KLEIN M.J., « The historical origins of the Van der Waals equation », *Physics*, 73, 1974. – MAURY J.-P., *Petite histoire de la Physique*, Paris, Larousse, 1992.

Jean-Pierre MAURY

→ Avogadro (Loi d') ; Avogadro (Nombre d') ; Chaleur ; Chimie physique ; Gaz ; Phlogistique.

GÈNE

Ce concept, relativement nouveau dans l'histoire, est né dans un contexte précis, celui du début du XX^e s. Il exprime généralement l'idée d'un lieu spécifique de l'hérédité présent dans l'organisme, déterminant matériel qui assure la transmission des caractères. Il est ainsi caractéristique d'une approche réductionniste des phénomènes vitaux. Il a été établi non seulement pour expliquer la transmission des caractères mais aussi le processus de l'évolution (modification et apparition des espèces, rôle des circonstances extérieures, etc.), le développement embryonnaire. Il a répondu aussi aux demandes faites aux scientifiques de rationalisation des processus de sélection venant des améliorateurs d'espèces végétales et animales utiles. Nous proposons de distinguer trois grandes périodes dans l'histoire du concept de gène. La première, *grosso modo* la seconde moitié du XIX^e s., est celle des conditions de son émergence et de la mise en place de l'idée et du mot autour de quelques principes (notamment mendéliens et weismanniens) fondant la génétique. La seconde, qui correspond à la première moitié du XX^e s., est celle de la confirmation des choix précédents (travail des généticiens) et de la recherche d'un modèle (travail des biochimistes) représentant la nature du gène et expliquant sa fonction dans la cellule et l'organisme. La dernière enfin, jusqu'à nos jours, période du développement de la biologie moléculaire, où le modèle retenu est testé, amélioré et utilisé dans des domaines de plus en plus divers, d'un point de vue théorique ou appliqué. Nous nous intéressons ici essentiellement à la première période et partiellement à la seconde.

Ce terme de « gène » proposé par Johannsen en 1909 est en effet d'une certaine manière l'aboutissement d'une période que l'on peut faire commencer en 1864 avec « l'unité physiologique » de Spencer et qui est marquée par la recherche de modèle retenant la nature particulière de l'hérédité. Ces tentatives se font dans le cadre du développement et de la conjonction de différents débats qu'elles doivent intégrer : réflexions sur la transmission des caractères héréditaires, travaux sur l'hybridation des plantes, controverses autour de l'évolution, du transformisme et du fixisme, recherches en histologie et en cytologie, en chimie du vivant et de la cellule, études sur le développement embryonnaire, spéculations sur la nature et les propriétés de la matière vivante, des plus petites particules ultimes de matière vivante, des unités vitales, etc. On peut ramener à deux ces différents domaines, celui des réflexions sur l'hérédité liées aux travaux sur l'hybridation et celui des études biochimiques, cellulaires et embryologiques.

Réflexions sur l'hérédité

Trois grands types d'explication de l'hérédité, proposés particulièrement au $XVIII^e$ s. mais ayant des équivalents dès l'Antiquité, ont été discutés dans l'histoire jusqu'au XIX^e s. Ils servent d'arrière-plan aux

débats autour de l'hérédité. Il s'agit de la théorie de la préexistence des germes ou préformationnisme classique, de celle de l'épigénèse causale et celle de la panspermie ou pangénèse. Pour la théorie de préexistence des germes, le problème d'un lieu spécifique indépendant des caractères exprimés par l'organisme et chargé de l'hérédité ne semble pas se poser ; l'être à venir est présent en miniature. On s'interroge sur ce qui provoque son déploiement, sur l'influence des deux parents dans celui-ci mais il faut néanmoins aussi expliquer les ressemblances au sein des familles. Les explications de l'hérédité s'appuyant sur l'existence de particules matérielles déterminant le développement des caractères seront accusées de revenir à ces théories préformationnistes. La théorie de l'épigénèse causale retenue généralement par les embryologistes amène à chercher ce qui décide et contrôle dans sa spécificité le point d'origine, d'initiation du développement embryonnaire et le processus qui aboutit au fœtus. La pangénèse peut sembler contenir en elle ou du moins favoriser la notion de lieu spécifique indépendant chargé de la transmission des caractères ; en réalité pour les auteurs qui la soutiennent, au moins jusqu'à y compris la théorie de la pangénèse de Darwin, il n'y a pas de séparation de nature entre le substrat matériel chargé de l'hérédité et les caractères qu'il représente. Ce substrat consiste en des particules, des unités (des « molécules organiques » selon Buffon) qui représentent les différentes parties du corps ou en portent le souvenir, l'idée d'une forme (d'un « moule » selon le même auteur) et qui migrent vers les organes sexuels où on les retrouve rassemblées prêtes à former un nouvel être par la réunion des particules d'origine paternelle et d'origine maternelle se souvenant de la forme des parties (ou la portant en soi) dont elles sont issues. La panspermie ou pangénèse a sans doute permis mieux que les autres théories de rendre compte, au $XVIII^e$ puis au XIX^e s., du rôle des deux parents puis de l'indépendance des caractères.

Les travaux sur les plantes des hybrideurs commencés, au $XVIII^e$ s., avec Linné (1759) et surtout Kölreuter (1761), mettent en avant notamment cette participation des deux parents dans la fécondation et l'hérédité ainsi que le fait que les hybrides non stériles tendent à revenir aux types ancestraux dès la génération suivante ou en quelques générations. Domine jusqu'à la fin du XIX^e s. un modèle de type chimique pour expliquer ces phénomènes, celui des mélanges ou de la fusion (Nägeli, 1865), d'une « manière intime » (Darwin, 1868), des caractères mâles et femelles dans les hybrides. Ces caractères sont ceux qui définissent d'une manière essentielle deux espèces différentes et tendent naturellement ensuite à se séparer (Kölreuter, 1761 ; Gärtner, 1849) d'où le retour aux types parentaux ou ancestraux. Quelques auteurs admettent que dans certains cas la fusion est stable. Le matériel héréditaire est ainsi perçu comme un mélange de fluides ou d'émulsions dont la nature chimique permet précisément d'assurer la stabilité ou la ségrégation des

essences parentales. Certains, tel Sageret (1826, 1830), considèrent la fusion des caractères parentaux dans l'hybride comme de peu d'importance. Ils reconnaissent chez ce dernier plutôt une distribution combinée de diverses manières de ces caractères, c'est-à-dire réassortis indépendamment les uns des autres. Au tournant du siècle, notamment avec Hugo De Vries (1887) puis la « redécouverte » des lois de Mendel (1900), plusieurs hybrideurs retiennent l'idée de la transmission et de l'expression indépendantes des différents caractères. Très tôt, quelques auteurs (T.A. Knight, A. Setton, J. Gross, 1822) constatent que dans de nombreux cas, les caractères d'un des parents dominent dans l'hybride. Les acquis des hybrideurs aideront à la remise en cause des explications traditionnelles et nourriront les propositions de nouveaux modèles de l'hérédité dans la seconde moitié du siècle.

Transformisme et fixisme, uniformisme et catastrophisme sont les pôles des diverses positions existant au XIX^e s. sur l'histoire de la terre et des êtres vivants, sur la création et la modification des espèces. À ces positions se mêlent celles ayant trait au développement comparé des organismes, de l'embryon à l'adulte, à la comparaison des formes et des fonctions chez l'animal et le végétal actuels ou fossiles, aux classifications des deux règnes et à la géographie botanique puis zoologique. De ces discussions émergent, dans le courant du siècle, deux théories principales transformistes, celles de Lamarck et de Darwin qui diffèrent par la façon dont les circonstances extérieures interviennent dans la création des espèces. Ces deux théories reconnaissent la possibilité de la transmission des modifications acquises du vivant de l'animal à la progéniture par la génération. Darwin insiste sur la grande variété présentée par les descendants issus des mêmes parents et sur laquelle agit la sélection naturelle. De ce fait, la création des espèces est le résultat d'une suite continue de légères variations. Entre 1859 et 1900, de nombreux scientifiques se rallient à l'idée de transformisme mais essentiellement sous forme d'un évolutionnisme, situé entre le néolamarckisme et le darwinisme orthodoxe (celui de Darwin lui-même), fondé pour une large part sur la notion d'hérédité des caractères acquis. Néanmoins un courant initié par Wallace (1867) et Weismann (1883), le néodarwinisme, rejette cette possibilité. Les modèles particuliers de l'hérédité s'efforceront d'expliquer, selon que l'on choisisse l'un ou l'autre camp, soit le maintien des modifications des caractères issues des circonstances extérieures dans la transmission à la descendance, soit au contraire le maintien des caractères inchangés de génération en génération protégés des influences externes. Ils doivent aussi parallèlement expliquer l'origine de la diversité et la dynamique de l'évolution. Les modèles particuliers mendéliens semblant favoriser l'idée d'une évolution par sauts brusques entrèrent en conflit avec l'hypothèse de créations d'espèces par modifications graduelles.

Études biochimiques, cellulaires et embryologiques

L'histologie et la cytologie, qui apparaissent et se développent au cours du XIX^e s., notamment après les travaux de Bichat, Dutrochet, Schleiden et Schwann, aboutissent à reconnaître la cellule comme une unité structurale puis fonctionnelle caractéristique du vivant et une origine cellulaire aux tissus. C'est ainsi que l'on finira par chercher les clefs de la transmission des caractères au sein de la cellule. Le noyau observé dès le XVIII^e s. apparaît dans la première moitié du siècle suivant comme un composant habituel de la cellule. On identifie la présence d'un fluide visqueux dans celle-ci, appelé « sarcose » par Dujardin (1835) et « protoplasme » par Purkinje (1839) et von Mohl (1845), qui devient un objet d'étude microscopique et chimique. Pour Schleiden (1838), la genèse des cellules débute par la formation d'un noyau sous l'effet de la cristallisation d'un matériel granulaire figurant dans le contenu cellulaire ou à l'intérieur de liquides organiques informés. Ce noyau en se développant donne une nouvelle cellule, sa paroi devenant celle de cette dernière. Dans les années 1850, après les travaux de Remak (1852) et Virchow (1855) s'impose l'idée que toute cellule provient de la division d'une cellule préexistante. À la suite de Kölliker (1841), pour le spermatozoïde, de Remak (1852) et Gegenbauer (1861) pour l'œuf, les gamètes sont identifiés à des cellules. La fécondation est alors assimilée soit à une excitation due au contact des deux cellules parentales (Bischoff, 1847), soit à celui de leur fusion (Pringsheim, 1856). Pour Wilhelm His (1874), « cette excitation renferme tout le bagage génétique provenant du côté paternel aussi bien que maternel ». L'idée de fusion s'appuie notamment sur les observations faites par Thuret (1854) puis Hermann Fol (1879) de la pénétration de l'œuf par le spermatozoïde. Elle aboutit, après Oskar Hetwig (1875) et Hermann Fol (1879), à admettre la fusion des deux noyaux parentaux en un nouveau qui engendre ceux de toutes les cellules de l'organisme. Dès 1866, Haeckel affirme que le rôle du noyau est d'assurer la transmission des caractères héréditaires tandis que le « milieu protoplasmique » permet l'ajustement aux conditions extérieures. Fol décrit les deux divisions de maturation du noyau de l'œuf. La fusion des gamètes est utilisée pour soutenir l'hérédité par mélange (Nägeli, 1884), mais certains auteurs (Galton, 1876 ; De Vries, 1889) insistent sur l'existence de particules transmises intactes de génération en génération. La division de la cellule somatique, remarquée dès le XVIII^e s., est l'objet de nombreuses observations et spéculations dans la seconde moitié du XIX^e s. Flemming remarque qu'elle consiste aussi en une division du noyau où il observe des filaments qui se clivent longitudinalement (1879). Il donne à cette division le nom de « mitose » (1882). Dans les années 1870 sont reconnus trois stades à la mitose et à la division longitudinale de ces filaments, « globules chromatiques » (Van Beneden, 1883) ou « chromosomes » (Flemming, 1888), qui l'accompagnent. Ces filaments observés dans

le noyau sont décrits par Flemming (1879) et prennent leur nom de la substance colorable dont il a remarqué qu'ils étaient composés et qu'il nomme « chromatine ». Dix ans plus tôt, Miescher (1869), travaillant sur la chimie des cellules, réussit la séparation du noyau d'avec la cellule et l'isolement dans le premier d'une substance riche en phosphore associée à une protéine qu'il désigne sous les termes respectivement de « nucléine » et de « protamine ». Il propose une formule linéaire de la nucléine (C₂₉H₄₉N₆O₂₂P₃). Selon Miescher, en apportant un élément manquant, le spermatozoïde restaure l'« organisation active » de l'ovule mise en repos durant sa maturation par la décomposition de la protamine sous l'influence de la formation d'azote. Dans les années 1880, à la suite de Zacharias (1881) et Flemming (1882), on identifie chromatine et nucléine. Van Beneden (1883) remarque que lors de la division cellulaire qui aboutit à la production de gamètes (nommée « méiose » par Weismann en 1887), ceux-ci ne reçoivent que la moitié des « globules chromatiques » (les « chromosomes » de Flemming). Il observe aussi que, lors de la fécondation, le nouveau noyau ne se forme pas par la fusion des noyaux des gamètes mâle et femelle qui mélangeraient ainsi leurs substances mais par la réunion de leurs « globules chromatiques ». Chaque cellule fille issue des divisions suivantes (mitoses) recueille ainsi les mêmes « globules chromatiques » paternels et maternels.

Théories retenant la nature particulière de l'hérédité

Tentatives de synthèse à divers moments des résultats des différents domaines que nous venons de présenter, plusieurs théories tentent d'expliquer le fonctionnement matériel de la transmission héréditaire, particulièrement au niveau cellulaire dans la seconde moitié du XIX^e s. Elles doivent pouvoir expliquer à la fois la stabilité et la variabilité de cette transmission, la réalité des espèces (identifiables par tous) et leur création. Ces théories dépendent du fait qu'à partir des années 1860 est largement acceptée l'idée que l'organisme, y compris ses cellules, se compose de minuscules particules (des « unités ultimes » selon Brücke, 1861) qui jouent un rôle structurel et fonctionnel, notamment dans le développement et dans l'hérédité. Cette période correspond à une remise en cause de l'approche vitaliste. Les premières théories présentent plusieurs similarités avec certains modèles du XVIII^e s., tels ceux de Maupertuis ou de Buffon. Le matériel responsable de l'hérédité n'y a pas de lieu spécifique et se trouve dans la cellule ou dans le sang. Le philosophe anglais Herbert Spencer imagine, en 1864, qu'il existe des « unités physiologiques » intermédiaires entre les cellules et les molécules capables de se reproduire, portant chacune toutes les caractéristiques de l'espèce et de l'individu, identiques entre elles dans le même organisme. Les différences observées entre frères et sœurs s'expliquent par la différence de quantité d'unités reçues du père et de la mère. Ces unités se positionnent les unes par rapport aux autres pour former les parties

d'une manière prédéterminée. Elles sont capables de recevoir l'influence des circonstances extérieures permettant à celles-ci de jouer un rôle dans la transformation des espèces.

Charles Darwin propose, la même année, sa théorie de la pangénèse, qu'il est habituel, à la suite de Hugo De Vries (1889), de découpler en deux propositions principales qui ne sont pas nécessairement liées, l'une ayant trait à la transmission héréditaire et l'autre à l'influence des parties du corps sur celle-ci. D'une part, dans toute cellule germinative les qualités individuelles héréditaires de l'ensemble de l'organisme sont représentées par des particules matérielles définies, « substratum pour les caractères héréditaires », appelées « gemmules ». Ceux-ci se multiplient par division et sont transmis durant la division cellulaire de la cellule mère aux cellules-filles. Ils peuvent se présenter sous une forme « dormante » ou « latente » ne permettant pas l'expression du ou des caractères qu'ils représentent. Chaque type de cellules dans le corps est représenté par ses propres sortes de gemmules qui peuvent se développer en cellules identiques à celles dont elles proviennent. La mosaïque des caractères observables chez les hybrides s'explique par le mélange des gemmules parentales et les cas de retour aux caractères ancestraux par l'activation de gemmules jusque-là dormantes. D'autre part, toutes les cellules du corps, à différents moments de leur développement, rejettent de telles particules qui leur sont propres. Celles-ci se déposent dans le sang, circulent dans tout l'organisme et se retrouvent dans les « cellules reproductrices ». Là, elles transmettent à ces dernières les qualités de l'organisme, définies par les différentes parties du corps, qui peuvent leur manquer. Cette dernière proposition permet de rendre compte de la transmission des caractères parentaux mais aussi d'un processus de variation déterminé par les circonstances du milieu externe. Celui-ci peut en effet influencer sur les qualités de certaines parties et induire ainsi la création d'un variant ; la sélection naturelle étant néanmoins le principal acteur du procès de création des espèces.

Le botaniste allemand Carl Nägeli (1884) propose la « théorie mécanique-physiologique de l'évolution », selon ses termes. Il conclut que si l'ovule a une masse beaucoup plus grande que celle du spermatozoïde, bien qu'ils participent tous deux également à la formation du descendant, cela signifie qu'il existe dans le protoplasme deux parties dont seulement l'une, en même quantité chez les deux cellules parentales, est responsable de l'hérédité, tandis que l'autre, beaucoup plus importante chez la cellule-mère, est nutritive. Il considère que la première, qu'il nomme « idioplasme », est formée d'un ensemble de filaments qui peuvent aller d'une cellule à l'autre et qui sont constitués chacun de nombreux groupes de molécules, les « micelles ». Chacun des filaments, non déterminés par un lieu dans la cellule, présente des propriétés spécifiques. L'ensemble des filaments groupés en faisceaux contrôlent les propriétés des cellules, des tissus, des organismes. L'activité de l'idioplasme dépend des différents

états d'excitation des groupes de molécules à l'intérieur des filaments.

Le zoologiste allemand August Weismann (1883, 1885) propose, après plusieurs aménagements notamment après avoir lu Hugo De Vries (voir ci-après), une théorie de l'hérédité qui s'appuie sur deux hypothèses nouvelles, résultats notamment de récents travaux en embryologie et en cytologie. Il s'agit, pour la première, de la « théorie de la continuité du plasma germinal » selon laquelle la « voie germinale » est séparée dès le début du développement du reste de l'organisme et ne peut donc subir aucune influence venant de ce dernier. Ainsi, les modifications affectant celui-ci ne sont pas transmissibles à la descendance. De ce fait, le plasma germinal est présenté comme éternel alors que le reste de l'organisme est mortel. Cette hypothèse, fondement du néodarwinisme, dont Weismann est le principal représentant, lui permet de ne pas retenir l'hérédité des caractères acquis. Selon la seconde hypothèse, issue notamment des travaux de Hertwig (1884), Strasburger (1884), Koelliker (1885) et de Weismann lui-même, tout le matériel responsable de l'hérédité se trouve dans le noyau. Weismann imagine ultérieurement plusieurs unités qui constituent à plusieurs niveaux ce matériel, les « biophores » étant les plus petites, les « ides » les plus grandes, et les « déterminants », intermédiaires. Chaque biophore, qui consiste en un agrégat de diverses molécules capables de croître et de se dupliquer, correspond à un caractère particulier d'une cellule. Toute substance vivante est composée de différents biophores, sous forme de nombreuses répliques identiques, au niveau du noyau comme du reste de la cellule même si toutes les propriétés de celle-ci sont déterminées par le noyau. Les déterminants correspondent à des combinaisons spécifiques de biophores qui décident ainsi de l'ensemble des caractéristiques des cellules spécialisées comme celles du muscle, du sang et des différentes parties du corps. Les déterminants eux-mêmes se rassemblent en des unités plus élevées, les « ides » qui correspondent aux « disques » des « boucles nucléaires » selon les termes de Weismann, c'est-à-dire des chromosomes, ceux-ci étant appelés aussi par lui « idants ». Ceux-ci comme les déterminants dont ils sont composés portent ainsi tous les biophores correspondant aux caractères de la cellule. Dans une même cellule, tous les déterminants et les chromosomes sont donc identiques. La variation sur laquelle opère la sélection naturelle est innée; elle est due au mélange des déterminants grâce à la sexualité. La sélection naturelle agit sur elle à plusieurs niveaux, sur l'organisme entier mais aussi dans le plasma germinal sur les déterminants eux-mêmes. Pour Weismann, la division cellulaire peut se faire d'une manière égalitaire ou non. Dans le premier cas, les noyaux-filles possèdent le même plasma germinal, dans le second cas, ce dernier se répartit inégalement dans chacun des noyaux-filles. Ces différentes divisions permettent d'expliquer à la fois la transmission inchangée du plasma germinal et la différenciation durant l'embryogénèse.

Le botaniste hollandais Hugo De Vries (1889) propose un modèle qui s'inspire explicitement à la fois de la première proposition de la théorie de la pangénèse de Darwin selon laquelle les qualités individuelles héréditaires de l'ensemble de l'organisme sont représentées par des particules matérielles définies et du refus de Weismann de prendre en compte l'hérédité de l'acquis et ses conséquences; hérédité de l'acquis que la seconde proposition de Darwin cherche à expliquer. Les travaux d'hybridation sur les plantes entrepris par Hugo De Vries l'amènent à postuler l'indépendance des caractères héréditaires et à en conclure l'existence d'unités matérielles indépendantes responsables chacune d'un de ces caractères et transmises chacune indépendamment de génération en génération. C'est cette hypothèse qui le conduit à reprendre la théorie de la pangénèse de Darwin et il désigne « pangènes », en référence à cet auteur, les unités matérielles de l'hérédité. Chaque cellule et l'ensemble du protoplasme sont constitués d'une multitude de pangènes. Les pangènes sont inactifs tant qu'ils restent situés dans le noyau où ils peuvent néanmoins se multiplier et ainsi permettre leur transmission lors des divisions cellulaires. Ils deviennent actifs en quittant le noyau et se multiplient alors massivement pour exprimer les caractères qui leur correspondent. Un pangène inactif dans le noyau peut donner un pangène qui reste inactif dans le noyau et un autre qui passe dans le cytoplasme où il est activé. Les divers pangènes nécessaires pour spécifier tous les caractères de l'organisme seraient contenus à l'état inactif dans le noyau des cellules sexuelles. Seuls certains d'entre eux passeraient à l'état actif après la fécondation. Les pangènes conservés inactifs jusqu'à la génération suivante expliqueraient les phénomènes de réapparition des caractères ancestraux. Ainsi De Vries d'une certaine manière traduit la notion darwinienne de « gemmules dormantes » par « l'inactivité des pangènes » mais il sépare plus nettement que Darwin le processus de l'hérédité de celui du développement de l'organisme. Dans le noyau, les pangènes conservent la mémoire des caractères historiques de l'espèce qu'ils transmettent d'une manière immuable de génération en génération à la manière du plasma germinatif éternel de Weismann. Comme pour le plasma germinatif, l'orientation stricte de la causalité se fait en effet des pangènes vers le corps. Pour Darwin, l'hérédité se fonde sur un cycle de transformation de gemmules en cellules et de cellules en gemmules. Au contraire, chez Hugo De Vries, à la manière du plasma germinatif de Weismann, c'est le maintien du stock de pangènes dans le noyau d'une génération à l'autre qui explique l'hérédité. S'établit ainsi, comme chez Weismann, une séparation entre la base matérielle de l'hérédité et ses effets somatiques, même si pangènes inactifs dans le noyau et pangènes actifs hors du noyau demeurent semblables. Il existe néanmoins des possibilités de variations responsables de l'évolution; elles ne proviennent pas de modifications induites par les circonstances extérieures mais de « mutations » soudaines de grande ampleur

comme celle qu'il reconnut chez une onagre, plante herbacée commune.

La génétique et le gène

La redécouverte, en 1900, d'une manière indépendante, par De Vries, Correns et Tschernak des lois de l'hybridation présentées par Mendel en 1866, provoque dans la décennie qui suit une série de discussions et la production de nombreux textes sur ces lois elles-mêmes mais aussi sur leurs conséquences sur la biologie de l'évolution, la physiologie du développement et l'étude de la transmission héréditaire et particulièrement les liens de ces lois avec la théorie chromosomique alors en pleine construction. Plusieurs auteurs (Strasburger dès 1900, Sutton, Boveri et Correns en 1902) concluent que les lois de Mendel sont la conséquence logique du fait que les chromosomes portent les unités matérielles déterminant les caractères héréditaires. Elles semblent en effet s'accorder avec notamment les hypothèses avançant que les gamètes mâles et femelles ne reçoivent que la moitié des chromosomes et que la fécondation réunit l'ensemble des chromosomes des gamètes paternelle et maternelle en un nouveau noyau. Ces hypothèses soutenues par les observations de Van Beneden (1883) et Boveri (1891) ne sont possibles que si l'on accepte la permanence des chromosomes même lorsque ceux-ci ne sont pas visibles entre les phases de division cellulaire. Certains auteurs pensent en effet qu'ils se dissolvent alors pour en reformer de nouveaux lors de la division suivante. Montgomery (1901) et Sutton (1902) peuvent suivre des chromosomes individuellement reconnaissables durant la mitose et la méiose, ce qui permet d'établir leur permanence. Sutton conclut que l'association des chromosomes paternels et maternels par paires, et leur séparation ultérieure pendant la division réductionnelle pourraient représenter la « base matérielle des lois mendéliennes de l'hérédité ». Boveri (1902, 1904), se référant à ses travaux sur une espèce d'oursin au cours desquels il peut obtenir des embryons possédant un nombre variable de chromosomes, ajoute que chaque chromosome est qualitativement différent et que tous les chromosomes sont nécessaires pour obtenir un développement normal. La thèse selon laquelle les chromosomes seraient la « base matérielle » de l'hérédité est dénommée plus tard par Wilson (1928) la théorie chromosomique de l'hérédité de Sutton et Boveri. Elle légitime l'idée que les cellules des organismes diploïdes portent les déterminants mendéliens en deux exemplaires.

Bateson (1901) nomme « allélomorphes » (qui donnera « allèles ») les « caractères unitaires » alternatifs de Mendel (pois lisse/ridé, jaune/vert, etc.). Cuenot (1904) remarque sur la souris qu'il peut y avoir plus de deux allèles pour un caractère donné (la couleur du poil peut être grise, jaune ou noire). Bateson propose aussi les termes « hétérozygotes » et « homozygote » (1901) ainsi que celui de « génétique » pour désigner la science qui traite de l'hérédité (1906). Le sexe est un

des premiers caractères pour lequel on peut reconnaître un chromosome comme l'élément qui le détermine (McClung, 1901; Stevens et Wilson, 1905). Bateson ainsi que De Vries voient dans la ségrégation mendélienne la preuve de leur théorie (saltationnisme) selon laquelle les créations d'espèces ne se font pas à la suite de variations continues mais par sauts discontinus. L'ouvrage de De Vries sur le rôle des « mutations » dans l'évolution apparaît alors comme un soutien tout à la fois au saltationnisme et au mendélianisme : les espèces naissent par mutation, une étape soudaine au cours de laquelle un caractère ou un ensemble de caractères se trouvent changés en même temps. Johannsen, remarquant une analogie entre le comportement des pangènes imaginés par De Vries et les facteurs mendéliens, propose de retenir « gène », variante du terme « pangène » sans référence à la théorie de la pangénèse de Darwin, qui est rapidement adopté. Cependant Johannsen ne veut pas voir dans le gène « une structure matérielle » mais un simple outil conceptuel : « Le gène doit être utilisé comme une sorte d'unité de calcul. En aucune façon nous n'avons le droit de définir le gène comme une unité morphologique dans le sens des gemmules de Darwin ou des biophores, des déterminants ou d'autres conceptions morphologiques spéculatives de cette sorte » (Johannsen, *Elemente der Exakten Erblichkeitslehre*, Iéna, G. Fischer, 1909).

La nature matérielle du gène rencontre alors différents types d'opposition, physicaliste, celle de Johannsen, qui cherche à expliquer l'hérédité en termes de force, celle des embryologistes qui, issus de la tradition de l'épigénèse, y voient un retour du préformationnisme, celle de certains essentialistes (et saltationnistes) pour lesquels l'espèce constitue un ensemble qui ne peut être ramené à la juxtaposition d'unités élémentaires, celle des graduellistes et biométriciens qui recherchent un modèle expliquant les modifications graduelles au sein d'une population dans lesquelles ils voient l'origine de l'évolution des espèces. Après 1910, Bateson, physicaliste et saltationniste-essentialiste, un des premiers et des plus importants mendéliens, s'oppose à la théorie chromosomique. Parallèlement, un certain nombre d'observations semblent déstabiliser le modèle mendélien mais les explications qu'elles reçoivent finalement le renforcent ainsi que sa jonction avec la théorie chromosomique. Ainsi, la loi de dominance est rapidement abandonnée car plusieurs exemples d'hybrides intermédiaires entre les parents sont connus. Mendel notamment remarque que le moment de la floraison des hybrides de la première génération de pois est « presque exactement intermédiaire » entre celui des plantes parentales. Correns (1900) parle de « semi-dominance ». La seconde loi, celle de disjonction des caractères, fondamentale pour Mendel, est récusee dès lors que l'on se rend compte que de nombreux caractères apparaissent plus ou moins fortement liés entre eux lors de leur redistribution dans la descendance. Darbishire (1904) remarque ainsi un « couplage

gamétique» (c'est-à-dire une liaison entre facteurs, dénommé « linkage » par Morgan en 1910) et prétend que l'indépendance n'est totale que si les caractères sont portés par des chromosomes séparés. Même la loi de disjonction des caractères, rebaptisée de la « pureté des gamètes » par Bateson, considérée par lui, dès 1901, comme l'essentiel de l'apport de Mendel, présente des exceptions, notamment dans le cas de la présence d'allèles multiples.

Plusieurs biologistes expriment leur scepticisme vis-à-vis de l'universalité des résultats de Mendel, tel De Vries qui affirme qu'il « devient de plus en plus clair que le mendélisme est une exception aux règles générales du croisement ». L'un d'entre eux, Morgan, confirme finalement, à partir des années 1910, le bien-fondé à la fois de l'approche mendélienne et de la théorie chromosomique. À partir de ses travaux et de ceux de son équipe, la génétique se constitue comme science autonome (d'abord dans son pays, les États-Unis) et la nature particulière de l'hérédité est généralement acceptée sous la forme de gènes situés en ligne sur les chromosomes. Morgan défend des positions expérimentalistes et se méfie des spéculations théoriques héritées du XIX^e s., notamment celles de Lamarck, Darwin et surtout Weismann mais aussi Mendel. Il reprend cependant l'hypothèse de Bateson selon laquelle l'acquisition de propriétés nouvelles dans les organismes résulte de variations héréditaires de grandes amplitudes et s'intéresse de ce fait à l'interprétation mutationniste de De Vries. Ses premières préoccupations scientifiques eurent trait au développement embryonnaire et il s'interroge sur la cause de la détermination du sexe, prédéterminé dans l'œuf ou résultat de l'action de l'environnement. La première originalité de Morgan vient du choix de la drosophile comme matériel expérimental. Dans un premier temps, il cherche, sans succès, à obtenir, en injectant différents composés chimiques dans la larve d'insecte, près des cellules reproductrices, des « mutations » telles que celles décrites par De Vries. Cependant, début 1910, il observe une variation spontanée dans son élevage de drosophiles qu'il reconnaît comme une « mutation ». Une mouche mâle a des yeux blancs et non rouges comme les drosophiles normales. Il croise ce mâle avec une femelle normale puis ensemble les mouches de la première génération. Il obtient des résultats, en première et seconde générations, en accord avec les théories de Mendel. De plus toutes les mouches aux yeux blancs sont des mâles, ce qui confirme la base chromosomique du déterminisme sexuel et indique que le facteur responsable de la couleur de l'œil était lié au chromosome responsable de ce déterminisme. Morgan trouve, en 1910, deux autres mutations liées au sexe, « ailes rudimentaires » et « corps de couleur jaune », puis, dans les années qui suivent, avec ses élèves, de très nombreuses autres mutations. Ils remarquent aussi que les couplages (« linkage ») entre les différents facteurs liés au chromosome sexuel ne sont pas absolus et qu'il existe différentes recombinaisons entre eux. Morgan les explique, en s'appuyant sur les

observations et les interprétations de Janssens (1909). Ils sont le résultat d'échanges de régions égales et correspondantes des deux membres d'une même paire de chromosomes lors de la division des cellules sexuelles (« crossing over »). Morgan et son collaborateur Sturtevant supposent que si ces échanges de régions se font au hasard la probabilité que l'une d'entre elles sépare deux facteurs est d'autant plus petite que les sites qui les déterminent sont plus proches l'un de l'autre. S'appuyant sur ce raisonnement, Sturtevant entreprend de calculer la position et l'ordre de succession de ces sites et, dès 1913, il propose la première carte génétique, celle du chromosome X (sexuel) de drosophile. Ses suppositions sont confirmées en 1933, par Painter qui remarque des chromosomes géants dans les glandes salivaires de la drosophile qui présentent des alternances régulières de bandes sombres et claires. L'absence de certains gènes entraînant celle de certaines bandes permet de localiser chaque gène et d'obtenir une carte correspondant à l'ordre génétique établi selon les méthodes de Sturtevant. Ainsi, la nature particulière du gène est considérée comme établie. Des biochimistes cherchent alors à préciser sa nature chimique et son mode d'opération grâce notamment à de nouvelles méthodes d'analyse (détermination des structures macromoléculaires par diffraction des rayons X, ultracentrifugation, microscopie électronique, etc.) puis à l'utilisation de nouveaux matériels vivants tels que la levure (Beadle et Tatum, 1941), la bactérie et les bactériophages (Delbrück, 1944). Les années 1940 sont marquées par le rapprochement autour de l'analyse du gène de scientifiques d'origines diverses, biochimistes, généticiens, physiciens. Dans un premier temps on imagine que le gène doit être une protéine qui agit à la manière d'une enzyme, catalytiquement, sur le fonctionnement de la cellule. Beadle et Tatum (1941) établissent que les gènes contrôlent la synthèse des enzymes et que l'on peut mettre en évidence l'existence d'un gène différent pour chaque enzyme. Les tentatives des divers scientifiques aboutissent finalement à la mise en place de la biologie moléculaire lorsque l'ADN est reconnu comme le constituant du matériel héréditaire (Avery, 1944; Hershey et Chase, 1952) portant l'information génétique.

La recherche de modèles particuliers pour expliquer l'hérédité et les phénomènes connexes, expression de la volonté de rupture avec le vitalisme qui se développe à partir de la seconde moitié du XIX^e s., aboutit à la mise en place de la notion de gène puis à la constitution de la biologie moléculaire. Elle a ainsi induit le succès de l'approche réductionniste et la primauté du choix du niveau macromoléculaire (entre organisme et atome) en biologie au XX^e s.

► BOWLER P., *The Mendelian Revolution: the Emergence of Hereditarian Concepts in Modern Science and Society*, Baltimore, Johns Hopkins Univ. Press, 1989. — BUICAN D., *Mendel et la génétique d'hier et d'aujourd'hui*, Paris, Criterion, 1993. — CARLSON E., *The Gene, A Critical History* (1966), Ames, Iowa State Univ. Press, 1989. — FISCHER J. & SCHNEIDER W., *Histoire de la génétique, techniques et théories*, Paris,

ARPEM/Sciences en situation, 1990. — GAYON J., « Quelque temps après, au début du siècle », *Les Cahiers de Science et Vie*, Mendel, juin 1993, n° 15, p. 36-44. — GAYON J. & WUNENBERGER J., *Le paradigme de la filiation*, Paris, L'Harmattan, 1995. — KEVLES D., « Genetics in the United States and Great Britain, 1890-1930: A Review with Speculations », *ISIS*, 1980, vol. 71, p. 441-455. — LENAY C., *La découverte des lois de l'hérédité, Une anthologie*, Paris, Presses Pocket, 1990; « Pré-histoire de la génétique : Hugo de Vries et l'idée d'indépendance des caractères », in BLANCKAERT C., FISCHER J. & REY R., *Nature, Histoire, Société*, Paris, Klincksieck, 1995. — MORANGE M., « De Mendel aux gènes », *Les Cahiers de Science et Vie*, Mendel, juin 1993, n° 15, p. 76-86.

Gilles DENIS

→ ADN; Cellule; Darwinisme; De Vries; Eugénisme; Génération spontanée; Génétique; Information; Mendel; Morgan; Oncogène; Plasma germinatif; Race; Régulation moléculaire; Rétrovirus; Sociobiologie; Vivant (Théorie du); Weismann.

GÉNÉRATION SPONTANÉE

Le problème de la génération de la vie a requis l'attention des premiers philosophes, et depuis les Présocratiques, de Thalès (VI^e s. av. J.-C.) à Socrate (fin V^e s. av. J.-C.), jusqu'à Aristote, la Physiologia ou philosophie de la nature a tenté d'expliquer le « principe » d'où dérivent toutes choses. Ainsi, le premier élément fondateur, l'Arché (qui signifie souche) est l'origine commune de toute chose.

Pour les uns (Ioniens : de Thalès à Héraclite) l'explication rationnelle est à rechercher dans un principe matériel et physique (pour Thalès le principe primordial est l'eau) pour d'autres (les Pythagoriciens), la réalité est faite d'entités numériques, idéales et, le principe unique expliquant toute chose sera davantage d'essence intellectuelle ou spirituelle. Pour Démocrite (~ V^e s. av. J.-C.) « la nature se suffit à elle-même » (Démocrite, B 176; *Les présocratiques*, trad. J.-P. Dumont, D. Delattre & J.-L. Poirier, Paris, Gallimard, 1988) et « tout ce qui se fait a un pourquoi » sans évoquer jamais la cause finale au grand dam d'Aristote pour qui « ceux-là sont dans l'erreur et n'expliquent même pas la nécessité du pourquoi, qui disent : c'est ainsi que les choses se forment toujours » (Aristote, *Génération des animaux*, II, 6, 742b 21-22, p. 77). Démocrite et les Atomistes refusent qu'il y ait une finalité particulière et générale de la nature, une quelconque cause intelligente (*ibid.*, V, VIII, 789 b2). Aristote, « [...] et plus généralement, tous les auteurs qui ne conçoivent point la nature autrement que comme animée par une fin dans la moindre de ses productions — Stoïciens, Pères de l'Église, etc. ont lu de cette même façon Démocrite » (J. Salem, p. 76). Enfin, nous pouvons revenir sur l'acception répandue, entre autres, par la phrase apocryphe placée en exergue de l'ouvrage de Jacques Monod, *Le hasard et la nécessité*, selon laquelle Démocrite déclarait : « Tout ce qui existe est le fruit du hasard et de la nécessité. » Cette « citation » laisserait penser que selon l'Abdérain toute chose

serait produite par accident ou serait le fait d'une exception. Selon plusieurs auteurs (Monod, p. 77-95), *to automaton* (abusivement traduit par « hasard ») signifie chez Démocrite « ce qui se produit de soi-même », que nous pouvons traduire aussi par spontané. *Automaton* désigne à l'évidence chez Démocrite bien autre chose qu'un caprice de la nature, ce qui donne ainsi une tout autre lecture de la phrase citée par J. Monod.

Aristote s'opposera radicalement au mécanisme des Atomistes. « Créateur » de la biologie selon J.-M. Le Blond (Aristote, *Les parties des Animaux*, livre I^{er}, Aubier, 1992), le Stagirite proposera différentes formes de générations, dont la génération spontanée, sorte de mise en forme de la matière. La forme imprègne la structure de la matière, lui donne un ordre durable, une organisation grâce à la chaleur vitale (Aristote, *De la génération des animaux*, I, 8, 718b, 18) qui confère aussi le mouvement. L'acquisition de cette forme selon un processus finalisé conduira au vivant qui peut apparaître « de cette façon, aussi bien dans la terre que dans l'eau... » (*ibid.*, III, 11, 762a, p. 130). Le vivant se distingue de l'objet inanimé par l'existence d'un principe moteur, l'âme, qui aura des destinées diverses au cours de l'histoire de la pensée et finira par peser de tout son poids au cours de l'âge théologique. À partir de la terre, de l'argile, des organismes vivants pouvaient ainsi apparaître spontanément. Cette conception s'accorde avec les mythes et les religions, qui nécessitent l'intervention divine capable de « mettre la main à la pâte », et s'oppose à la notion même d'évolution qui implique des processus de transformation, de développement, de temps, et d'irréversibilité.

Nous devons rappeler ici ce sur quoi repose le créationnisme, théorie selon laquelle le monde et la vie ont été créés par un être surnaturel. L'acte créationniste, ne relevant pas des lois physiques, ne s'inscrit pas dans le temps. Il est caractérisé par la soudaineté et l'immuabilité.

On pourrait d'autre part tenter une analyse du concept de génération spontanée dans le cadre plus vaste de l'analyse de la formation des concepts de développement et d'évolution telle qu'elle fut menée par Canguilhem et ses collaborateurs en 1962. Si cette étude ne peut être faite à l'échelle d'un dictionnaire qui ne peut que poser des jalons pour la compréhension, il faut souligner que l'histoire de la pensée biologique est tout entière façonnée par les problèmes de génération et par les rapports réciproques qui unissent ce concept à celui de développement et à celui d'évolution. Par ailleurs nous sommes, avec les problèmes de génération, au cœur même des liens qui unissent philosophie et biologie.

Malebranche expose dès 1674, date de parution de son premier volume, *De La Recherche de la Vérité*, la théorie des germes préexistants et emboîtés. Partant d'une observation du germe d'un oignon de tulipe, il découvre la tulipe entière déjà formée, et déclara : « [...] tous les arbres sont en petit dans le germe de leur semence... et [ceci] à l'infini ». Il en arrive plus loin à

la conclusion que « [...] tous les corps des hommes et des animaux qui naîtront jusqu'à la consommation des siècles, ont peut-être été produits dès la création du monde ; je veux dire, que les femelles des premiers animaux ont peut-être été créées, avec tous ceux de même espèce qu'ils ont engendrés, et qui doivent s'engendrer dans la suite des temps ».

Préformationniste, il s'était essayé à quelques expériences concernant le poulet et en avait déduit que puisque le poulet est contenu dans l'œuf, le poulet contient encore d'autres œufs qui contiennent d'autres poulets, qui eux-mêmes, etc. Si cela n'est pas visible, c'est que l'on ne dispose pas d'yeux ou de microscopes assez perfectionnés pour le voir. Il fallait supposer cette analyse, c'est-à-dire cette décomposition à l'infini à partir de quelques cas particuliers, sans aucun rapport entre eux, pour définir le fait par exemple qu'Adam et Ève étaient à l'origine de la série humaine. Dans Adam, pour les animalculistes et dans Ève pour les ovistes, était contenue en germe toute l'humanité. Dans l'œuf pour les ovistes (ou ovaristes) d'Ève on trouvait les petits préformés qui contenaient eux-mêmes d'autres petits préformés et ainsi à l'infini.

Ces conceptions se retrouvent encore dans la monadologie de Leibniz et dans la théorie des « mondes possibles » (Leibniz était animalculiste. Il avait découvert les travaux de Leeuwenhoek et les avait présentés à la République des Lettres en Angleterre. Leeuwenhoek n'a jamais écrit en anglais, de ce fait ces travaux n'avaient pas une grande diffusion et n'étaient connus que de quelques spécialistes. Malebranche était oviste, il avait lu Malpighi qui était lui-même oviste). Dieu, lorsqu'il a créé le monde, disposant d'un entendement infini, avait imaginé tous les mondes possibles, compossibles c'est-à-dire possibles en même temps. Dieu, étant suprêmement parfait, a dû choisir le meilleur de tous ces mondes possibles où étaient prévues toutes les suites qui allaient organiser et structurer ce monde. La volonté de Dieu, a actualisé un des possibles. De cette manière a eu lieu selon Leibniz le passage du possible au réel (ce qui conduisait Leibniz à justifier le mal. Si on observe des tremblements de terre, des guerres, etc., cela aurait été pire dans un autre monde. Il allait même jusqu'à dire que le mal était « les ombres » nécessaires pour rehausser la couleur du tableau !). C'est donc un raisonnement homologue à la théorie de la préformation que tient Leibniz : de la même façon que Dieu conçoit tous les mondes possibles et les déroule, tous les germes se trouvent emboîtés dans la structure organique d'Adam ou Ève. Leibniz, critiquant la physiologie de Descartes, propose un « mécanisme à l'infini ». Il utilise la préexistence des germes pour expliquer ce mécanisme, qui entretient, mais ne forme pas. « Les animaux n'étant jamais formés naturellement d'une masse non organique, le mécanisme, incapable de produire de nouveau ces organes infiniment variés, le peut fort bien tirer par un développement et par une transformation d'un corps organisé préexistant » (*Considérations sur les principes de vie et sur les Natures plastiques*, in

Opera Omnia, n° 286, t. II, 1^{re} partie, p. 43, 1705. Voir aussi F. Burbage, « La notion leibnizienne de développement », *Entre forme et histoire*, Paris, Klincksieck « Philosophie Méridiens », 1988).

« Le plus vague est le plus puissant » (G. Bachelard, 1938, p. 184) : il régnait au XIX^e s. une certaine confusion autour de la question des origines de la vie et de la génération spontanée (J. Farley), confusion qui se reflète dans la variété des termes employés pour désigner la même chose à savoir le passage du non-vivant au vivant à travers l'abiogénèse de Huxley, l'autogonie de Haeckel, l'archebiosis de Bastian, etc. Le terme le plus couramment utilisé dans la littérature germanique est *urzeugung* qui signifie littéralement génération primitive (de *Ur*, primitif, primordial, et *Zeugen*, générer, produire). Au XIX^e s., la traduction littérale du terme allemand est « génération spontanée », même s'il est clair dans le contexte qu'un processus graduel est évoqué plutôt qu'une transition soudaine. Par exemple, Lankester traduit une phrase de Nägeli « Die Urzeugung leugnen heisst das wunder verkunden » en « to deny spontaneous generation is to declare miracles ». Cependant Nägeli propose trois étapes dans l'apparition de la vie à partir de la matière inorganique : l'accumulation de matière organique produisant des protéines, l'organisation des protéines dans une espèce de réseau de micelles, et l'individualisation des micelles en probiontes. Cela n'a rien à voir avec la génération spontanée qui suppose une soudaineté de l'apparition de la vie.

Avec la génération spontanée, on pouvait croire que l'on passait soudainement de rien à un organisme complexe. Toutes les étapes qui vont de ce rien à l'organisation sont passées sous silence.

L'Académie des sciences de Paris, en 1860, faisant suite aux déclarations de Félix Archimède Pouchet sur « l'existence de générations spontanées », juge que la question doit être éclaircie. Elle propose de couronner les meilleures expériences par le prix Alhumbert. Dès le mois de février, Pasteur communique ses premiers résultats et fin 1862 l'Institut couronne son mémoire « sur les corpuscules organisés qui existent dans l'atmosphère ». Le débat sera officiellement clos à la suite de la conférence que Pasteur donnera en avril 1864, et au cours de laquelle il affirme avoir définitivement démontré l'inexistence de la génération spontanée.

Pasteur s'était intéressé au début de sa carrière à l'inanimé, aux cristaux, au minéral, à l'asymétrie moléculaire. « Il est difficile de se défendre d'un sentiment de surprise, lorsque, peu de temps après (on a brisé et déformé intentionnellement un cristal, qu'on replace ensuite dans son eau-mère), venant examiner le cristal, on le retrouve avec son aspect naturel, malgré les déformations parfois excessives qu'on lui a fait subir. Beaucoup de personnes aimeraient rapprocher ces faits curieux de ceux que présentent les êtres organisés lorsqu'on leur a fait une blessure plus ou moins profonde. La partie endommagée reprend peu à peu sa forme primitive » (L. Pasteur, *Œuvres Complètes*,

vol. I, p. 289). La polarimétrie révèle pour Pasteur ce qui sépare le minéral et l'organique. Le minéral, le cristal mime le vital. Pasteur en quelque sorte reprend, selon Dagognet (*Pasteur sans la légende*, p. 66-67), le flambeau vitaliste abandonné par Berzélius en faisant sienne cette démarcation radicale de l'organique et du minéral. C'est ce qui lui permet de vaincre la thèse de la génération spontanée quelques années plus tard bien qu'il ne fasse plus part de ces travaux de jeunesse sur l'asymétrie moléculaire.

Louis Pasteur qui déclarait ainsi en 1864 de manière polémique (en réponse aux travaux de F. Pouchet parus dans l'ouvrage *Hétérogénie ou Traité de la Génération spontanée*) : « Quelle victoire cela serait pour le matérialisme s'il pouvait démontrer que la matière pouvait s'auto-organiser et fabriquer la vie toute seule » (L. Pasteur, *Œuvres Complètes*, VII, p. 215). Cette citation illustre, s'il le fallait, les rapports entre auto-organisation de la matière et génération spontanée ainsi que le contexte scientifique, historique et politique de la période où ces problèmes ont commencé à se poser.

Thomas Huxley (1825-1895), grand admirateur des travaux de Pasteur pensait que le protoplasme avait pu évoluer à partir de matière inorganique à une époque de l'histoire de la Terre. Dans un discours à la British Association for the Advancement of Science en 1870, il nommait abiogénèse la génération spontanée, et, bien qu'il fut d'accord avec le fait que toutes les formes connues provenaient d'organismes antérieurs, il pensait qu'un processus d'abiogénèse avait eu lieu par le passé dans les conditions de la Terre primitive. Quand il spéculait sur les origines de la vie à partir de matière inorganique il incluait même avec celle-ci des molécules organiques telles que l'oxalate et le tartrate parmi les matériaux présents sur la Terre primitive (1870). Enfin Huxley prétend découvrir dans des prélèvements effectués en juin 1857 dans l'Atlantique Nord le chaînon manquant entre l'inorganique et l'organique. Ce protoplasme original examiné en 1868 par Huxley et baptisé *Bathybius Haeckelii* ressemble aux *cytodes primitives* de Haeckel et est le plus simple des organismes imaginables (E. Haeckel, *Generelle Morphologie der Organismen*, Berlin, 1866, vol. II).

Les implicites, les imprécisions ont contribué à garder un certain flou dans un domaine où le travail expérimental n'existait pas. « Le plus vague est le plus puissant », et c'est en jouant sur la confusion du terme de génération dans génération spontanée que l'on peut croire que Pasteur a répondu à la question des origines de la vie alors qu'il reprenait le « omnis cellula e cellula » de Virchow (*Pathologie cellulaire*, 1849), toute cellule provient d'une cellule. Nous verrons que dès l'avènement de la théorie cellulaire, le cours des idées sur la génération se trouve bouleversé.

La théorie cellulaire, comme le rappelle Georges Canguilhem, repose sur deux principes fondamentaux : l'élaboration du concept de génération spontanée qu'il s'agit en quelque sorte de déduire à partir d'expériences simples. La génération spontanée est alors conçue comme l'effet d'un déterminisme mécanique et non plus comme l'expression d'une force immanente comme cela pouvait être le cas chez von Baer (Canguilhem et al., *Du développement à l'évolution au XIX^e siècle*, p. 21).

qui concerne la genèse, revendiqué par Virchow, lui vaudra de violentes attaques de la part de biologistes soviétiques du début du XX^e s., et en particulier de la part d'Olga Lepechinskaia, membre de l'Académie des sciences médicales de l'URSS, qui dans son ouvrage *Origine des cellules à partir de la matière vivante* (Moscou, Éditions en langues étrangères, 1955), dénonce cette « [...] théorie mécaniste, qui admet pour principe de base l'immuabilité des formes cellulaires données une fois pour toutes... », et ajoute : « C'est la doctrine de Virchow qui est à la base du weismannisme-morganisme, proclamant l'immuabilité de la substance héréditaire du gène et niant toute influence du milieu sur elle. Les généticiens weismannistes, mendéliens et morganistes prônent les découvertes pseudoscientifiques des savants bourgeois réactionnaires... » (*ibid.*, p. 4-5). On peut se demander, comme le fait remarquer Canguilhem, quel est « l'enjeu d'une telle polémique », et noter qu'il s'agit d'argumenter « contre la théorie de la continuité et de l'indépendance du plasma germinatif. C'est un argument contre Weismann et donc un soutien pour les thèses de Lyssenko sur la transmission héréditaire des caractères acquis par l'organisme individuel sous l'influence du milieu » (« La théorie cellulaire », p. 77).

« Car enfin ce plasma initial continu, dont la prise en considération sous des noms divers a fourni aux biologistes, dès la position du problème d'une structure commune aux êtres vivants, le principe d'explication appelé par les insuffisances à leurs yeux d'une explication corpusculaire, ce plasma initial est-il autre chose qu'un avatar logique du fluide mythologique créateur de toute vie, de l'onde écumante d'où emergea Vénus ? » (*ibid.*, p. 79). On le voit, autour de ces questions d'origine et de génération se croisent les concepts de vitalisme et de mécanisme qui scandent l'évolution de la pensée biologique.

August Weismann, contemporain des biologistes Nägeli et Pflüger, déclare : « Pour moi je l'avoue, la génération spontanée demeure un postulat logique, malgré tous les insuccès des efforts faits pour la démontrer » (*La durée de la vie. Essais sur l'hérédité et la sélection naturelle*). Afin de se mettre à l'abri d'un malentendu, comme il le dira d'ailleurs explicitement dans le texte, August Weismann va tenter une démonstration logique de la nécessité de concevoir la génération spontanée à l'origine de la vie, et ceci à partir de l'hypothèse que ce qui a une fin doit avoir un commencement. On a là une tentative explicite de construction, d'élaboration du concept de génération spontanée qu'il s'agit en quelque sorte de déduire à partir d'expériences simples. La génération spontanée est alors conçue comme l'effet d'un déterminisme mécanique et non plus comme l'expression d'une force immanente comme cela pouvait être le cas chez von Baer (Canguilhem et al., *Du développement à l'évolution au XIX^e siècle*, p. 21).

Bien sûr, nous l'avons vu plus haut, les contemporains de Weismann comprennent, depuis Darwin, la nécessité d'expliquer la première génération dans un

contexte évolutionniste, mais il s'agit toujours de la génération du premier protoplasme. Haeckel, Huxley, Nägeli ou Pflüger considéreraient que la vie était apparue sur Terre à la suite d'une série de réactions chimiques assurant une transition naturelle de la matière inanimée à la matière vivante (cependant Canguilhem cite Claude Bernard pour qui « le protoplasme, si élémentaire soit-il, n'est pas encore une substance purement chimique, un simple principe immédiat de la chimie, il a une origine qui nous échappe, il est la continuation du protoplasme d'un ancêtre ». Ce qui veut dire, écrit Canguilhem qu'« il y a une structure et cette structure est héréditaire »). Pflüger, par exemple, décrit de manière précise le type de réactions chimiques susceptibles de se produire à partir de groupements cyanogènes, présents dit-il sur la Terre primitive, et capables de polymériser pour donner le premier protoplasme. Ce type de spéculation a favorisé l'émergence de ce que l'on appelle l'évolution chimique (l'expression « évolution chimique » apparaît pour la première fois, semble-t-il, dans l'ouvrage du biochimiste Benjamin Moore, *The nature and origin of life*, 1913) qui s'est intégrée dans le développement de la recherche biochimique sur les origines de la vie. Mais ces théories, que les Anglo-Saxons appellent « evolutionary abiogenesis », sont limitées par le fait que toutes les propriétés vitales reposent sur le fonctionnement du protoplasme, qui bien que complexe, n'est qu'une substance homogène et indifférenciée, protoplasme « moniste » qui de plus est en continuité physico-chimique avec l'environnement physique. Or, les études cytologiques révèlent, nous le savons, l'existence d'une substance cellulaire hétérogène, et une relative autonomie du noyau au cours de la division cellulaire. Weismann va rompre avec cette tradition du protoplasme : « Comme le terme de protoplasme est utilisé dans un sens trop vague, [...] j'appelle la substance vitale de la cellule le "plasma formateur" ou morphoplasme par opposition à l'idioplasme. Ce dernier est l'élément actif du processus de formation, et le précédent l'élément passif » (Weismann, *The germ-plasm*, trad. angl. N. Parker, 1892, p. 38 ; la trad. fr. est de nous). Cela nous amène à penser à la conception aristotélicienne de la matière et de la forme, du corps et de l'âme ; l'âme, élément actif animant la matière considérée comme l'élément passif. Mais alors que pour Aristote la vie est sa propre fin, c'est la sélection naturelle qui remplacera chez Weismann la cause finale. « D'après le principe de la sélection, la vie des individus a donc dû se raccourcir – en admettant qu'ils aient été immortels à l'origine – de la durée qui était sans utilité pour l'espèce ; elle a dû se réduire à la durée qui présentait les chances les plus favorables pour l'existence simultanée d'un nombre aussi considérable que possible d'individus sains » (*ibid.*, p. 22).

Avec la continuité du plasma germinatif, sa séparation du reste de la cellule, et une conception nouvelle de l'hérédité, Weismann disposait de tous les outils conceptuels pour poser, le premier, le problème de la génération d'une substance héréditaire, et cela à partir

de ces particules de matière qui portent un arrangement particulier, les biophores. Il les conçoit comme des « starters » capables de reproduction immédiatement après leur origine, puis qui seront ensuite soumis au cours du processus héréditaire à l'évolution par le biais de la sélection naturelle. « L'ancêtre, dit François Jacob (1970, p. 326), ce ne pouvait d'abord être qu'une sorte de noyau, une association de quelques molécules, s'aidant l'une l'autre à se reformer tant bien que mal. » Ce qui ressemble bien à la fabrication de ce que nous nommons en termes modernes la première molécule autorépliquative soumise à la sélection darwinienne, et dont la synthèse est aujourd'hui classique dans les laboratoires (connu sous le nom d'évolution moléculaire dirigée). « Si, dans le but d'expliquer la vie sur terre, nous supposons que les biophores sont apparus une fois par génération primitive, ils ont dû être capables de reproduction par division immédiatement après leur origine, car une telle multiplication est le produit des forces de vie élémentaires, assimilation et croissance. On peut seulement imaginer que les biophores très simples ont été produits par une génération primitive : tous les biophores suivants, plus complexes, sont le produit d'une adaptation aux nouvelles conditions de vie ; ils ont dû se développer graduellement, soumis à la coopération continue de l'hérédité et de la sélection... » (Weismann, 1892, p. 47-48). Et plus loin dans le même paragraphe, Weismann insistera sur le fait qu'une fois cette génération primordiale créée « spontanément », chaque cellule provient d'une autre cellule, chaque noyau d'un autre noyau : « Ils peuvent, donc, seulement provenir d'autres comme eux, et ne peuvent pas être formés spontanément. Cela est confirmé par l'expérience. Non seulement une cellule vient toujours d'une cellule, et un noyau d'un noyau... » (Weismann, *ibid.*).

Considéré sous l'aspect heuristique, il est intéressant de suivre le devenir des concepts élaborés par Weismann. Nous verrons qu'ils constituent les éléments d'une rupture épistémologique décisive dans la manière d'appréhender la question des origines de la vie au début du XX^e s. La génération spontanée chez August Weismann n'est plus l'effet d'un déterminisme mécanique strict tel qu'on pouvait le concevoir avec la théorie protoplasmique. Un concept moderne apparaît chez Weismann, en rupture avec le courant biochimique, et qui s'appuie sur la continuité génétique nécessaire à la conservation de la première forme et qui est explicitement liée à l'évolution biologique. On peut alors penser les origines de la vie dans un contexte évolutionniste. Le premier organisme vivant distinct de son environnement par sa propre action, c'est l'extension moderne de la génération spontanée. Elle est l'expression d'une sorte d'auto-organisation de la matière qui a comme premier caractère la spontanéité.

La controverse sur la génération spontanée repose désormais sur ceux pour qui la vie est apparue graduellement à la suite d'un long processus et ceux pour qui la vie est apparue avec le gène (Muller H.J., *The gene as*

the basis of life), seule molécule vivante caractérisée par la capacité de se reproduire, de muter et de produire les enzymes métaboliques. Aujourd'hui la génération spontanée n'est plus simplement le syntagme figé qui a nourri l'histoire de la pensée biologique depuis des siècles. L'expérimentation actuelle repose sur le postulat établi selon lequel toute vie provient de la vie, et non de la mort, et que la vie a pu émerger à partir d'un monde chimique soumis, à l'échelle moléculaire, à une évolution de type darwinien (W. Fox *et al.*, 1957, 328-337 ; W. Fox, 1962).

► ARISTOTE, *Génération des animaux*, éd. P. Louis, Paris, Les Belles Lettres « CUF » ; *Les parties des animaux*, Paris, Aubier, 1992. – BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1938. – CANGUILHEM G., « La théorie cellulaire », *La connaissance de la vie*, Paris, Vrin, 1992. – CANGUILHEM G., LAPASSADE G., PIQUEMAL J. & ULMANN J., *Du développement à l'évolution au XIX^e s.*, 2^e éd., Paris, PUF, 1985 (Recueil des travaux de l'Institut d'hist. des sciences et des tech. de l'Univ. de Paris, in t. XI, revue *Thalès*, 1962). – DAGOGNET F., *Pasteur sans la légende*, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1994. – FARLEY J., *The Spontaneous generation controversy – from Descartes to Oparin*, Baltimore/Londres, 1977. – FOX S.W., « Une théorie chimique de la génération spontanée », in *L'origine de la vie*, Textes choisis et préfacés par M. Florin, Paris, Gauthier-Villars, 1962. – FOX S.W., VEGOTSKY A., MARADA K. & HOAGLAND P.D., « Spontaneous generation of anabolic pathways protein and nucleic acid » (1957), *Annals N.Y. Acad. Sci.*, 69. – HUXLEY T.H., *Biogenesis and Abiogenesis* (1870), in *collected Essays*, Londres, vol. 8, p. 256, 229-271. – JACOB F., *La logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970. – LANKESTER E.R., « Ernst Haeckel on the mechanical theory of life and on spontaneous generation » (1871), *Nature*, 3, 354-356. – MONOD J., *Le hasard et la nécessité*, Paris, Le Seuil, 1970. – MULLER H.J., *The gene as the basis of life* (1926), in *Studies in genetics : The Selected papers of H.J. Muller*, Bloomington, Indiana Univ. Press, 1962. – PASTEUR L., *Œuvres complètes*, Paris, 7 vol., 1922-1939. – POUCHET F.A., *Hétérogénéité ou Traitée de la génération spontanée*, Paris, Baillière, 1859. – SALEM J., *Démocratie*, Paris, Vrin, 1996. – WEISMANN A., *La durée de la vie. Essais sur l'hérédité et la sélection naturelle* (1887), trad. fr. H. de Varigny, Paris, C. Reinwald & Cie, libraires-éditeurs, 1892.

Marie-Christine MAUREL

→ Cellule ; Micro-organisme ; Origines de la vie ; Pasteur contre Pouchet ; Plasma germinatif ; Spallanzani.

GÉNÉTIQUE

La rupture mendélienne

Le terme « génétique » fut proposé en 1905 par William Bateson pour désigner la science de la transmission héréditaire. La nouvelle science se caractérisait par une méthodologie fondée sur les lois de Mendel. Le mendélisme a de fait constitué une rupture majeure dans l'histoire du concept d'hérédité. L'hérédité pré-mendélienne est quasiment synonyme de « descendance » : le concept d'hérédité ancestrale, très en vogue vers 1900, est une élaboration typique de cette synonymie, car il présente l'hérédité d'un individu

comme sommation des influences reçues de tous les ancêtres. La problématique mendélienne ne s'intéresse pas à l'ancestralité, mais à la structure génotypique des individus. Le génotype des parents est inféré du résultat de leur croisement (sur au moins deux générations). À partir du génotype d'une génération parentale, le généticien peut déduire la structure en probabilité des générations ultérieures. Le point important à saisir est qu'une fois connue la structure génotypique des parents, la question de l'origine de leurs caractères est non pertinente pour la connaissance de la structure génotypique de la progéniture. L'ancestralité ou ascendance est indifférente.

Le rôle de la quantification dans la génétique mendélienne est souvent incorrectement compris. Ce n'est pas le simple fait de mathématiser qui a produit la rupture. L'approche biométrique de l'hérédité, fondée à la fin du XIX^e s. sur le concept d'hérédité ancestrale, était en réalité beaucoup plus exigeante en termes d'instrumentation mathématique, en particulier du point de vue de l'approche probabilitaire et statistique. Les biométriciens (Galton, Weldon, Pearson) s'efforçaient de mesurer l'hérédité par des coefficients de corrélation parents-enfants, qui n'ont pas vocation d'expliquer, mais de résumer et classer des données d'expérience. L'horizon épistémologique de la génétique est tout autre. L'analyse statistique y est mise au service d'un schéma explicatif fondé sur l'hypothèse des gènes, c'est-à-dire d'authentiques entités théoriques, inaccessibles en tant que telles à une observation directe. Ce caractère hypothétique de l'appareil conceptuel mendélien en fait la fécondité : à la différence de la théorie de l'hérédité ancestrale la génétique mendélienne permet d'effectuer des prévisions au-delà de la génération présente (c'est-à-dire de la dernière pour laquelle on dispose des données). La théorie génétique de l'évolution est d'ailleurs tout entière fondée sur cette capacité théorique.

Un statut cognitif mouvant

Trois périodes peuvent être distinguées dans l'histoire de la génétique. La phase proprement mendélienne (1900-1915) est entièrement fondée sur l'analyse des produits de croisements ; c'est une algèbre qui permet d'inférer l'existence d'unités hypothétiques (les gènes) dont le statut physique est par ailleurs inconnu. La théorie chromosomique de l'hérédité (Morgan *et al.*, 1915) domine de 1915 à 1950 environ. Les gènes y acquièrent une intelligibilité topologique : ils sont localisés sur les chromosomes, et situés les uns par rapport aux autres. Ceci ne signifiait pas pour autant que les gènes fussent des particules matérielles bien définies. Jusque dans les années 1950, le gène demeure une entité dont on ne connaît pas les caractéristiques physiques (taille, poids, forme), dont on ne sait pas si c'est un organoïde complexe, une molécule, un réseau moléculaire instable, ou un cycle d'états physiologiques, et dont on ignore totalement le mécanisme par lequel il produit son effet. « Au niveau où se situent les

expériences génétiques, cela ne fait pas la moindre différence que le gène soit une unité hypothétique, ou qu'il soit une particule matérielle. Dans les deux cas, l'unité est associée à un chromosome spécifique, et peut être localisée par une analyse purement génétique» (Morgan, 1934). Dans une troisième phase (après 1950), la génétique devient moléculaire et élucide la nature physico-chimique du gène ainsi que son mode d'action : le gène est alors défini comme un segment d'ADN dont les nucléotides codent la séquence des acides aminés d'une protéine.

La leçon épistémologique de cette histoire semble à première vue transparente : le gène aurait cessé d'être une entité théorique invisible pour devenir une chose physique accessible à l'observation. De fait, au cours du XX^e s., les généticiens ont modifié leur appréciation du statut cognitif de leurs théories. Avant 1950, la plupart se cantonnait dans une vision opérationnaliste du gène, une simple « unité de calcul » qui ne vaut que par les prédictions qu'il autorise. Au-delà de 1950, les clauses de prudence méthodologique s'estompent, et c'est clairement une attitude épistémologiquement réaliste qui l'emporte : les gènes deviennent de banales molécules dont l'existence physique est évidente.

L'évolution récente de la génétique moléculaire depuis 1980 environ ne conforte cependant pas cette position philosophique. Le généticien moléculaire d'aujourd'hui observe et manipule sans doute des objets physiques (molécules) dont il connaît la structure et le fonctionnement avec une très grande précision. Mais le gène n'a plus l'évidence matérielle qu'il avait à l'époque héroïque de la biologie moléculaire. L'on connaît désormais de nombreux phénomènes qui invalident la définition structurale du gène comme segment d'ADN codant de manière univoque une séquence protéique. Chez les eucaryotes (c'est-à-dire chez la plupart des organismes vivants) les gènes sont morcelés : des séquences muettes (introns) alternent avec des séquences codantes. La séquence codante n'est à proprement constituée qu'au niveau de l'ARN-messager, à l'issue d'un processus d'épissage (i.e. découpage-rabotage du transcrit primaire en un ARN-m mûr). Or il arrive assez souvent qu'un même ADN donne plusieurs ARN-messagers différents, codant pour des protéines différentes, l'épissage pouvant se réaliser de plusieurs manières (épissage alternatif). Il devient alors difficile de dire où et quand le gène existe, et en quoi il consiste physiquement : est-ce la séquence chromosomique d'ADN, ou la séquence mûre d'ARN-messager ? Dans le premier cas, il y a plusieurs gènes pour une séquence d'ADN ; dans le second, il faut admettre que le gène est une structure transitoire. De nombreux autres phénomènes contribuent aussi à ébranler la vision du gène comme entité matérielle bien définie : gènes chevauchants, déplacement de la phase de lecture, modification post-transcriptionnelle des ARN-messagers (poly-adénylation), etc. (Gros, 1986). En définitive, la question de savoir si quelque chose est ou non un gène dépend de l'état de la cellule, et par conséquent de la situation dans laquelle l'expérimentateur se

place. L'on est alors contraint d'admettre que le « gène » n'a pas d'autonomie ni d'existence physique et substantielle, et que ce qui existe vraiment au niveau moléculaire ce ne sont pas des atomes géniques autonomes et substantiels mais une dynamique du génome en interaction avec son environnement cellulaire (Rheinberger, 1995). Une telle situation signifie que le gène est plus que jamais dans la science d'aujourd'hui une idéalisation théorique, dont on pourrait en toute rigueur se passer dans la description moléculaire des phénomènes. La justification principale du concept de gène est aujourd'hui pragmatique : c'est un terme commode, qui schématise de puissantes prédictions et manipulations. De là, bien sûr, son immense succès populaire, au moment même où le laboratoire montre que le concept a perdu sa clarté théorique.

► BURIAN R.M., « On Conceptual Change in Biology : The Case of the Gene », in DEWEY D.J. & WEBER B.H. éd., *Evolution at a Crossroads - The New Biology and the New Philosophy of Science*, Cambridge (Mass.), MIT Press, p. 21-42. — DUNN L.C., *A Short History of Genetics*, New York, Mac Graw Hill, 1965. — GAYON J., « De la mesure à l'ordre : histoire philosophique du concept d'hérité », in PORTE M. éd., *Passion des formes (hommage à René Thom)*, Paris, ENS Éd. Fontenay St-Cloud, 1994, p. 629-645. — GROS F., *Les secrets du gène*, Paris, Odile Jacob, 1986. — MORGAN T.H., « The relation of genetics to physiology and medicine » (conférence Nobel, 4 juin 1933), *Nobel lectures... : Physiology and Medicine, 1922-1941*, Amsterdam, Elsevier, 1934, p. 315-316. — MORGAN T., STURTEVANT A., MULLER H. & BRIDGES C., *The Mechanism of Mendelian Heredity*, New York, Henry Holt, 1915. — RHEINBERGER H.J., « Genes : A Disunified View from the Perspective of Molecular Biology », in BEURTON P.J., LEFÈVRE W. & RHEINBERGER H.J. éd., *Workshop Gene Concepts and Evolution (6-7 January 1995)*, Berlin, Max-Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte, Preprint n° 18, p. 7-13.

Jean GAYON

→ ADN ; Bioéthique ; Biotecnologies ; Clonage ; De Vries ; Embryogenèse ; Eugénisme ; Gène ; Génération spontanée ; Hybride ; Information ; Jacob ; Mendel ; Morgan ; Nature ; Plasma germinatif ; Race ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Sociobiologie ; Téléologie ; Théorie ; Virus.

GÉNIE GÉNÉTIQUE → Bioéthique ; Biotecnologie

GÉOCENTRISME

Le géocentrisme désigne un moment dans l'histoire des sciences caractérisé par un système d'explications théoriques et scientifiques dans l'histoire de la cosmologie et de l'astronomie, un concept de système et d'organisation des sciences, et, vu la nature de celui-ci, une attitude philosophique. Il faut souligner le fait que c'est d'abord à travers la mise en place d'une cosmologie comme science du tout en tant que tel que le savoir scientifique s'est construit. Les formes à travers lesquelles une science du tout s'est constituée peuvent être décrites comme un développement conceptuel à

partir d'un observateur qui s'est posé comme central corrélatif de la mise en évidence de la structure de l'univers. C'est la nature de cette constitution qui explique la forme géocentriste que les abstractions qui donnent prise tant sur nos modes de pensée que sur le monde ont acquises.

Le géocentrisme signifie d'abord que l'univers est organisé autour de la terre située en son centre et immobile en ce centre. Cette position est elle-même argumentée, sous la forme de réfutation des suppositions inverses. Les argumentations les plus marquantes sont celle d'Aristote dans le *Traité du Ciel*, puis de toute une histoire qui n'a fait que raffiner ces démonstrations, lesquelles se sont adaptées aux restes des corps de doctrine philosophique dont elles font partie. L'ensemble se trouve reformulé dans l'*Almageste* de Ptolémée (II^e s. apr. J.-C.), explicitement dans le livre I et implicitement dans toutes les conséquences astronomiques qui en sont tirées.

Les arguments directement physiques — en apparence — disent que si la terre était en mouvement toutes ses parties le seraient mais elles ne pourraient pas alors être soumises au mouvement vers le centre qui les entraîne. En particulier les corps pesants, formés des éléments terre et eau, tendent vers le centre de l'univers qui est aussi le centre de la terre. Cet argument a été longuement commenté et Galilée, par exemple, a souligné son caractère circulaire. Mais il faut y voir plutôt un énoncé interchangeable avec celui qui est sa conséquence : Aristote se livre à une description de l'univers. Il en est de même de l'argument non moins célèbre selon lequel les corps pesants tombent sur la terre en formant des angles perpendiculaires à la tangente à sa surface et donc en tendent vers le centre de celle-ci. La Terre, de plus, se portant naturellement vers le centre (le feu, lui, en sens inverse) l'ensemble de ces parties ne peut donc pas se mouvoir hors du centre. Citons cet argument extrêmement célèbre : si la terre se mouvait les corps lancés à la verticale ne retomberaient pas au même endroit. Ces énoncés témoignent en négatif du manque des concepts qui organisent la physique dite classique (mouvement inertial, repère d'inertie). Mais le géocentrisme est justifié également à l'aide d'arguments de nature plus directement cosmologique et en rapport avec la possibilité même d'une mathématisation de l'univers.

D'abord — et c'est une marque de nos modes de compréhension et des formes de constitution de nos idéalités mathématiques — l'univers est sphérique. La sphère est une des façons dont nous sommes entrés dans la constitution d'une astronomie mathématique, car, lié à son concept dont nous sommes loin d'avoir épuisé aujourd'hui les virtualités, se trouve construit celui du cercle et de ses fonctions, celui de continuité, rendue possible par le mode de synthèse qu'implique le cercle et surtout celui de périodes qui a permis la construction des repérages de tous les mouvements de l'univers. Si bien que le géocentrisme prend la forme d'une description des mouvements planétaires sur la base d'une théorie de la sphère. Le monde aristotélicien

est décrit et compris comme un système de sphères homocentriques : une sphère centrale et immobile au centre du monde, la sphère de la terre, et un ensemble de systèmes de sphères — un système pour chacune des planètes dont le parcours apparaît comme concentrique à la terre. Ce système se doit de rendre compte de phénomènes dont l'apparition est irrégulière. Le fait de reproduire ces parcours à l'aide de mouvements sphériques qui se composent permet d'en donner une description et, pour les Grecs, une explication : la combinaison de mouvements sphériques « sauve » les phénomènes en les insérant dans un système de mouvements réguliers périodiques et leur redonne ainsi une signification cosmologique. Et l'usage des sphères vaut en quelque sorte pour lui-même, quels qu'aient pu être par la suite les différents raffinements que ces systèmes de sphères ont dû subir. Ces combinaisons de mouvements sphériques emboîtés ont également pour objectif de rendre compte d'une apparence qui est précisément due pour une bonne part à notre croyance en notre situation d'immobilité au centre du monde : les parcours en « boucles » que semblent accomplir les mouvements planétaires. Les planètes semblent en effet, au cours de leur trajectoire le long de l'écliptique, d'abord adopter le sens direct puis stationner, ensuite rétrograder, de nouveau stationner et enfin reprendre le sens direct.

La combinaison de mouvements sphériques est à même de reproduire ces mouvements en boucles. Enfin les sphères ont un rôle porteur : elles expliquent que les parcours se situent dans des plans relativement stables, bref elles tiennent lieu des explications dynamiques. Le fait que les sphères possèdent toutes ces propriétés cosmologiquement satisfaisantes trouve son expression accomplie dans l'éloge métaphysique et cosmologique qu'Aristote fait de la sphère et dans les arguments de nature géométrique qui sont censés justifier l'usage de la sphère : c'est une figure qui possède la surface minimale pour un volume maximal. Il est donc normal de lui conférer une signification cosmologique. N'oublions pas que la sphère fait de l'univers un univers fini, dont nous pouvons donc connaître la totalité.

Il est d'une importance extrême que ces sphères puissent accomplir leur mouvement de manière continue et uniforme par rapport à un axe central de la sphère. Le géocentrisme est étroitement lié à ces modes de constitution de l'abstraction cosmologique et astronomique. Bien plus, la sphère semble pouvoir représenter une sorte de mouvement d'idéalisation à partir d'un observateur central et immobile. Elle concentre cette forme d'unité de mouvement et de repos sans laquelle il n'est pas d'explication possible des phénomènes physiques.

Si le géocentrisme a pu se constituer comme une idéalisation sphérique, il repose aussi sur des arguments de type perceptif, obstacle à toute hypothèse du mouvement de la terre : tous les observateurs ont constaté que s'ils se déplaçaient ils devraient percevoir sur le plan observationnel des effets de ce mouvement :

nous ne devrions pas voir les étoiles présenter la même configuration géométrique quelle que soit la position que nous occupons au cours de ce parcours supposé. L'explication de cette imperceptibilité provient de ce que l'univers est beaucoup plus grand que n'ont pu le croire les astronomes géocentristes. Mais le fond que nous appellerions physique, en référence à la physique classique dont la base reste un nœud d'arguments reposant sur des principes de conservation, en particulier le concept de système inerte du géocentrisme, reste l'exigence d'un enregistrement direct des effets de notre mouvement qu'aucune physique n'est à même de fournir. Cette exigence se fonde elle-même sur un concept de mouvement dont l'essentiel réside dans sa fonction explicative d'une certaine sorte de changement qu'Aristote appelle local. Le repos de la terre correspond au système conceptuel qui rend possibles l'appréhension et la compréhension du phénomène que nous appelons mouvement. Celui-ci est passage de la puissance à l'acte, ou acte de la puissance en tant qu'elle est en puissance. Il accomplit ainsi sa fonction ontologique de remise en ordre. Et il est l'union d'un moteur et d'un mobile, d'où la réponse impossible à la question de la mise en mouvement de la terre dont la masse est gigantesque.

Le géocentrisme, qui concentre la systématisme des explications du mouvement et du repos, suppose donc aussi une hétérogénéité de l'univers. Celui-ci est divisé en deux régions : la région sublunaire et la région supralunaire qui est située au-delà de la sphère de la lune. Ces deux mondes se distinguent parce que les mêmes phénomènes et les mêmes explications n'y ont pas cours. Sous la lune les seuls mouvements simples et principiels sont ceux qui vont du centre vers l'extrémité ou de l'extrémité vers le centre. Et seuls ces mouvements – en ligne droite – peuvent pour Aristote être contraires l'un de l'autre. Au-delà de la sphère de la lune, en revanche, les mouvements ne sont que circulaires. Et ils sont éternels parce que naturels. Les astres de nature divine se réalisent indéfiniment par le mouvement circulaire. Les mouvements planétaires sont donc combinaisons de mouvements sphériques ou circulaires si on les situe dans un plan, et plus on s'éloigne de la sphère de la lune, ou plus on se rapproche donc de la dernière sphère ou sphère des étoiles fixes dite aussi sphère ultime, plus le mouvement redevient simple : celui de la dernière sphère est un pur mouvement d'une sphère sur elle-même. Cette coupure de l'univers en deux régions relativement hétérogènes a constitué un des obstacles principaux à la constitution d'une physique terrestre et d'une physique céleste, ces deux physiques supposant avant toute chose la construction d'un univers homogène ou au moins dont les régions puissent relever d'explications physiques homogènes.

Le géocentrisme s'est trouvé donc unifier, dans un premier temps, aussi bien les modes d'explication cosmologiques et physiques de l'univers que, de façon indirecte, ce qui relevait de la physique terrestre. Le raffinement de l'observation et l'incompatibilité du

modèle des sphères homocentriques avec l'observation de variations de distances entre les planètes ont obligé les astronomes à adopter un autre système géocentriste, celui des sphères déferentes et épicycliques. Ce système est exposé de façon complète dans l'ouvrage qui est à la base de toute l'astronomie et qui synthétise toutes les connaissances mathématiques et astronomiques de l'Antiquité : l'*Almageste* de Ptolémée ; cette forme de géocentrisme se caractérise par le fait que si la terre se situe au centre de l'univers délimité par la sphère des étoiles fixes, en revanche elle est excentrée de diverses manières par rapport aux systèmes des mouvements qui rendent compte des trajectoires planétaires. D'une part l'observateur n'est pas au centre des mouvements planétaires, et d'autre part ceux-ci sont le résultat de combinaisons de mouvements circulaires, un petit cercle appelé épicycle portant la planète, se mouvant sur un grand cercle appelé déferent. Ce système peut être modifié pour approcher à l'aide de combinaisons de mouvements circulaires les parcours plus ou moins compliqués des planètes. Le type de description que l'astronomie mathématique ptoléméenne inaugure est à la base de la rationalité occidentale : citons le fait que le mouvement soit conçu sous la forme d'une dépendance fonctionnelle du temps, ce qui fait de celui-ci une variable indépendante. Le travail complet et explicite sur les différentes périodes qui permettent les descriptions de tous les mouvements de l'univers et des planètes. Le modèle a dû différer la résolution des questions de nature physique sous-jacentes à la réalité mathématique du modèle. En particulier – ce fut un des reproches majeurs qu'on lui a faits – il a renoncé à l'obligation de construire un mouvement circulaire uniforme par rapport au centre du cercle sur lequel un parcours s'effectue, en ajoutant un fameux point dit équin ou centre d'uniformité situé hors du centre du cercle. Ce point a été à l'origine de nombreuses modifications des modèles géocentristes, en particulier dans l'astronomie arabe. Il a été presque impossible au système géocentriste de retrouver une unité cosmologique et astronomique avant d'être supplanté par d'autres systèmes.

Le géocentrisme – cosmologique, physique et astronomique – étant donné la place qu'occupent ces différentes sciences, représente aussi une attitude philosophique. Les catégories ou les formes de rationalité sont vues comme organisant en soi notre univers indépendamment des conceptions que nous en avons. Nous avons affaire au constat d'une structure d'ordre donnée qui organise le monde, couplé avec un réalisme empirique de la perception. Mais le fait de se constituer comme centre sans parvenir à une explicitation satisfaisante de cette constitution possède une signification plus structurante. Nous aspirons à être au centre de tout ce qui est, tant de nous-mêmes que du monde extérieur de la nature ou de la société. Mais il se trouve que cette aspiration peut se réaliser sous des formes différentes.

Ses réalisations permettent sous des modalités distinctes la construction d'abstractions théoriques. Univers sphériques ou circulaires et description à partir

d'un centre constitué des phénomènes cinématiques ou géométriques. En même temps cette forme qui se trouve à la base de nos géométries elles-mêmes développées à partir d'hypothèses cosmologiques et de concepts nécessaires à l'astronomie mathématique a dû se décomposer pour se déplacer et se recomposer autrement quand la physique classique s'est construite.

Mais on oublie trop souvent le fait que des éléments du géocentrisme ont été transposés dans un autre cadre pour que la géométrie et la physique classiques se développent. Tel est le cas, entre autres, du concept de sphère. Mais il y a plus. L'organisation abstraite géocentrique s'est, à des titres divers, transportée dans la formation des systèmes philosophiques. Le rôle de la sphère terrestre s'est trouvé alors joué par la subjectivité philosophique dont nombre de formes et de propriétés avaient pu être construites grâce à la sphère terrestre et à l'organisation cosmologique géocentriste. Avec cette différence de taille que l'assignation d'un centre du monde ainsi que du mouvement et du repos dépend d'un acte théorique décisif de la subjectivité théorique qui a été dégagée de l'ordre de la nature.

Le fait que l'organisation reste géocentriste mais que les constructions théoriques cessent de l'être témoigne d'une disjonction entre la pensée vécue et la théorie que Husserl – fondateur de la phénoménologie – a refusée et qui lui a fait écrire ce texte étonnant : la terre ne se meut pas. Il y prône ce que j'appelle contre lui un géocentrisme fondamental. Il distingue le sol originaire base de notre être qui, lui, est immobile en un sens fondamental, et la terre comme corps physique. C'est seulement à partir de ce géocentrisme d'un sol immobile originaire qu'une constitution de l'espace est, selon Husserl, possible. Elle exclurait toute forme de relativité qui implique la fin fictive et illusoire de tout ancrage de nous-mêmes au monde.

Ce que nous indique le géocentrisme, tant dans ses formes philosophiques que cosmologiques – surtout dans les transformations, transfert, déplacement que l'histoire des sciences et de la philosophie lui fait subir –, est qu'il constitue une base négative de construction et de nos modes de subjectivité et même de nos hypothèses cosmologiques même les plus élaborées. Cette base est probablement irréductible, c'est sans doute ce qu'est parvenu à nous enseigner Husserl. Mais c'est aussi ce que dit la cosmologie moderne de notre attachement à la terre : on pourrait aller jusqu'à prétendre que si nous partons dans d'autres galaxies il nous faudra certainement emporter la terre.

- ARISTOTE, *Traité du Ciel*, Paris, Les Belles Lettres, 1965. – DELAMBRE J.B., *Histoire de l'astronomie ancienne*, Paris, 2 vol., 1817. – DREYER J.L.E., *A history of Astronomy from Thales to Kepler*, repr., New York, 1953. – DUHEM P., *Le système du monde. Histoire des doctrines cosmologiques. De Platon à Copernic*, Paris, Hermann & Fils, t. I-IV, 1913-1917, t. VI-X, 1954-1959. – HARTNER W., *Oriens-Occidens, Ausgewählte Schriften zur Wissenschaft- und Kulturgeschichte*, Hildesheim, 1968. – HEATH T.L., *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus*, Oxford, 1913. – HUSSERL E., *La Terre ne*

se meut pas, trad. fr. D. Franck, Paris, 1988. – LAPLACE P.S., *Exposition du système du monde*, Paris, An IV 1796. – MERLEAU-PONTY J., *Les trois étapes de la cosmologie*, Paris, R. Laffont, 1971 ; *Cosmologie du xx^e s.*, Paris, Gallimard, 1965. – NEUGEBAUER O., *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, Berlin/Heidelberg/New York, 3 vol., 1975. – PTOLÉMÉE, *Almageste, Composition mathématique*, trad. Halma, Paris, Hermann, 2 vol., 1927 ; *Ptolemy's Almagest*, trad. angl. G.J. Toomer, Londres, Duckworth, 1984. – SZCZECINIARZ J.J., *La Terre immobile*, à paraître. – TOOMER G.J., « Ptolemy », *Dictionary of Scientific Biography*, XI, 1975 ; « Hipparchus », *ibid.*, XV, 1978. – WHITEHEAD N., *Process and Reality*, New York, 1929 ; *The concept of Nature*, Cambridge, 1935.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Copernic ; Héliocentrisme ; Marées ; Ptolémée.

GEOFFROY SAINT-HILAIRE Étienne, 1772-1844

Naturaliste français. Les portes d'une grande carrière s'ouvrirent pour Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, né à Étampes, lorsque sur la recommandation de Daubenton, il fut nommé sous-démonstrateur au Cabinet d'histoire naturelle du Jardin des Plantes, puis professeur de zoologie, en juin 1793, au Muséum d'histoire naturelle, que Lakanal venait de fonder. Les titres de ses principaux ouvrages, *Philosophie anatomique* (1818-1822), *Principes de Philosophie zoologique* (1830), *Études progressives d'un naturaliste* (1835), témoignent de sa volonté de donner une portée générale à ses travaux d'anatomie comparée et de tératologie. Autant Cuvier se veut proche des faits, autant Geoffroy Saint-Hilaire se plaît aux vastes hypothèses. Entre les deux savants, et amis, la controverse éclata le 28 février 1830. Elle est demeurée fameuse. Guidé par son idée fondamentale, celle de l'unité de plan ou d'organisation de tous les animaux, Geoffroy Saint-Hilaire, voulait trouver à tout prix des ressemblances entre animaux éloignés. Cette obstination le porta à quelques méprises, notamment lorsqu'il passa des Vertébrés aux Mollusques soulevant alors l'opposition, justifiée, de Cuvier. Le débat ne portait donc pas directement sur le transformisme, qui en constitue pourtant l'horizon. Cuvier est fixiste. Geoffroy Saint-Hilaire, convaincu que tous les animaux ne diffèrent entre eux que par la disposition et la complexité des organes, souligne les analogies qui les rapprochent et accepte la possibilité d'une transformation des espèces au fil du temps, en la référant à l'action directe des milieux ambiants, particulièrement intense dans le passé. Son œuvre illustre ainsi le long processus d'assimilation des thèses transformistes lamarckiennes.

- CANGUILHEM G. et al., *Du développement à l'évolution au XIX^e siècle*, n° spécial de *Thalès*, t. 11, 1960. – JACOB F., *La logique du vivant. Une histoire de l'hérédité*, Paris, Gallimard, 1970. – LE GUYADER H., *Théories et histoire en biologie*, Paris, Vrin, 1988. – MAYR E., *The growth of biological thought. Diversity, Evolution and Inheritance*, Harvard Univ. Press, 1982. – PIVETEAU J., « Le débat entre Cuvier et Geoffroy Saint-Hilaire sur l'unité de plan et de composition », *Rev. hist. sc.*, 3,

1950. — ROSTAND J., *Esquisse d'une histoire de la biologie*. Paris, Gallimard, 1945. — TORT P., « Geoffroy Saint-Hilaire et Cuvier », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996.

Jean Paul THOMAS

→ Affinité; Anatomie comparée; Cuvier; Embryogenèse; Monstre.

GÉOMÉTRIES

Origines

Il est particulièrement difficile d'assigner une origine historique précise à la géométrie, si l'on entend par là un simple savoir non nécessairement théorisé quant aux objets de l'espace. Faut-il ainsi qualifier de géométriques les phénomènes de symétrie rencontrés dans certaines figures, certains dessins primitifs ? Il y a là un problème d'interprétation et le risque évident d'anachronismes, dont l'enjeu est sans doute moins la compréhension des sociétés étudiées que le statut esthétique de certains concepts mathématiques. Comme pour la pratique de la numération, diverses conjectures ont été avancées qui, schématiquement, se partagent en deux grands courants, l'un recherchant les racines des premières notions protomathématiques dans les préoccupations empiriques, l'autre évoquant la possibilité d'origines sacerdotales et rituelles.

Les grands traits de cette opposition se retrouvent déjà dans la pensée grecque, qui attribuait aux Égyptiens les premières connaissances géométriques. Selon Hérodote, celles-ci seraient à reconduire à la pratique de l'arpentage, dont la science aurait été particulièrement développée sur les bords du Nil : il fallait réorganiser l'agriculture et assigner des limites aux champs après chaque crue. Aristote soutient l'idée, conforme à la tradition de la philosophie grecque, que la recherche désintéressée a un caractère supérieur : « Toujours les inventeurs de ces derniers arts [les arts d'agrément] ont été considérés comme plus sages que les autres, et cela, parce que leurs sciences ne tendent pas à l'utilité » (Aristote, *Métaphysique A*, 981b, 19-20, trad. J. Tricot, Paris, Vrin, 1986) : cela le conduit à faire naître la géométrie du loisir (le loisir studieux, *l'otium litteratum* cicéronien des *Tusculanes*). « De là vient que tous ces différents arts [les dirigés vers les nécessités de la vie, les autres vers son agrément] étaient déjà constitués, quand on découvrit ces sciences qui ne s'appliquent ni au plaisir, ni aux nécessités, et elles prirent naissance dans les contrées où régnait le loisir. Aussi l'Égypte a-t-elle été le berceau des arts mathématiques, car on y laissait de grands loisirs à la caste sacerdotale » (Aristote, *op. cit.*). Platon fait état dans le *Phèdre* de cette attribution à l'Égypte de l'invention de la géométrie, mais il souligne plus loin le caractère accessoire des questions historiques pour l'épistémologie. Socrate : « J'ai donc oui dire qu'il y avait près de Naucratis en Égypte un des anciens dieux de ce pays [...] ; c'est lui

qui inventa la numération et le calcul, la géométrie et l'astronomie [...] » (*Phèdre*, trad. E. Chambry, Paris, Garnier, 1964).

De manière plus théorique, la philosophie grecque devait également débattre de la question des origines, au sens ontologique, de la géométrie et fixer, là encore, les grandes lignes d'une problématique qui continue d'être en débat. Les contours en sont dégagés dans le livre M de la *Métaphysique*, où Aristote rapporte, outre ses conceptions propres, les théories pythagoriciennes et platoniciennes. On y mesure la sensibilité développée par la pensée grecque aux problèmes ontologiques de fondements, sensibilité que la philosophie mathématique n'a ensuite jamais retrouvée, en partie parce que ses intérêts se sont peu à peu déplacés vers des questions plus formelles, en partie du fait du discredit dans lequel devait tomber la métaphysique après les différentes révolutions opérées par la science moderne et la remise en cause de toute une partie des fondements de l'aristotélisme, en particulier dans sa formulation médiévale. Le statut de l'astronomie (« l'Astronomie doit avoir pour objet les choses suprasensibles, tout aussi bien que la Géométrie », Aristote, *op. cit.*) dans l'édifice de la *Métaphysique* se révèle aberrant du point de vue de la physique post-galiléenne, mais le soupçon d'une inadéquation du traitement proposé à la nature des problèmes de fondements géométriques et, plus généralement, scientifiques, pèsera de manière explicite après Galilée sur tout l'ensemble de l'œuvre aristotélicienne.

Le statut ontologique des objets géométriques est pourtant redevenu d'actualité dans la philosophie contemporaine, en marge toutefois du milieu mathématique qui reste majoritairement acquis aux influences de la logique formelle. La question est de plus en plus souvent abordée aux termes du rapport de l'intuition à ses objets et de la nature du substrat de cette intuition. Son traitement peut toutefois prendre des formes très variables, de la psychologie ou des sciences cognitives à des approches plus traditionnelles, souvent motivées par des questions pédagogiques ou sociologiques. Les *Origines de la géométrie* (Paris, Flammarion, 1993) de M. Serres sont à ce titre exemplaires par ses choix thématiques : retour sur les mythes fondateurs et leur signification, avec une insistance particulière sur Hérodote, rapport des sciences dures aux sciences sociales, devenir de la science dans les sociétés modernes, autant de questions qui ont leurs racines dans une réflexion en retour sur les origines du savoir géométrique et sur la façon dont il négocie sa relation au réel.

Le fondateur de ce courant d'interrogations, et le plus profond des penseurs de la modernité scientifique avec Heidegger, est incontestablement E. Husserl. Il y va dans sa pensée du devenir moral et social de la science. Les aspects les plus directement ontologiques de sa réflexion sur les fondements mathématiques sont le fruit d'un questionnement général en direction de la nature des « idées », d'où est née la phénoménologie transcendantale. Mais les textes sur les origines du savoir géométrique comportent souvent une dimension

exotérique liée à la crise de sens traversée par la science contemporaine, dont il met les ressorts en évidence dans la *Krisis* (E. Husserl, *La Crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale*, trad. G. Granel, Paris, Gallimard, 1962 ; *L'Origine de la géométrie*, trad. J. Derrida, Paris, PUF, 1962).

Le défaut manifeste des travaux post-husserliens sur la signification existentielle du savoir géométrique — son ancrage dans l'intuition, son sens « pour la vie de tous les jours » — est de passer outre, sauf à la caricaturer, la dimension métaphysique que comporte nécessairement une telle signification.

La géométrie grecque

On l'a dit, les Grecs avaient coutume d'attribuer à l'Égypte l'invention de la géométrie, à quoi l'on pourrait ajouter quelques contributions mésopotamiennes. Pourtant, il semble bien que ces apports aient souvent été surévalués, les mathématiques égyptiennes et babyloniennes restant d'orientation essentiellement pratique et ne distinguant guère résultats exacts et approximations. C'est à la Grèce qu'il faut donc très majoritairement attribuer l'idée de la géométrie comme savoir théorique déductif, et on rejoindra sur ce point le jugement de P. Tannery, malgré une radicalité qui peut faire aujourd'hui figure de provocation : « La science, en tant que l'on n'abuse point de son nom, éclot chez les Grecs, presque brusquement, en tout cas intégralement » (P. Tannery, *La Géométrie grecque*, Paris, Gauthier-Villars, 1887).

La tradition veut que Thalès de Millet (~ 625-547) ait, le premier, donné des preuves à des théorèmes géométriques, dont bien sûr celui qui porte encore son nom. Il serait donc de par là même le premier mathématicien au sens moderne de l'histoire. Hélas, les témoignages sur sa vie et son œuvre ne sont que très indirects et insatisfaisants ; pour l'essentiel ils reposent sur le *Commentaire sur le premier livre des Éléments d'Euclide* de Proclus.

Après lui, toujours selon Proclus, Pythagore franchit une nouvelle étape et « remonta aux principes supérieurs et rechercha les théorèmes abstraitement et par l'intelligence pure ». On lui attribue entre autres, outre le théorème bien connu, la découverte de certains polyèdres réguliers ou la théorie des proportions. Plus encore que Thalès, la figure de Pythagore est entourée d'un halo de légendes et ces attributions n'ont de valeur que conjecturale ou indicative.

Le v^e s. allait voir se cristalliser un certain nombre d'idées et de problèmes fondamentaux : quadrature du cercle, duplication du cube, trisection de l'angle... L'irrationalité de la racine de 2, dont l'attribution reste très incertaine, et les paradoxes de Zénon d'Élée allaient avoir une influence profonde, entre autres en remettant en cause la priorité traditionnelle du nombre au profit de la géométrie, seule à même de rendre compte des propriétés de continuité. L'algèbre et la géométrie sont indissociables dans l'algèbre géométrique, qui va se

mettre en place et que l'on trouvera exposée dans les *Éléments* d'Euclide (~ 300 av. J.-C.).

Le iv^e s. mit l'accent, avec Platon et Aristote, sur les aspects philosophiques de la connaissance mathématique : on sait en particulier l'enthousiasme de Platon pour la géométrie. Il insista sur la distinction à faire entre les figures, leur tracé, et les universaux ou plus exactement les Idées qu'elles représentent. L'influence directe de Platon sur les mathématiques semble avant tout due, outre ses aspects philosophiques, à la place exemplaire qu'il leur attribue dans le panthéon des sciences. L'Académie allait produire de grands mathématiciens, au tout premier rang desquels Eudoxe de Cnide (~ 408-355), auquel sont attribuées deux découvertes fondamentales : la théorie des proportions telle qu'on la trouve chez Euclide et la méthode d'épuisement en laquelle il convient de voir les débuts du calcul intégral. L'influence d'Aristote est quant à elle avant tout d'ordre logique. L'origine en est d'abord la théorie de la démonstration formulée dans le traité de l'*Organon*, les *Seconds Analytiques* : « Par démonstration j'entends le syllogisme scientifique, et j'appelle scientifique un syllogisme dont la possession même constitue pour nous la science. Si donc la connaissance scientifique consiste bien en ce que nous avons posé, il est nécessaire aussi que la science démonstrative parte de prémisses qui soient vraies, premières, immédiates... » (*Les Seconds Analytiques*, trad. J. Tricot, Paris, Vrin, 1979). La forme du traité d'Euclide relèvera en particulier de la logique aristotélicienne, en dégageant les axiomes et postulats fondamentaux de la géométrie classique. Les travaux d'Euclide et surtout d'Archimède ou Apollonius à l'époque hellénistique frappent par leur profondeur et, somme toute, par leur extrême proximité aux idées qui vont marquer le renouveau de la géométrie avec la géométrie analytique puis le calcul infinitésimal au siècle de Descartes.

Le postulat des parallèles

La pensée axiomatique et, plus généralement, la logique conçue comme prolégomène à toute science naissent donc en Grèce et leurs canons sont fixés par l'aristotélisme au iv^e s. Aristote insiste en particulier sur la nécessité de reconduire, autant que possible, toute science déductive à un nombre minimal de prémisses : toutes choses étant égales par ailleurs, la meilleure démonstration est celle qui procède du plus petit nombre de postulats. Euclide suit la leçon et formule entre autres le célèbre cinquième postulat ou postulat des parallèles. Son devenir allait cristalliser certaines questions philosophiques fondamentales, dont la nature de notre rapport à la réalité physique ou le caractère géométrique de l'espace vécu.

L'indépendance logique de ce postulat relativement aux autres postulats et axiomes euclidiens étant douteuse, les tentatives de démonstration vont se succéder au cours des siècles. L'école arabe allait en particulier s'y intéresser avec Alhazen (~ 965-1039), Omar Khayyam (~ 1050-1122) et Nasir Eddin (1201-1274),

mais leurs « démonstrations » du postulat requéraient des prémisses équivalentes au postulat lui-même. G. Saccheri (1667-1733), à partir des travaux de N. Eddin, élabore ce que l'on peut rétrospectivement considérer comme une véritable géométrie non euclidienne (hyperbolique), mais il ne sut pas l'identifier comme telle, restant profondément convaincu d'une validité sans partage de la géométrie euclidienne. Le même phénomène devait se répéter avec Lambert (1728-1777).

Cette confiance aveugle dans la géométrie euclidienne naît, on le devine, de l'adéquation non questionnée faite implicitement entre l'espace euclidien et l'espace phénoménal. Ce parti pris allait conduire l'épistémologie kantienne à une erreur d'importance capitale puisque la découverte de nouvelles géométries au XIX^e s. allait remettre très gravement en cause la philosophie critique. Elle allait aussi, de par là même, conduire à douter de la validité de nos intuitions géométriques et de la belle assurance qui prévalait jusque-là quant à l'adéquation de notre pensée mathématique au réel.

Pour Kant, les mathématiques ne sont pas de prime abord une science de concepts, mais une science d'intuitions pures, reconductible en tant que telle aux formes pures de la sensibilité plutôt qu'à celles de l'entendement. D'où l'aspect rétrospectivement paradoxal d'une pensée qui fait de la géométrie la science des formes pures de l'espace. Cette théorie a en outre une conséquence technique très importante : dans la doctrine kantienne, les jugements mathématiques ne sont pas analytiques, comme ce serait le cas dans une théorie formelle ou axiomatique de la vérité, mais bien synthétique *a priori*. « C'est une proposition synthétique que celle-ci : entre deux points la ligne droite est la plus courte. Car mon concept du droit ne contient rien qui se rapporte à la quantité : il n'exprime qu'une qualité. Il faut donc ici encore recourir à l'intuition : elle seule rend possible la synthèse » (Kant, *Critique de la raison pure*, trad. J. Barni, Paris, Garnier-Flammarion, 1976).

On l'aura compris, la doctrine kantienne semble remettre en question l'épistémologie aristotélicienne et ses divers avatars en faisant l'impasse de la distinction classique entre antériorité logique et antériorité substantielle, sous-jacente à l'idée d'une possible axiomatisation de la géométrie. D'où sa situation en porte-à-faux vis-à-vis des découvertes mathématiques du XIX^e s. et de la tendance qui prévaut alors : un doute méthodique à l'égard de l'intuition dont on commence à entrevoir les limites. En fait, la question est sensiblement plus complexe et en comprendre le détail des enjeux requerrait des analyses détaillées ; les néokantien ne devaient pas manquer de signaler les limites d'une interprétation aussi rapide, mais assez répandue, de la pensée critique. Plutôt donc que la philosophie kantienne proprement dite, il conviendrait de dire que la découverte des géométries non euclidiennes devait invalider une certaine vulgate kantienne, qui était le

fond de l'épistémologie implicite d'une bonne part de la communauté scientifique au XIX^e s.

L'élaboration systématique de la géométrie non euclidienne devait être le fruit de découvertes indépendantes par C.F. Gauss (1777-1855), N.I. Lobatchevski (1793-1856) et J. Bolyai (1802-1860). Il semble que Gauss ait été très tôt (autour de 1816) conscient de la possibilité de développer une telle géométrie, mais sa conduite frappe par sa circonspection voire sa pusillanimité : il ne communiqua pas ses résultats, persuadé qu'un accueil très défavorable sinon hostile leur serait réservé.

L'étude des géométries non euclidiennes allait connaître un tournant avec les travaux de Riemann, où apparaît la possibilité d'une théorie très générale des espaces courbes, qui devait finalement conduire à l'élaboration de la relativité générale – où la structure locale de l'espace est régie par les équations des champs. E. Cassirer dans *La Théorie de la relativité d'Einstein (Zur Einsteinschen Relativitätstheorie)*, Berlin, Bruno Cassirer Verlag, Berlin, 1921) devait essayer de reconstruire l'Esthétique kantienne conformément à la nouvelle géométrie. Il établit facilement ce que la prétendue hypothèse euclidienne a d'accessoire dans la théorie kantienne, qui peut très bien être adaptée aux idées nouvelles. Pourtant, même ainsi restaurée, la conception de la géométrie soutenue par la philosophie critique ne devait jamais retrouver son éclat original : le point de vue synthétique, déjà mis à mal par la réélaboration des fondements de l'arithmétique par G. Frege, devait perdre tout crédit auprès de la plupart des mathématiciens avec les travaux de D. Hilbert (1862-1943).

En 1899, Hilbert fit paraître ses célèbres *Fondements de la géométrie. Les Éléments d'Euclide*, malgré leur caractère axiomatique et déductif, restant encombrés de nombreuses maladresses, d'abord en ce qui concerne les définitions (dont l'énoncé est parfois attribué en substance à Platon). Hilbert adopte d'emblée un point de vue formaliste et ne s'embarrasse pas de contenus de concepts. Il considère les points, lignes et plans et leurs relations fondamentales, assujettis à un système d'axiomes – un redéploiement rigoureux des axiomes et postulats d'Euclide. Plus encore que cette restructuration des *Éléments*, il faut sans doute retenir de l'œuvre hilbertienne ses corrélats épistémologiques : rompant avec la tradition, Hilbert refuse d'attribuer des significations aux termes géométriques, conçus comme pures formes logiques. La rupture avec le kantisme est cette fois-ci radicale : la question du sens des énoncés mathématiques devient accessoire ou, plus radicalement, n'a pas lieu d'être en tant que question mathématique. La pensée hilbertienne, dans ce qu'elle a de provoquant, a bouleversé la philosophie et la pratique mathématique. Son influence est manifeste chez des mathématiciens comme N. Bourbaki. Des courants de pensée vigoureux, dont la portée a été malencontreusement mésestimée au sein de la communauté scientifique, s'y sont opposés sans grand succès (on pensera bien sûr à la fortune malheureuse de l'intuitionnisme de Brouwer,

remis au goût du jour par certains développements récents de la théorie des catégories). La radicalité sans concessions de Hilbert devait engager les mathématiciens sur des voies prolifères en enseignant à distinguer une structure, en un sens très large, de son support intuitif. Elle permit ainsi aux mathématiciens de déplacer leurs savoirs d'un domaine à l'autre, procédé essentiel s'il en est de progrès techniques et d'unification au cours du XX^e s. Elle devait aussi être à l'origine de pratiques plus discutables, encourageant une formalisation à outrance dont les effets néfastes ont pu être mesurés dans certains enseignements. L'erreur, commune à beaucoup, a été de croire qu'abstraction et formalisme ne font qu'un ; or il est vrai que les mathématiques modernes sont *abstraites* : elles manipulent des objets symboliques ; elles ne sont pas condamnées pour autant à être formelles (dépourvues de significations et pensées comme telles) !

Le tournant cartésien

On sait l'originalité révolutionnaire de la philosophie cartésienne et son mépris de la tradition : la vérité n'a pas d'histoire ! En revanche, la géométrie cartésienne, connue d'abord pour son usage des systèmes de coordonnées frappe par son insertion dans les cadres de pensée de la géométrie grecque, malgré tout le génie novateur qui s'y déploie. À réduire Descartes au rôle de père de la géométrie analytique, en lui associant d'ailleurs Fermat, on perd la saveur très particulière de sa contribution et, ce qui est plus grave, on risque de se méprendre sur sa signification épistémologique et historique.

Les commentateurs n'ont d'ailleurs pas manqué d'attirer l'attention sur les difficultés que présente la lecture de sa *Géométrie* (1637). Difficulté technique d'abord, pour les contemporains de Descartes, car il a omis de détailler sa pensée « afin de retenir les esprits malins en leur devoir », car sinon ils se fussent vantés d'avoir tout déjà connu auparavant. Difficulté de mise en perspective pour ceux qui voudraient lire aujourd'hui la *Géométrie* sans être au fait de certaines distinctions capitales dans la géométrie grecque et qui sous-tendent le travail cartésien. Ces distinctions sont intimement liées aux solutions envisageables pour les problèmes fondamentaux (quadrature...). Selon Pappus, « les Anciens ont admis que les problèmes appartiennent à trois genres en géométrie : les uns sont appelés plans, les autres solides, et d'autres encore *grammiques* ». La géométrie plane est achevée, parfaite : c'est celle de la règle et du compas, mais sa portée est réduite. Les problèmes solides renvoient à l'utilisation de sections coniques, tandis que les problèmes dits *grammiques* recouvrent des situations variées et l'utilisation de courbes plus exotiques (spirales, conchoïdes...). Aux termes de l'algèbre moderne, ces distinctions renvoient (schématiquement) au développement de méthodes de recherche de solutions d'équations polynomiales en fonction de leurs

degrés respectifs. Le cœur de la méthode géométrique cartésienne est dans l'intuition que la transcription algébrique de problèmes classiques comme celui de Pappus permet d'aller au-delà des Grecs et de ses propres contemporains, et ce, de manière systématique et définitive. La géométrie analytique (ou algébrique, à l'époque il n'y a pas lieu de distinguer) est l'outil de cette systématisation de matériaux d'étude on ne peut plus classiques, plutôt qu'un objet d'étude propre.

D'un point de vue technique, en raison de l'extrême proximité à cette géométrie de certaines méthodes comme celle d'Apollonius, on a pu s'étonner que, si près du but, la géométrie grecque n'ait su franchir le pas de l'algébrisation. C'est qu'elle avait pour seul instrument l'algèbre géométrique alors que Descartes ou Fermat disposaient des acquis de l'algèbre de la Renaissance.

En tous les cas, un pas est franchi avec Descartes. Tout d'abord, algèbre et géométrie sont profondément réunis en une seule et même méthode. Plus radicalement, cette réunion est thématisée comme telle et Descartes en comprend la portée novatrice. Peu de fois dans l'histoire des mathématiques le fait aura été aussi manifeste : la mise en perspective, l'interprétation épistémologique à chaud d'une technique en modifiant radicalement et en transcendant la portée. Mais la *Géométrie* se veut aussi exemplaire de toute la méthode cartésienne : elle est, avec la *Dioptrique* et les *Météores*, un des trois appendices au *Discours de la méthode*. Or cette exemplarité est tout sauf évidente, et Leibniz a beau jeu de remarquer dans sa correspondance et comme beaucoup de ses contemporains que « Mons. des Cartes a été un grand homme sans doute, mais je crois que ce qu'il nous a donné est plutôt un effet de son génie que de sa méthode, car je ne vois pas que ses sectateurs fassent des découvertes ».

Une fois les concepts fondamentaux mis en place et la correspondance entre géométrie et algèbre acquise, les modifications conceptuelles les plus profondes qu'allait connaître la géométrie analytique vont relever du développement du calcul différentiel et intégral. Les idées mises en jeu renvoient alors à des notions d'analyse, que l'on n'abordera pas ici. Intimement liée à la naissance de la géométrie analytique et algébrique est enfin la mathématisation de l'espace physique, mutation dont les conséquences n'ont cessé de nous apparaître au travers de cette « machination de l'étant » dont parlera Heidegger dans sa critique radicale de la modernité technique.

Variations sur l'infini

Selon l'interprétation koyréenne, la grande révolution épistémologique qui va *Du Monde clos à l'univers infini* (A. Koyré, Paris, PUF, 1962) et ouvre l'ère moderne autour de la figure emblématique de Galilée, procède de « deux éléments principaux, d'ailleurs étroitement liés, à savoir la destruction du Cosmos, et la géométrisation de l'espace ». Cette révolution recouvre bien des changements conceptuels, d'abord

dans le domaine de la physique et d'une certaine métaphysique, où c'en est fini « du monde conçu comme un tout fini et bien ordonné, dans lequel la structure spatiale incarnait une hiérarchie de valeur et de perfection ». Pour se limiter à ses implications dans le domaine de la géométrie pure, elles sont principalement de deux ordres. Techniquement d'abord, l'étude de la dynamique et des phénomènes de gravitation allaient conduire au développement de la branche mécanique de la géométrie et, plus généralement, motiver la mise en place de nombreuses méthodes d'études – un exemple parmi tant d'autres : le traitement de l'infini et l'idée de hiérarchie des infinis petits dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de Galilée, où il est répondu à l'objection que, si la terre était en mouvement de rotation uniforme, elle devrait alors expulser tangentiellement les corps qui sont à sa surface (sous l'effet de la force centrifuge). Philosophiquement ensuite, puisque la structure mathématique de l'univers est dès lors acquise : la distinction est abolie entre une réalité qualitative et un monde d'essences géométriques, seul susceptible de connaissances exactes. La mort de l'aristotélisme médiéval, construit au nom d'une certaine théologie sur ce type de distinctions, est alors avérée. La *Mathématisation du réel* (G. Israël, Paris, Le Seuil, 1996) est en marche et le réductionnisme va pouvoir se développer.

En marge de ces grands bouleversements que sont la mutation radicale des liens entre géométrie et algèbre d'une part, entre géométrie et physique d'autre part, se produit un phénomène dont les conséquences techniques ne seront perçues que plus tard, avec le développement de la géométrie projective : la théorisation de la perspective. L'organisation de l'espace pictural selon ses lois est dû à la Renaissance italienne. L'art figuratif se soumet aux raisons de la géométrie, ce que ne manquera pas de contester la modernité, qui a appris, en partie du fait de la relativité générale et de l'existence des structures riemanniennes, à dissocier l'espace vécu de ses abstractions géométriques. On s'accorde à attribuer à l'architecte florentin F. Brunelleschi (1377-1446) l'invention de la perspective, sa formalisation étant due à L. B. Alberti (1404-1472) dans son traité *De Pictura* de 1435. On a pu souligner à propos de Brunelleschi que sa découverte s'inscrit dans une histoire complexe, où la théorisation de la vision dans l'optique médiévale n'a pas manqué de jouer un rôle. Il y a là une tendance générale dans l'histoire des sciences contemporaines. En rupture avec la théorie parfois assez manichéenne des coupures ou révolutions épistémologiques, elle a réappris à évaluer l'ancrage de toute pensée scientifique dans l'histoire de sa discipline, au risque d'excès de zèle, déjà dénoncés par Tannery dans sa *Géométrie grecque*... en 1887 ! Confrontés ici avec l'histoire de la géométrie à une extrême richesse des matériaux et à la multitude des acquis, nous nous en sommes tenus à délimiter à grands traits l'évolution de ses concepts fondamentaux. L'existence de démarcations techniques d'un stade de développement à l'autre légitime ces raccourcis sans

dispenser d'études partielles et plus précises, au détail desquelles nous ne pouvons que renvoyer.

En ce qui concerne la perspective, il convient de citer les noms de P. della Francesca (1410-1492) ou d'A. Dürer (1471-1528). Les connexions qui s'étaient ainsi établies entre Art et Géométrie auraient pu indubitablement conduire rapidement à des avancées mathématiques, mais il fallut pour cela attendre les travaux de G. Desargues (1591-1661), avec lesquels naît la géométrie projective. Il introduit les notions de point et droite à l'infini et parvient à une théorie unifiée des coniques tout en dégageant le rôle clé des transformations projectives. Sous l'influence de L. Carnot (1752-1823) et G. Monge (1746-1818), J.-V. Poncelet (1788-1867) devait donner une forme accomplie aux idées de Desargues tout en mettant en évidence le principe de dualité projective. A.F. Möbius (1790-1868), J. Plücker (1801-1868) et M. Chasles (1793-1880) algébrisent ensuite ces notions, en découvrant en particulier les coordonnées homogènes et leur usage et en continuant d'insister sur l'importance des transformations géométriques. Les progrès sont rapides : A. Cayley (1821-1895) et H. Grassmann (1809-1877) élaborent la géométrie à un nombre arbitraire de dimensions et Cayley montre comment donner une interprétation projective des notions métriques. Les mutations de sens au sein de la géométrie sont alors, on le devine, radicales, surtout si on les conjugue à l'existence des structures non euclidiennes. L'intuition géométrique commence de perdre pied devant la complexité des structures étudiées, et le recours à l'algèbre devient garant de la validité des raisonnements. Les généralisations successives qui vont se poursuivre jusqu'à aujourd'hui vont confirmer cette tendance de fond de la géométrie algébrique (et projective) à un recours toujours accru aux techniques de l'algèbre. En fait un domaine assez spécifique de l'algèbre est en jeu, l'algèbre commutative. Son expansion au XX^e s. a été motivée par l'étude de phénomènes manquant trop de régularité pour être abordés au travers d'intuitions proprement géométriques et, corrélativement, par le passage au point de vue des schémas, qui, grossièrement, consiste à considérer un espace non pas simplement comme la donnée d'un ensemble de points, mais comme la donnée simultanée des points, courbes, surfaces et en fait de tous les sous-espaces qu'il contient.

Pour en revenir momentanément à des idées plus classiques, la synthèse des travaux de Desargues, Poncelet, Lobatchevski et al. devait être effectuée par F. Klein (1849-1925). À partir des idées de Cayley sur les métriques, il montre comment envisager les différentes géométries (euclidiennes et non euclidiennes) comme cas particuliers de la géométrie projective. Dans un discours resté célèbre, connu comme *Programme d'Erlangen*, il modifie le statut épistémologique de la notion de transformation, déjà familière en géométrie projective : l'étude d'une géométrie est l'étude des concepts invariants par le groupe de transformations associé. Le programme de Klein sait saisir

l'esprit d'un ensemble d'acquis géométriques : une fois encore l'interprétation de résultats techniques allait en transformer la teneur et modifier la perception que les mathématiciens ont pu avoir du sens de leurs recherches.

Aperçus sur la modernité

L'histoire de la géométrie s'est cristallisée en un certain nombre de disciplines institutionnelles assez facilement repérables : géométrie algébrique, géométrie analytique complexe, géométrie différentielle, mécanique... Il y a bien sûr une logique interne à ces classifications, les méthodes et les intérêts de chacune de ces géométries ayant un certain nombre de spécificités, malgré les « ponts » qui ne manquent pas d'exister de l'une à l'autre.

Cette distinction de différents corpus reflète des découpages conceptuels déjà anciens, mais le détail de chaque discipline révèle des structures plus complexes. Tout d'abord la géométrie est loin de se laisser contraindre par des délimitations figées : elle pénètre et se laisse influencer par tous les champs de connaissances mathématiques, qu'il s'agisse de combinatoire, d'arithmétique, d'analyse fonctionnelle, d'équations différentielles, de probabilités... À certains moments ces interactions thématiques s'imposent de toute évidence. C'est le cas pour celles avec l'analyse, conformément à une observation qui remonte à S. Lie et H. Poincaré : il convient de faire de l'analyse non seulement dans les espaces euclidiens, mais sur toutes les variétés différentiables. L'analyse dite globale est née de cette observation, qui a aussi en bonne part motivé la création de la topologie algébrique moderne par Poincaré ! En fait, on le voit vite, toutes les délimitations tracées entre champs de savoirs mathématiques ont tendance à devenir problématiques dès lors que l'on avance dans la compréhension du détail des objets étudiés et des méthodes employées.

Deux courants majeurs se partagent le devenir des géométries et, après la faille de l'entreprise bourbakiste d'un ordonnancement sectoriel et systématique de l'édifice mathématique, il apparaît probable qu'ils continueront longtemps de coexister. D'une part, la géométrie « explose » : elle se mêle, on l'a vu, à toutes les autres branches des mathématiques. Chacune de ces géométries développe un corpus qui lui est propre et se préoccupe de problèmes toujours plus pointus et spécifiques qui, le plus souvent, ne rencontrent que peu d'attention et d'intérêt auprès des non-spécialistes (cela dit, le phénomène est commun à toute la science contemporaine, toujours plus segmentée et souffrant d'une incommunicabilité chronique et très inquiétante). D'autre part pourtant, des tendances de fond se font jour, qui transgressent les contingences disciplinaires et contribuent à donner cette impression qu'une unité profonde du corpus géométrique reste possible pourvu que les géomètres fassent l'effort de dégager les concepts fondamentaux d'une propédeutique commune à l'étude des géométries, celles-ci

étant entendues en un sens extrêmement large – qui inclut la topologie algébrique, toute une partie de l'arithmétique voire des notions logiques, etc. Cela supposerait une remise à plat de l'enseignement supérieur et une réorganisation des concepts fondamentaux très délicate, puisqu'elle impliquerait un tournant résolument eidétique, en substituant à l'étude d'objets privilégiés au nom de la tradition celle des schémas fondamentaux de la connaissance géométrique contemporaine. Cela va bien sûr à l'encontre des aspirations, bien naïves malgré leur apparente légitimité, à un retour aux « intuitions originaires de l'espace » sur lesquelles il conviendrait de refonder l'enseignement de la géométrie après une période formalisante. L'avenir exige ici une progression dans l'abstraction, qui ne sacrifie pas l'idée d'une signification intrinsèque des concepts manipulés ; comprendre et diffuser les acquis de la géométrie moderne est à ce prix.

► ARISTOTE, *La Métaphysique*, trad. J. Tricot, Paris, Vrin, 1986 ; *Les Seconds Analytiques*, trad. J. Tricot, Paris, Vrin, 1979. – BOI L. (éd.), FLAMENT D. (éd.), SALANSKIS J.-M. (éd.), 1830-1930 : *A century of geometry. Epistemology, history and mathematics*, Selection of articles based on lectures presented at the international conference « 1830-1930 : Un siècle de géométrie : de C. F. Gauss et B. Riemann à H. Poincaré et E. Cartan. Epistémologie, histoire et mathématiques », Lecture Notes in Physics, 402, Berlin, Springer-Verlag, 1992. – BOI L., *Le problème mathématique de l'espace. Une quête de l'intelligible*, Berlin, Springer-Verlag, 1995. – BOYER C.B., *A History of mathematics*, New York, Wiley & Sons, 1968. – DIEUDONNE J., *Cours de géométrie algébrique*, Paris, PUF, 1974 ; *Domination universelle de la géométrie*, Paris, IREM Paris nord, 1981. – EUCLIDE, *Œuvres*, trad. F. Peyrard, Paris, rééd. A. Blanchard, 1993. – HUSSEIN E., *L'Origine de la géométrie*, trad. J. Derrida, Paris, PUF, 1962. – KANT E., *Critique de la raison pure*, trad. J. Barni, Paris, Garnier-Flammarion, 1976.

Frédéric PATRAS

→ Analyse complexe ; Analyse diophantienne ; Analyse et synthèse ; Analyse fonctionnelle ; Axiomatisme et formalisation ; Beltrami ; Cartésianisme ; Catégories et foncteurs ; Démonstration ; Équation ; Extension ; Formalisme ; Groupes et symétrie ; Local et global ; Logicisme ; Méthodes infinitésimales ; Singularité ; Structure ; Transformation géométrique.

GÖDEL Kurt, 1906-1978

Kurt Gödel est le plus grand logicien du XX^e s. Sa principale période d'activité se situe entre 1930 et 1950, d'où se détachent la cohérence relative de l'axiome du choix et de l'hypothèse du continu (1938) et bien entendu le très (trop ?) médiatisé *Théorème d'Incomplétude* en deux volets (1931) qui nous occupera ici.

Contenu technique

Sous des hypothèses très lâches, un système cohérent (i.e., non-contradictoire, en français « consistant » : qui ne prouve pas n'importe quoi) T. (i) contient un énoncé G vrai, mais non prouvable ;

(ii) parmi les G possibles, *CohT*, la cohérence de T : « T ne démontre pas sa propre cohérence ». À l'origine $T = PM$ (les *Principia Mathematica* de Russell & Whitehead, système très daté) n'utilise que la possibilité d'écrire un petit bout d'arithmétique dans T . En particulier, elle s'applique à toutes les formalisations des mathématiques, par exemple la théorie des ensembles ZF . Un système formel non sujet au théorème de Gödel serait donc, au choix a) **Inexpressif** : incapable d'énoncer sa propre cohérence, il n'a pas d'état d'âme à ce sujet ! b) **Fautif** : T peut démontrer sa propre cohérence, mais alors prouvera des contre-vérités, e.g., $3 \times 7 = 22$, qui ne sont pas forcément des contradictions genre $0 \neq 0$; mais quelle foi attacher alors à ce que « dit » T ? c) **Non-déductif** : on peut passer outre au premier théorème en « complétant le système », i.e., en « rajoutant des axiomes ». Cela dit, il n'y a aucune façon de savoir lesquels ajouter – ne pas ajouter, c'est ce que nous dit... l'incomplétude. Et les « systèmes non-monotones » ainsi obtenus ne sont pas déductifs : faute d'avoir une notion effective d'axiomes, ils n'ont pas de notion de démonstration. Ils sont tellement mal faits que, quand ils peuvent exprimer leur propre cohérence, ils sont alors condamnés à faire des erreurs. d) **Farfelu** : on peut bricoler des logiques « para-consistantes », où il est, disons, interdit de conclure $0 \neq 0$, ce qui résoud tous les problèmes : ça revient à faire baisser le crime en ne prenant plus les déclarations de vol à la tire.

Démonstration

Fastidieuse, sans être vraiment difficile, elle repose sur les points suivants : (a) **Le codage** : on associe à chaque expression A du langage de T (énoncé, démonstration formelle) un entier $\lceil A \rceil$, en commençant par les primitives : 11 pour « (», 13 pour «) », etc. Les propriétés de la syntaxe formelle deviennent des énoncés arithmétiques, ainsi « A est démontrable dans T » devient-il une propriété arithmétique $Thm_T(\lceil A \rceil)$ du nombre de Gödel $\lceil A \rceil$ de l'énoncé A , cette propriété faisant elle-même partie du langage formel T . (b) **La réflexion** : si l'énoncé A est démontrable dans T , ce fait lui-même, i.e., l'énoncé $Thm_T(\lceil A \rceil)$, est démontrable dans T . (c) **La diagonalisation** : l'énoncé à un paramètre A qui dit « $A(x)$ dans lequel on a fait $x = \lceil A \rceil$, n'est pas prouvable dans T » est représenté dans T par un énoncé $B(\lceil A \rceil)$. $B(\lceil B \rceil)$ signifie donc littéralement « je ne suis pas prouvable ». (d) **Le premier théorème** : si $B(\lceil B \rceil)$ était démontrable, sa démontrabilité, i.e., la négation de $B(\lceil B \rceil)$ serait démontrable et T prouvant un énoncé et sa négation, incohérente. Donc, si T est cohérente, $B(\lceil B \rceil)$ n'est pas démontrable, i.e., est vraie. (e) **Le second théorème** : une seconde réflexion permet de formaliser la démonstration du premier théorème dans T , qui démontre donc l'énoncé $Coh_T = B(\lceil B \rceil)$ (qui veut dire « si T est cohérente, alors $B(\lceil B \rceil)$ est vraie »). Comme $B(\lceil B \rceil)$ n'est pas démontrable dans T , Coh_T ne l'est pas non plus.

Nouveauté

(a) **La diagonalisation** : c'est un procédé récurrent depuis Cantor (~ 1885) et Russell (1902) : on identifie deux paramètres et on modifie le résultat, ainsi $f_n(m)$ devient $f_n(n) + 1$ (Cantor), $x \in y$ devient $x \notin x$ (Russell), avec chaque fois des résultats paradoxaux, e.g., l'ensemble X des ensembles qui ne s'appartiennent pas est tel que $X \in X \Leftrightarrow X \notin X$. La variante obtenue par Gödel échappe à la contradiction de justesse (vrai \neq prouvable). (b) **Le codage** : nettement plus original, en particulier, l'utilisation du « lemme du chinois » pour coder des listes d'entiers par des entiers, en fait technique de pointe reprise de la théorie du corps de classes, alors toute récente. (c) **La réflexion** : l'école formaliste (à la suite de Hilbert 1862-1943) proposait une justification mathématique des mathématiques au moyen de démonstrations de cohérence formelle. Pour éviter tout soupçon d'« auto-amnistie », ces démonstrations devaient se faire dans un système « à part », de *métamathématiques*, qui jouerait le rôle d'un arbitre neutre et impartial, une sorte de « conseil constitutionnel ». Gödel innove en insérant les *métamathématiques* à l'intérieur des mathématiques, elles ne sont plus « à côté », elles en deviennent un morceau $T_0 \subset T$. Le résultat est d'autant plus impressionnant qu'il ne dépend pas du choix de T_0 (qu'on aurait pu prendre « trop faible »), Gödel fait $T_0 = T$, ce qui est bien le choix le plus libéral, celui de l'« auto-amnistie pure et simple » : même ce choix ne fonctionne pas !

Signification

(a) **L'infini** : Hilbert se proposait d'éliminer, d'évacuer, l'infini au moyen d'un tour de passe-passe linguistique, bureaucratique : au lieu d'étudier l'infini, on étudiera le langage (qui parle) de l'infini. Le théorème nous montre qu'on recule pour mieux sauter : l'infini a été transféré de l'infini des objets à l'infini du langage, ce qui montre les limites du *finitisme* Hilbertien. (b) **Le récessif** : Il s'agit de propriétés qu'on peut vérifier à un degré arbitraire de précision. Par exemple, le fait que $p^3 + q^3 \neq r^3$ quand p, q, r sont des entiers non-nuls, est de cette forme : si la propriété était fausse, on trouverait un contre-exemple (ce qui a d'ailleurs lieu pour le cas voisin $p^2 + q^2 \neq r^2$: prendre $p = 3$, $q = 4$, $r = 5$), et on peut lire la propriété comme « pour tous les choix (p, q, r) effectués, on a observé l'inégalité », autrement dit « jusqu'ici ça va ». Pour Hilbert les seuls énoncés mathématiques significatifs sont récessifs, idée reprise par Popper (propriétés « falsifiables », français pour « réfutable »). *A contrario*, les propriétés *expansives*, négations de récessives, sont susceptibles d'être vérifiées, en exhibant un exemple, ainsi la remarque que $3^2 + 4^2 = 5^2$. (c) **Démonstrabilité** : le travail de poliorcétique de Gödel établit que tout énoncé expansif vrai est démontrable dans T : pour cela il suffit de remarquer qu'une vérification (genre $3^2 + 4^2 = 5^2$) peut se formaliser, c'est pour ça que T doit avoir un pouvoir expressif minimum. Duale-ment,

pourvu que T soit cohérente, tout énoncé récessif démontrable dans T est vrai. (d) **Réflexion** : le codage du langage, fait apparaître le côté expansif de la démontrabilité (si je « tombe » sur une démonstration de A , alors A est démontrable), et *a contrario*, le côté récessif de la cohérence, qui dit qu'un A donné (par exemple $0 \neq 0$) n'est pas démontrable. Le théorème de Gödel, c'est avant tout la stricte séparation entre récessif et expansif : l'énoncé de Gödel, la cohérence de T , sont récessifs, mais en aucune façon expansifs (sinon, ils seraient prouvables). (e) **Un à-peu-près instructif** : on se souvient d'une guerre faite au nom de la supposée présence d'armes de destruction massive (ADM) ; puis d'un envahisseur déclarant « les ADM existent, sans qu'on puisse le prouver ». Incomplète ? S'il y en a, il suffit de « faire parler » la bonne personne, ça peut prendre du temps, comme tout processus expansif : dire qu'on ne peut pas, autant dire « j'ai menti », le paradoxe du menteur, donc. L'analogie fonctionne mieux avec l'envahi, qui niait les ADM, se plaçant donc dans une position récessive : il n'y a pas moyen de vérifier qu'il n'y a pas d'ADM, surtout quand on met des obstacles aux contrôles. (f) **L'extinction du Poppérisme** : l'ontologie de Hilbert/Popper a pour elle une indéniable tenue interne (en particulier, la réduction à la cohérence, propriété « falsifiable », donc dotée de signification). Mais elle n'arrive pas à convaincre, en particulier, parce qu'elle dénie tout sens au théorème de Gödel, énoncé par nature non falsifiable, puisqu'il sortirait renforcé d'une réfutation, voir *infra*.

Impact

(a) **Sur l'école formaliste** : à peu près nul, les « démonstrations » de cohérence n'ayant jamais cessé, parfois avec des idées originales (Gentzen, 1908-1945), mais handicapées *a priori* par l'obligation d'une fondation de T sur « plus que T ». Cela dit, après 1931, l'école formaliste devient une secte, les mathématiciens se désintéressant de cet « intégrisme ». (b) **Sur l'informatique** : d'abord la numérisation du langage, qui, même si l'idée est ancienne (Leibniz) apparaît pour la première fois de façon aboutie chez Gödel ; une nouveauté bien éventée, les ordinateurs codant mots, sons, images, etc. au moyen de listes de bits 0 et 1, i.e., d'entiers en numération binaire. Plus généralement, l'idée que « preuve formelle = calcul » se retrouve dans la conception des langages informatiques. D'ailleurs dès 1936, Turing (1903-1953) devait donner sa version du théorème de Gödel, pour le calcul : dans un langage de programmation universel il y a un programme qui diverge (argument de diagonalisation à la Cantor, $f_n(n) + 1$ est de la forme $f_N(n)$, on fait $n = N$, et donc $f_N(N)$ n'est pas défini, le calcul diverge) ; en fait un système formel comme T peut être vu comme un langage de programmation universel, c'est à ça que sert le codage. (c) **Postérité dans la postérité** : c'est surtout dans l'informatique théorique que le formalisme se survit, en proposant des programmes d'*intelligence artificielle*

particulièrement... imbéciles, en particulier en imaginant des machines répondant à toute question, OUI quand c'est oui, NON quand c'est non, J'SAIS PAS autrement. Ces programmes s'accompagnent de métaphores laborieuses, comme celle des 25 cocus de Bagdad qui tuent leurs femmes infidèles, et qu'on va ici prendre à rebrousse-poil : disons qu'il n'y a qu'un cocu, un peu simplet, appelons-le W ; il sait que les autres ne le sont pas et qu'il y en a au moins un, mais ça ne l'inspire pas pour autant, et il épargne sa femme ; chaque autre, ne voyant qu'un cocu – W –, supposé en avoir vu un autre, conclut que c'est lui-même : subséquemment, les 24 moitiés fidèles sont assassinées ! Le grain de sable dans cette mécanique, c'est la différence entre « ne pas savoir » et « savoir que pas », produite ici par l'imbécillité de W , plus généralement par l'incomplétude et ses satellites (Turing, etc.). Voilà pourquoi les « logiques épistémiques » sont condamnées (sous peine d'incohérence) à ne pouvoir rien exprimer : elles se cantonnent sagement aux devinettes de cour de « récré ». Cet exemple illustre la différence entre constatation et raisonnement, entre calcul à l'ancienne, au moyen d'une table de fonctions, et calcul sur machine : dans le second cas on ne sait pas prévoir le temps de réponse. (d) **Non-déterminisme** : si « preuve = calcul », il faut insister sur le côté *non-déterministe* : on peut vérifier une démonstration sur machine, on ne peut en aucune façon la trouver : c'est comme un labyrinthe où on peut aller où on veut, on ne se trompe jamais, sauf qu'on peut très bien ne pas en sortir. Parmi les 1 001 formes équivalentes du théorème de Gödel, la moins spectaculaire et la plus utile, c'est qu'en aucune façon cet algorithme ne peut être rendu déterministe, i.e., qu'il n'y a pas de notion « dirigée » de démonstration formelle. Ceci est d'ailleurs en accord avec la technologie informatique : alors que les logiciels de *vérification* ont fait des progrès spectaculaires, les logiciels de *recherche* de démonstration sont toujours à la case départ.

Métaphores

(a) **Remugles numérolologiques** : les nombres de Gödel comme nouvelle Kabbale. Mais alors les 128 codes ASCII du langage habituel (majuscules, minuscules, chiffres, ponctuations, diacritiques, 40 pour « (», 41 pour «) », etc.) utilisés par l'ordinateur seraient tout aussi magiques. C'est ce que semble dire une certaine para-littérature : dans « les 9 milliards de noms de Dieu » (1953), Arthur C. Clarke – repris dans l'inénarrable *Matin des Magiciens* de L. Pauwell et J. Bergier – propose une synthèse entre Kabbale et informatique, on invoque Dieu par ordinateur ; l'humour très involontaire de cette nouvelle tient aux progrès technologiques : de nos jours, la recherche proposée par l'auteur (tous les mots de 7 lettres) ne prendrait que quelques secondes, c'est regrettable pour Dieu ! (b) **Métaphysiques** : c'est surtout le transfert de signification du préfixe grec μέτα, « à côté », « après », en quelque chose plus proche de l'allemand « *ur* » ou

du japonais « moto ». Pour prouver la cohérence, il faut passer dans un méta-système. C'est comme l'histoire des tortues : la Terre repose sur une tortue, qui repose sur une autre tortue, et il y en a jusqu'en bas... « Turtles all the way down ». (c) L'impossibilité de se penser soi-même : en premier lieu, une réduction douteuse de la pensée à un exercice formel, que reste-t-il de nos philosophes, écrivains, poètes, etc. à ce compte ? Deuxièmement un contresens littéral : les conditions (très techniques) sur le système T assurent précisément que T exprime suffisamment de choses sur elle-même. En fait sa propre cohérence est à peu près la seule propriété qui échappe à T. Mais du fait qu'on ne puisse pas revisser ses lunettes en les gardant sur le nez, faut-il en tirer des conséquences dramatiques, invoquer des méta-lunettes ? (d) L'auto-référence : le cadre dans le cadre, le tableau dans le tableau, la pièce dans la pièce, le peintre qui expose sa méta-peinture dans une métagalerie (aux toilettes), et ce monument de vulgarité, *Gödel-Escher-Bach*, entre Lewis Carroll et le *Matin des Magiciens* : tout ça pue l'arbitraire. (e) L'anti-totalitarisme : pas de système universel (Régis Debray). La lecture est douteuse (système = système formel), mais, bizarrement, assez juste. En effet, l'idéologie formaliste participe du scientisme du début XX^e s., scientisme qui ne s'exprimait pas que dans la science, mais aussi dans des systèmes politiques dé-fi-ni-tifs. D'ailleurs l'expression de Hilbert (par ailleurs anti-nazi convaincu) « la solution finale du problème de la cohérence » nous rappelle la filiation scientiste des totalitarismes du XX^e s. Qu'on le veuille ou non, la fondation absolue, irréfutable, des mathématiques aurait conforté le totalitarisme ambiant. (f) Attention, danger : le théorème de Gödel n'est pas la panacée contre l'obscurantisme scientiste, un peu de bon sens épistémologique suffit souvent. Un cas d'école : le « fameux » H. Simon fait « retrouver » par son ordinateur la troisième loi de Kepler, une relation entre deux séries de nombres a et t (demi-grands axes, périodes). Ici, Gödel ne nous aide en rien, car il s'agit de la mécanisation d'une partie très limitée des mathématiques. Par contre, on remarquera que la science cherche avant tout des questions, et ainsi l'apport de Kepler n'est-il pas d'avoir trouvé $a^3 = k.t^2$, mais d'avoir pensé à une relation possible (au demeurant facile à déterminer) entre a et t, au lieu de chercher le futur dans les astres comme son métier l'y invitait. Pour rester dans l'astrologie, les ordinateurs ont su « prédire » la mort d'une célèbre princesse à partir de Nostradamus ; mais seulement *après coup*, ce qui montre que le choix de la question reste crucial ! (g) Synthèse : en termes modernes, le formalisme, c'est la découverte d'une strate bureaucratique, informatique, dans les mathématiques, un peu comme l'état-civil est une strate de la vie. Si l'intérêt de cette découverte ne fait plus doute, cf. l'informatique, la réduction *formaliste* de l'activité mathématique à une bureaucratie formelle est très douteuse, ce que disait déjà... Poincaré (1854-1912) dans *Science et Méthode*. Par rapport aux remarques de Poincaré, l'apport de Gödel, c'est ce pied de nez, la réfutation

formelle d'une idéologie de la réduction formelle : qui se sert de l'épée périra par l'épée ! Le théorème doit être vu comme la fin définitive des *exagérations* – seulement des exagérations – formalistes, et reste un argument de poids contre le mécanisme et les réducteurs de tête en tout genre (de nos jours, les intelligents artificieux).

Réfutations

(a) **Sous les fleurs** : sous la plume d'auteurs n'en comprenant que le mot-à-mot, le théorème de Gödel est assez abscons. Plus on le regarde de près, moins on « pige », et c'est cette attitude que privilégient les formalistes atardés qui veulent à tout prix neutraliser le résultat. À les en croire, le théorème de Gödel ne serait qu'un exercice extrêmement brillant de manipulation formelle. C'est par ce biais qu'on arrive à créer une image subliminale numérique, à l'exact opposé de la signification du théorème de Gödel, qui conclut à l'échec d'une brutale réduction numérique/linguistique.

(b) **Réfutations formelles** : en provenance du milieu de l'intelligence artificielle, elles arrivent régulièrement, avec des variations saisonnières (l'année 2000 fut très faste, on se demande bien pourquoi). L'erreur est toujours la même, l'auteur utilise une inférence du genre « vrai = prouvable », et il n'a guère de mal à conclure. Si ces gens avaient un peu de culture, on pourrait leur rétorquer que : (i) Le théorème a été démontré, et tellement bien que la démonstration a même été vérifiée sur machine. (ii) Une réfutation produirait donc une contradiction dans le système T de mathématiques où tout cela se passe. (iii) Mais alors, T étant contradictoire, le théorème serait vrai par défaut : ce qui me tue me renforce !

Lectures modernes

(a) **Lecture académique** : Tarski (1901-1983) a « défini » la vérité : ainsi « A & B est vrai quand A est vrai et B est vrai », tout le reste à l'avenant, autrement dit A est vrai quand A est vérifié ; pour éviter les critiques des Béotiens, on dit que « et » est le « méta » de « & » : tout préexisterait donc à l'état de méta, comme dans le film *2001* (encore Arthur C. Clarke), où la méta-intelligence préexiste, ce qui est commode. Dans cette lecture « Thomiste », l'incomplétude, c'est le fossé entre vérité et prouvabilité, qu'on peut réduire au moyen de systèmes formels de plus en plus « forts », sans pouvoir jamais le combler. Mais gare au fagot : dans la Trinité Père = Sémantique (vrai/faux), Fils = Syntaxe (ou Verbe), Saint-Esprit = Méta, l'incomplétude apparaît comme non-consubstantialité du Fils, une sorte de... Nestorianisme logique. (b) **Un peu d'imagination** : d'abord, remarquons qu'un manque n'est pas forcément le manque de quelque chose, le vrai manque c'est celui qui ne se compense pas, c'est le puzzle inachevé car inachevable. De ce point de vue, la lecture académique « vrai ≠ prouvable » tend à réduire le sortilège en nommant la pièce

manquante : un déficit de vérité. C'est oublier l'échec de Tarski à donner une définition convaincante de la vérité : la laborieuse paraphrase citée plus haut s'écrit mathématiquement, mais n'a aucun intérêt épistémologique, c'est une pure tautologie cuisinée au méta. Un résultat mathématique doit être interprété, sinon on en arrive (Bergier, dans le *Matin des Magiciens*) à dire que paradoxe de Banach-Tarski (une bizarrerie liée à l'axiome du choix : un cube découpé en cinq morceaux, qui, recomposés, donnent un cube double) montre la possibilité de changer de taille à volonté, comme dans *Alice* ! Il faut admettre l'évidence, à savoir que la notion de vérité *ex nihilo* n'a aucun sens, et même si cette évidence nous amène à des questions sans réponse, c'est mieux que l'impasse de l'interprétation académique dominante. On pourrait voir l'énoncé de Gödel, la cohérence formelle, comme représentatifs des limbes de la signification, des énoncés qu'on peut écrire, mais dont la signification est assez diluée « je ne veux rien dire », en quelque sorte. Le paradoxe de Richard (1905) « le plus petit entier non-descriptible en moins de 15 mots », quoique moins précis que le théorème de Gödel, est la préfiguration de ce *diabolus in logica* qu'est l'énoncé de Gödel. Tout cela nous invite à revenir sur le Thomisme qui imprègne nos conceptions, en particulier celle de l'infini. La vérité n'a de sens que si l'infini du langage est pris au sens *actuel*, alors que l'expérience, en particulier informatique, penche vers une lecture *potentielle*, i.e., dynamique. Il y a un siècle, les tentatives de « potentialisation » se sont fourvoyées, principalement, en réduisant le potentiel à la collection de tous les possibles (modèles de Kripke), i.e., à l'actuel, un contresens absolu, les possibles alignés comme des papillons, des trophées de chasse. Il devrait être possible de reprendre cette discussion avec des idées plus originales... qu'on pourrait chercher, disons, dans le monde de la physique quantique.

● *Collected works*, Oxford Univ. Press (5 vol. depuis 1986).

► GÖDEL K. et al., *Le théorème de Gödel*, Sources du Savoir, Seuil, 1989. – GÖDEL R. et al., *Gödel remembered*, Bibliopolis, Napoli, 1986. – HOFSTADTER D., *Gödel-Escher-Bach, les brins d'une guirlande éternelle*, Dunod, 2000. – POINCARÉ H., *Science et Méthode*, Flammarion, 1908. – TURING A. et al., *La machine de Turing*, Sources du Savoir, Seuil, 1995. – VAN HEIJENOORT J., *From Frege to Gödel*, Van Nostrand, 1967.

Jean-Yves GIRARD

→ Démonstration ; Formalisme ; Informatique ; Logique et informatique ; Réalisme ; Réurrence.

GOETHE Johann Wolfgang von, 1749-1832

Connue principalement pour ses chapitres littéraires et poétiques, l'œuvre goethéenne comporte également de nombreux développements scientifiques. Les recherches de Goethe portèrent sur des questions anatomiques, zoologiques, géologiques et optiques ; elles

eurent toujours pour fonction de rendre compte de l'unité de la nature en termes de forme, de procès et de métamorphose. En géologie, Goethe soutint la thèse suivant laquelle le granit est une roche originelle et il s'efforça de décrire les transitions qui conduisent de cette roche aux autres roches. En zoologie, il crut trouver chez l'homme la trace de l'os intermaxillaire, présent chez de nombreux mammifères, et étayer ainsi la thèse de l'unité du règne animal. Il tenta ensuite de rendre compte d'une unité plus large encore en soutenant que le corps des insectes comme celui des vertébrés est composé de trois divisions majeures, chacune dotée d'organes appropriés. En botanique, il adopta une démarche analogue, en s'efforçant de rapporter les différents végétaux à la modification d'une plante originelle. À ses yeux, la démarche qu'il nomme « morphologique » et qui consiste à rendre compte de l'unité d'une multiplicité d'individualité par variation d'une forme idéale, était aussi destinée à rendre compte de l'unité des organismes végétaux et animaux. S'opposant à l'esprit analytique de l'anatomic, et partant du principe qu'une fois le vivant décomposé en élément « on ne peut plus le reconstituer et lui rendre la vie », il chercha à montrer comment les différents organes des plantes résultent des « métamorphoses » d'un organe unique, la feuille, et il développa la théorie suivant laquelle la vertèbre est l'archétype dont les autres os ne sont que des variations.

Sans doute la *Théorie des couleurs* est-elle la contribution scientifique de Goethe la plus célèbre. Dans la lignée de ses précédents essais scientifiques, il s'y oppose à la théorie newtonienne en rapportant toutes les couleurs à la polarité originelle de la lumière et de l'obscurité (cette thèse devait être reprise par Schelling, Hegel et Schopenhauer). Mais c'est certainement par sa forme que cet ouvrage est le plus remarquable. Dans la partie didactique de l'ouvrage, refusant d'ordonner son discours au partage disciplinaire des savoirs, Goethe tente de rendre compte de l'intégralité de l'expérience de la couleur, en traitant successivement des « couleurs physiologiques », des « couleurs physiques », des « couleurs chimiques », et de questions techniques et esthétiques. En outre, il accompagne cette partie didactique de deux autres parties, consacrées à l'histoire de l'optique et à une réfutation de la théorie newtonienne, qui semblent fondées sur une interprétation originale de l'historicité de la connaissance scientifique.

En développant en optique les thèmes antimécanistes d'une nature dynamique et polarisée et en projetant de donner à l'étude de la couleur la forme d'un système, Goethe participe indéniablement de ce phénomène culturel que les historiens des sciences nomment « science romantique » ou « philosophie romantique de la nature » ; il en est une figure emblématique. Il serait impossible de comprendre ses contributions scientifiques, sans doute aussi de les juger, sans prendre en compte cette appartenance. Mais il ne faudrait pas pour autant méconnaître leur spécificité. On a trop tendance à ignorer la diversité des projets et des méthodes de la

Naturphilosophie d'alors ; il y a pourtant peu en commun entre la philosophie spéculative de la nature d'un Hegel et la philosophie de la nature proprement romantique d'un Novalis. La position de Goethe est irréductible à l'une comme à l'autre. L'auteur de la *Théorie des couleurs* ne vise pas plus à penser spéculativement les sciences qu'à leur substituer un savoir poétique, il s'efforce bien plutôt d'investir rationnellement le champ scientifique en proposant un savoir systématique qui tente de rester au plus près de l'expérience tout en prenant en compte les apports d'une relation esthétique à la nature.

► AMRINE F., ZUCKER F.J. & WHEELER H. éd., *Goethe and the Sciences : a Reappraisal*, Dordrecht, Reidel, 1987. — CUNNINGHAM A. & JARDINE N. éd., *Romanticism and the Science*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1990. — ÉLIE M., *Lumière, couleur et nature. L'optique et la physique de Goethe et de la Naturphilosophie*, Paris, Vrin, 1993. — ENGELHARDT D. VON, « Quellen und Zeugnisse zur Wechselwirkung zwischen Goethe und den romantischen Naturforschern », *Acta Leopoldina*, 20, 1992, p. 31-55 ; *Historisches Bewusstsein in der Naturwissenschaft von der Aufklärung bis zum Positivismus*, Fribourg-en-Brisgau/Munich, Karl Albert, 1979. — FINK K.J., *Goethe's History of Science*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1991. — KANS K.T. éd., *Philosophie des Organischen in der Goethezeit*, Stuttgart, Franz Steiner, 1994. — POGGI S. & BOSSI M. éd., *Romanticism in Science : Science in Europe 1740-1840*, Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1994, p. 47-74. — WELL G.A., « Goethe's Geological Studies », *Publications of the English Goethe Society*, 35, 1965, p. 92-137 ; « Goethe's Scientific Method and Aims in the Light of his Studies in Physical Optics », *ibid.*, 38, 1968, p. 537-550 ; « Goethe and Evolution », *Journal of the History of Ideas*, 28, 1967, p. 537-550 ; « Goethe and the Intermaxillary Bone », *British Journal for the History of Science*, 3, 1967, p. 348-361.

Emmanuel RENAULT

→ Développement ; Naturphilosophie ; Vision.

GONSETH Ferdinand, 1890-1975

L'option philosophique primordiale de Ferdinand Gonsseth posait que « dans l'exercice de sa recherche, le chercheur doit être reconnu et doit se reconnaître libre, maître et responsable de ses choix ». Gonsseth qualifiait sa philosophie, l'idonéisme de dialectique (la revue qu'il a fondée s'appelle *Dialectica*) et d'ouverte à l'expérience. Tout au long de ses quatorze livres et 165 articles, il est resté fidèle à ce parti pris de respecter la liberté de la recherche scientifique. C'est en mathématicien professionnel que Gonsseth s'attaqua au problème philosophique de la crise des fondements des mathématiques et c'est à cette occasion qu'il produisit son œuvre maîtresse, *La Géométrie et le problème de l'espace*. Son point de départ est une analyse soignée et rigoureuse de la méthodologie qui est mise en œuvre dans la science réelle. La philosophie des sciences qui s'appuie sur cette analyse méthodologique ne prétend en aucune manière codifier la science ; elle « n'introduit aucune contrainte et ne fait que concéder en droit à

la recherche des libertés dont elle jouit en fait ». Les principes qu'elle dégage comme les principes de révisibilité, de structuralité, de technicité ou d'intégralité ne sont pas des principes premiers, leur légitimité est celle de « la clef qui est faite pour ouvrir une porte ».

C'est seulement à la fin de sa vie, et après avoir élargi sa contribution à des problèmes de philosophie générale, qu'avec une extrême prudence, Gonsseth se tourna vers une réflexion philosophique concernant les sciences humaines. C'est à l'occasion de ces recherches qu'il dégagea le concept de référentiel, « organe du sujet pour la mise en œuvre de son projet d'exister » dont il n'a malheureusement pas eu le temps d'exploiter toute la fécondité.

● L'ensemble de son œuvre, à partir des *Fondements des mathématiques* est édité à Paris chez Blanchard, 1926-1974.

Gilles COHEN-TANNOUDJI

→ Idonéisme ; Référentiel

GRAVITATION

Que la plupart des objets, une fois détachés de ce qui les retient (arbre, main, etc.) tombent par terre alors que certaines autres entités, le feu, la fumée, etc., dans les mêmes conditions, s'élèvent spontanément en l'air, c'est là une constatation qui n'a certainement pas échappé aux premiers hommes — suggérant l'idée que l'ensemble des entités existantes se divisent en deux catégories : le lourd et le léger. Que la tendance à tomber caractéristique des objets lourds se maintienne même lorsque leur mouvement est entravé et qu'elle puisse être convertie en « mouvement forcé » vers le haut, c'est ce que démontre le comportement des poids placés sur les plateaux d'une balance, l'un des plus anciens instruments de mesure, fondé sur l'existence de la gravité.

Si la *Mécanique*, œuvre attribuée à Aristote, donne une première ébauche de théorie de la balance, ce n'est que chez Archimède que l'on trouve une véritable théorie quantitative établie à partir d'un nombre limité d'axiomes (*De l'équilibre des plans ou des centres de gravité des plans*).

Les atomistes grecs, pour leur part, prônent une conception selon laquelle les atomes possèdent en propre une certaine lourdeur, concept universel fondé sur une distinction absolue, dans le vide, entre le haut et le bas, se manifestant sous forme de tendance des atomes à se diriger vers le bas, — ce qui obligea à considérer que tout mouvement vers le haut est « forcé » : « Démocrite et ses partisans, écrit Simplicius, pensent... que toute chose est lourde, et que c'est seulement en vertu de sa moindre lourdeur que le feu se dirige vers le haut, parce qu'il y est poussé par quelque chose qui le surpasse, selon un processus qui donne l'impression que le feu est léger » (*De Coelo*, 712 27-31). Il n'est pas interdit de voir dans cette conception l'embryon de ce qui devait devenir le concept de

gravitation universelle, auquel manquerait toutefois l'idée d'attraction mutuelle entre les corps. La tradition démocritienne resta vivace pendant toute l'Antiquité ; on la retrouve chez Épicure et Lucrèce. Sa renaissance, deux mille ans plus tard, essentiellement dans les écrits de Pierre Gassendi, a joué un rôle important dans la définition du cadre conceptuel à l'intérieur duquel Newton développera sa théorie de la gravitation.

Dans son ouvrage cosmogonique (le *Timée*), Platon s'oppose à la conception des atomistes (62c-63). Pour expliquer l'apparente différence entre le haut et le bas, le lourd et le léger, Platon établit une analogie avec la balance : « si deux corps sont soulevés en même temps parce qu'on soulève le fléau, nécessairement le plus petit cède plus facilement à la contrainte que le plus grand qui résiste et cède plus difficilement. On dit alors que l'un est lourd et se porte vers le bas et que le petit est léger et se porte vers le haut ». Ainsi donc, pour Platon, lourdeur et légèreté, tout comme le haut et le bas, sont des concepts relatifs, liés à la tendance du même à se rattacher au même. Avec un peu d'indulgence, on peut voir dans la doctrine selon laquelle « tous les mouvements qui se font dans l'Univers [...] portent chaque chose vers sa propre espèce, (*Timée*, 81a), l'embryon du concept de la gravitation en tant qu'attraction entre corps ; à remarquer cependant que cette attraction n'est pas universelle puisqu'elle n'affecte que les substances de même espèce.

Aristote, tout en reprenant à son compte la notion platonicienne de cosmos sphérique, rejette l'idée que la lourdeur et la légèreté sont des notions relatives. S'opposant aux atomistes, il refuse d'admettre que tous les corps ont un poids et que placés dans le vide, ils se dirigent tous vers le bas naturellement (*De Coelo*, 308a 7-13) ; il refuse donc l'idée que le mouvement vers le haut est un mouvement forcé (*ibid.*, 277a 33-39). Pour lui, la lourdeur et la légèreté sont toutes deux des propriétés absolues. La tendance naturelle des divers éléments est de chercher à rejoindre leur lieu naturel dans le cosmos pour ensuite y demeurer (« La nature est la source et la cause du mouvement et du repos », *Physique* II, 1). Le cosmos est plein, de forme sphérique et de taille finie. C'est le lieu qui, au sein du cosmos, est la cause naturelle des mouvements naturels et à chaque élément correspond un type de mouvement : un objet « absolument lourd », composé de l'élément terre, « se déplace vers le bas, en direction du centre » ; autrement dit, le centre du cosmos est son lieu naturel et ce centre coïncide avec le centre de la terre. Un objet « absolument léger », composé de l'élément feu, « se déplace vers le haut, en direction de l'extrémité du cosmos » ; son lieu naturel se situe sur la sphère qui délimite le cosmos. Les objets intermédiaires, composés d'eau et d'air, se déplacent vers des positions intermédiaires au sein du cosmos. Les objets, tels que les étoiles, qui sont composés du cinquième élément, l'éther, se déplacent éternellement sur des orbites circulaires à la périphérie du cosmos et permettent de définir les autres directions, en dehors du haut et du bas

(voir H. Lang, « Inclination, Impetus and the Last Aristotelian », *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*, 46, (1996), p. 221-260). Tout mouvement qui s'oppose au mouvement naturel d'un corps est un mouvement forcé, imposé au corps par une cause extérieure (*De Coelo*, Livre IV, chapitre III).

Ces conceptions ne faisaient pas l'unanimité, même au sein de l'école d'Aristote, le Lycée, dont le troisième directeur Straton (287 avant notre ère), rejetait à la fois la notion de légèreté absolue, l'idée que les étoiles puissent ne pas être composées de matière ordinaire et l'impossibilité du vide. Au Moyen Âge, se développa une tradition anti-aristotélicienne : Marcus Trivisano (mort en 1378), s'appuyant sur le témoignage des sens, déclarait que puisque « la légèreté doit être rejetée, rien n'est léger » ; reprenant à son compte l'argument du rasoir d'Occam, il affirmait que le concept de légèreté absolue est inutile, dans la mesure où tous les phénomènes peuvent être expliqués en termes de lourdeur relative (*De macrocosmo, i.e., de maiori mundo* ; voir M. Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages*, Madison, The U. of Wisconsin Press, 1959).

Malgré ces dissensions, la tradition aristotélicienne est restée dominante dans l'Antiquité et au Moyen Âge — fixant le sort de la philosophie naturelle. Au VI^e siècle de notre ère, Jean Philopon, chrétien de tendance néoplatonicienne, proposa une doctrine, variante de l'aristotélisme, qui devait exercer une très grande influence sur la pensée arabe et chrétienne médiévale. Tout en maintenant la distinction absolue entre lourd et léger, il transféra la cause active du mouvement du lieu à l'objet même : « Ainsi le poids et la légèreté n'appartiennent pas aux choses qui les possèdent à cause de quelque chose d'autre qu'elles-mêmes : le poids est une cause active du mouvement vers le bas, la légèreté du mouvement vers le haut chaque fois que les choses dotées de poids ou de légèreté sont en un lieu qui est contraire à leur nature et que rien ne s'oppose à leur mouvement » (*Corollaire sur le vide. Commentaire de la physique d'Aristote*, 678).

Le système copernicien, héliocentrique, en délogeant la terre de son lieu naturel, le centre du cosmos, a porté un coup sévère au concept de lieu naturel. Il devenait en effet difficile de considérer la chute des corps vers le centre de la terre, désormais en mouvement, comme un mouvement naturel dirigé vers un lieu fixe au sein du cosmos. D'autres phénomènes suggéraient l'idée que la gravité puisse être fondée sur une attraction s'exerçant entre les corps matériels. L'étude détaillée des marées avait montré le rôle joué par une influence de la lune sur la terre. L'investigation, par Gilbert, des forces magnétiques fournissait d'ailleurs un modèle de force agissant entre deux corps — et sur chacun d'eux, puisque la limaille de fer attire l'aimant tout autant que l'aimant attire la limaille. Lorsque Kepler découvrit que les vitesses des planètes sur leurs orbites elliptiques autour du soleil dépendent de leur distance au soleil lui-même, il fit l'hypothèse hardie d'une force gravitationnelle agissant entre les planètes et le soleil, mais aussi entre la lune et la terre (force

qu'il pensait pouvoir être d'origine magnétique) ; de l'existence de cette force résultait à la fois le phénomène des marées et la forme des orbites planétaires et lunaires. L'idée selon laquelle le mouvement gravitationnel était dû à une force mutuelle entre tous les corps commença à acquérir de la crédibilité avant même qu'en soit élaborée une théorie quantitative (voir M. Jammer, *The Concept of Force*, Cambridge (MA), Harvard U. Press., 1957).

Il fallut attendre que soit développé le concept d'inertie – conçue comme la tendance « naturelle » d'un objet à persister dans son état soit de repos soit de mouvement rectiligne uniforme dans l'espace (absolu) – pour qu'apparaisse clairement la nécessité d'une nouvelle dynamique, capable de fournir une théorie quantitative de la force de gravitation s'exerçant entre tous les corps. Bien que Galilée et Descartes aient contribué de façon notable à l'établissement du principe d'inertie, celui-ci n'apparaît clairement que chez Newton – qui attribue encore l'inertie à une force (passive) inhérente aux corps, qu'il appelle *vis insita* et qu'il oppose à la force appliquée (*vis impressa*) qui, elle, fait dévier le corps en dehors de sa trajectoire inertielle « naturelle ». Newton fut le premier à développer de façon systématique la nouvelle dynamique puis à exposer une théorie de la gravitation fondée sur cette dynamique. Newton considérait la gravitation comme une force universelle en un double sens ; d'abord, au sens qu'elle affecte chacune des particules composant l'univers lors de son mouvement dans l'espace (absolu) – l'atomisme antique connaissait alors un regain d'intérêt ; ensuite, au sens que pour tout corps, quelle que soit sa composition, la masse inertielle et la masse gravitationnelle sont dans un rapport constant (voir l'entrée PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE) – sans pour autant considérer la gravitation comme une propriété inhérente à la matière. Les concepts newtoniens d'espace et de temps absolus furent amplement critiqués du point de vue philosophique par les contemporains, notamment Huyghens et Leibniz, qui cherchaient à maintenir une forme de théorie relationnelle de l'espace et du temps ; mais il apparut finalement que cette conception relationnelle ne pouvait servir de base à la dynamique de Newton. Néanmoins, à la fin du XIX^e siècle, les physiciens s'aperçurent que la dynamique newtonienne n'impliquait pas le concept d'espace absolu qui n'était donc pas nécessaire : de fait, la dynamique de Newton sélectionne une classe de systèmes de référence (les référentiels « inertiels ») privilégiés du point de vue cinématique, aucun d'entre eux ne jouissant d'un statut privilégié par rapport aux autres (voir l'entrée RELATIVITÉ).

Newton n'a jamais considéré sa loi de la gravitation – qui fait apparaître la force de gravitation s'exerçant sur un corps comme dépendant de l'action d'autres corps qui en sont éloignés – comme autre chose qu'une description phénoménologique, requérant une explication plus approfondie. Bien que le statut de ces forces « agissant à distance » ait été abondamment discuté d'un point de vue philosophique à la fois par Newton,

par ses contemporains et par leurs descendants tout au long des XVIII^e et XIX^e siècles, le modèle gravitationnel n'en est pas moins devenu paradigmatique dans le traitement des forces non gravitationnelles, telles que les forces électrostatique ou magnétique (par Coulomb) et les forces de capillarité (par Laplace). De fait, le programme laplacien d'une physique des forces centrales, plus tard adapté par Helmholtz au nouveau concept de conservation de l'énergie, est la pierre angulaire sur laquelle repose la conception du monde mécaniste, majoritairement adoptée par les physiciens jusqu'à la fin du XIX^e siècle.

Cette conception du monde eut à subir un premier assaut lorsque l'on voulut y intégrer les phénomènes électrodynamiques. Il apparut alors que, pour sauver le concept d'action à distance entre particules, il était nécessaire de faire dépendre les forces électromagnétiques de la vitesse et de l'accélération de ces particules, provoquant des ravages dans la conception des forces centrales. L'unification de l'optique et de l'électrodynamique, opérée par Maxwell sous l'égide des concepts de champ électrique et de champ magnétique, introduisit un nouveau paradigme d'explication des attractions entre particules qui bientôt supplanta celui des actions à distance. Une particule crée un champ dans l'espace qui l'entoure ; une autre particule réagit à l'influence de ce champ au point où elle se trouve à chaque instant ; à l'idée d'un effet pouvant s'exercer à travers l'espace vide séparant deux particules, on a ainsi substitué l'image, plus satisfaisante, d'un champ se propageant d'un point à un autre selon des équations du champ parfaitement définies. Il apparut alors que la vitesse de propagation de ce champ électromagnétique dans le vide n'est pas infinie mais égale à la vitesse de propagation de la lumière.

Il est relativement facile de donner à la théorie de Newton la forme d'une théorie du champ, grâce au concept de potentiel gravitationnel, noté ϕ . L'équation du champ, dans ce cas, est de la forme $\Delta\phi = \rho$, où Δ désigne l'opérateur laplacien et ρ la densité de matière (définie comme la masse de l'unité de volume). Évidemment, dans cette représentation, le champ se propage de façon instantanée d'un point à un autre ; mais une telle équation du champ peut toujours être considérée comme la limite statique d'un système d'équations plus compliqué régissant la propagation des effets gravitationnels (de la même manière que l'équation de Coulomb, qui lie le potentiel électrostatique à la densité de charge électrique de la matière, doit être considérée comme la limite électrostatique des équations de l'électromagnétisme de Maxwell). Il semble que personne avant Einstein ne se soit avisé de ce que la théorie newtonienne de la gravitation, lorsqu'elle est écrite sous cette forme et associée à l'égalité des masses inertielle et gravitationnelle, conduit à une interprétation radicalement nouvelle du champ de gravitation. Considérons l'application de la deuxième loi de Newton (qui, dans un référentiel inertielle, s'écrit $m_0 a = F$) à la description, dans un certain référentiel linéairement accéléré, d'une particule de masse gravitationnelle m_g . Dans ce

référentiel, $m_0 a = F + m_0 a_1$, $m_0 a_1$ représentant la force d'inertie ajoutée pour tenir compte de ce que le référentiel considéré n'est pas inertielle. Comme, dans le cas présent, $F = m_g g$, où g représente le champ de gravitation (la force par unité de masse gravitationnelle), il s'en suit que $m_0 a = m_g g + m_0 a_1$. Mais comme $m_0 = m_g$, les deux termes du membre de droite peuvent être regroupés, et l'on obtient : $m_0 a = m_0 (g + a_1)$. Il est donc impossible d'établir une distinction absolue (c'est-à-dire indépendante du référentiel) entre le terme gravitationnel et le terme inertielle figurant dans le membre de droite de l'équation. Rien n'empêche de considérer que le référentiel est inertielle et le terme de droite entièrement gravitationnel : $g' = g + a_1$. Rien ne permet de caractériser les référentiels inertiels à l'intérieur de la classe des référentiels linéairement accélérés. Tel est le contenu du principe d'équivalence dans le cas newtonien. En revanche, l'inverse n'est pas vrai – ce dont Einstein eut du mal à se persuader. Il n'est pas vrai que tout champ gravitationnel newtonien peut être éliminé grâce à une transformation faisant passer à un référentiel linéairement accéléré ; ce n'est possible que si g est de la forme $g(t)$, ne faisant pas intervenir les coordonnées spatiales. En effet, si g dépend des coordonnées spatiales, ses dérivées par rapport à l'espace, $\partial_i g_j$, définissent ce qu'il est convenu d'appeler des forces de marée (car ce sont elles qui sont à l'origine du phénomène des marées) ; ces forces sont universelles, en ce sens qu'elles sont les mêmes dans tout référentiel linéairement accéléré. En sorte que tout champ de gravitation pour lequel les forces de marée ne sont pas nulles ne peut pas être effacé par changement de référentiel linéairement accéléré.

Jusqu'à présent il n'a été question que de gravitation newtonienne, reposant sur la dynamique classique (Newton-Galilée) ; sa description s'est effectuée en termes d'espace tridimensionnel et de temps universel. Mais comme l'indique la théorie de la relativité*, il faut introduire une nouvelle cinématique pour laquelle il est préférable de parler en termes d'espace-temps* unifié à quatre dimensions. Il est possible de donner de la théorie newtonienne de la gravitation une formulation quadridimensionnelle où le principe d'équivalence* se trouve intégré sous forme de connexion inertio-gravitationnelle, laquelle détermine les trajectoires des particules tombant en chute libre (géodésiques du genre temps), où le terme « chute libre » englobe les effets inertiels et gravitationnels. La gravitation n'apparaît plus alors comme une force faisant dévier les particules de leurs trajectoires inertielles, mais comme une distorsion ou courbure de l'espace-temps qui modifie la relation entre ces trajectoires. En termes physiques, le fait que le tenseur de courbure d'un champ inertio-gravitationnel ne soit pas nul manifeste l'existence de forces de marée gravitationnelles. En l'absence de gravitation (espace-temps plat), l'accélération relative entre deux trajectoires de chute libre voisines est nulle. En présence de gravitation, cette accélération relative donne la mesure des forces de marée gravitationnelles s'exerçant entre particules se

déplaçant le long de ces trajectoires. Les équations du champ de gravitation font apparaître la façon dont la courbure de l'espace-temps est déterminée par la présence de matière.

Mais la cinématique classique doit aussi être modifiée. Contrairement à ce qu'Einstein avait d'abord pensé, il est possible, en adoptant la cinématique de la relativité restreinte, de bâtir une théorie scalaire de la gravitation, reposant sur une fonction potentiel (gravitationnel) qui incorpore le principe d'équivalence. Cette théorie ne prédit ni la déviation gravitationnelle de la lumière ni la valeur observée de l'avance du périhélie de Mercure ; deux raisons empiriques qui la rendent inacceptables. La théorie suivante par ordre de simplicité décroissante, la théorie d'Einstein, repose sur une connexion inertio-gravitationnelle de courbure non nulle, qui se déduit de façon unique d'un champ de tenseurs métriques, lequel détermine la chrono-géométrie de l'espace-temps, assurant la compatibilité entre ces deux structures d'espace-temps. La théorie ainsi obtenue est appelée théorie de la relativité générale* ; elle reste à ce jour, ayant résisté à quatre-vingt-dix ans de mise à l'épreuve observationnelle, la meilleure théorie de la gravitation dont nous disposions.

► CIUFFOLINI I. & WHEELER J.A., *Gravitation and Inertia*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1995. – JAMMER M., *The Concept of Force*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1957. – O'BRIEN D., *Theory of Weights in the Ancient World*, vol. 1, *Democritus Weight and Size*, Paris/Leyde, Les Belles Lettres/E.J. Brill, 1981 ; vol. 2, *Plato Weight and Sensation*, *ibid.*, 1982. – OHANIAN D. & RUFFINI R., *Gravitation and Spacetime*, New York/Londres, W.W. Norton, 2^e éd., 1994.

John STACHEL
(trad. F. Balibar)

→ Causalité (Principe de) ; Champs ; Constantes physiques ; Expansion de l'univers ; Force ; Inertie (Principe d') ; Marées ; Masse ; Mouvement ; Newton ; Relativité ; Temps ; Trou noir.

GROUPES ET SYMÉTRIE

MATHÉMATIQUES

La théorie des groupes est l'élaboration mathématique de l'idée de symétrie. Celle-ci a un certain caractère intuitif et elle est sous-jacente à des activités humaines telles que les motifs décoratifs mis en œuvre dans la plupart des civilisations ; mais il a fallu de longs siècles pour élaborer le concept mathématique de groupe et il s'est cristallisé non pas dans le domaine de la géométrie, comme on aurait pu s'y attendre, mais bien dans le secteur beaucoup plus abstrait des équations algébriques.

Chez les classiques de l'Antiquité, le terme symétrie était employé pour signifier « proportions harmonieuses » ; de nos jours, ce terme a pris un sens différent et il se réfère, dans le langage courant, à la symétrie bilatérale que l'on observe en particulier chez beaucoup d'êtres vivants. D'après Viollet-le-Duc « Symétrie veut dire aujourd'hui, dans le langage des

architectes, non pas une pondération, un rapport harmonieux des parties d'un tout, mais une similitude des parties opposées » ; il s'agit bien de la symétrie bilatérale que donne l'image dans un miroir.

Mais cette notion de symétrie doit être étendue : aussi bien la nature, vivante ou minérale, que les arts décoratifs nous montrent de nombreux exemples de phénomènes qui présentent des similitudes de certaines de leurs parties sans que ces parties soient nécessairement opposées par rapport à un plan ou à un axe privilégié. Il suffit de penser à la structure d'une fleur, à celle d'un coelentéré ou à celle d'un cristal de glace (symétrie « rotatoire »), aux frises décoratives (symétrie « de translation ») ou encore à la merveilleuse coquille du nautilus en forme de spirale logarithmique, courbe qui fascinait Jacques Bernoulli (« eadem mutata resurgo », symétrie « de similitude »). Dans ces divers cas, on emploie encore le terme de symétrie en le qualifiant d'un mot qui évoque quel genre de transformation associe les unes aux autres les parties semblables ; l'étude de ces symétries (au sens étendu) est donc indissociable de celle de certaines transformations. Le concept de groupe est précisément produit par une systématisation de l'idée de transformation d'un ensemble en lui-même ; une fois maîtrisé, il a donné un outil très puissant d'unification et de recherche dans des domaines aussi divers que la géométrie élémentaire, la théorie des équations algébriques, la théorie des fonctions, la topologie, la physique théorique.

Premières manifestations de la symétrie

La symétrie bilatérale externe s'observe d'une manière générale chez les animaux qui se déplacent ; la verticale et l'axe du déplacement déterminent un plan privilégié qui sert de plan de symétrie. À chaque partie du corps hors de ce plan correspond une partie semblable de l'autre côté, de manière que le segment qui joint ces deux parties ait ce plan pour plan médiateur. Au contraire, les animaux immobiles ou peu mobiles, ainsi que les plantes n'ont aucun plan privilégié mais seulement un axe (la verticale) ; leur symétrie est de nature « rotatoire », des parties semblables de leurs corps se correspondant par certaines rotations autour de cet axe (oursin, étoile de mer, fleurs).

Les arts plastiques exploitent la symétrie bilatérale dans la peinture, la sculpture et l'architecture ; les masques et les représentations qui en dérivent mettent en œuvre cette symétrie d'une manière particulièrement frappante, comme l'a remarqué C. Lévi-Strauss à propos de la Chine des Shang, de la Polynésie et de la côte nord-ouest de l'Amérique du Nord.

La symétrie bilatérale n'est souvent qu'approximative. On sait que les organes internes des animaux à symétrie bilatérale sont beaucoup moins symétriques que l'apparence externe de leurs corps (cœur à gauche, foie à droite, etc.). Du point de vue culturel, la droite et la gauche sont chargées de significations bien distinctes dans la plupart des civilisations. Chez la majorité des individus, la main droite est plus habile que la

main gauche, ce qui entraîne une dissymétrie dans les gestes ; cela devient surtout évident avec l'écriture. Nous avons de même une oreille, un pied et un œil dominants ; cette dissymétrie fonctionnelle est la manifestation d'une dissymétrie du cerveau sans doute liée à l'utilisation du langage.

L'opposition culturelle entre la droite et la gauche fait partie de la vaste série des oppositions binaires : devant/derrrière, dessous/dessus, avant/après, froid/chaud, sec/humide, jour/nuît, mâle/femelle. À cette liste on peut ajouter les catégories chinoises du Yin et du Yang, les relations de parenté, les traits pertinents des systèmes phonologiques.

Abordons maintenant les types de symétries au sens étendu du terme, comme les symétries de révolution des fleurs, des graines, des radiolaires, des échinodermes ou des cnidaires. Sous une forme géométrique abstraite, on rencontre de telles symétries dans les polygones réguliers ; pour chaque entier $n \geq 3$, on obtient un n -gone régulier (convexe) en prenant comme sommets les points qui divisent un cercle en n arcs égaux et en joignant chaque sommet aux deux sommets voisins. Ces polygones étaient sans doute connus depuis une haute Antiquité ; des tablettes cunéiformes trouvées à Suse, datant probablement d'environ 1700 ans avant notre ère, considèrent les polygones réguliers à 5, 6 et 7 côtés. La géométrie grecque avait développé des méthodes de construction des n -gones réguliers pour $n = 3$ (triangle équilatéral), 4 (carré), 5, 6 et 10 ; les cas $n = 7$ ou 9 avaient aussi été considérés, mais ils conduisaient à des problèmes plus compliqués, qualifiés de solides, dont la solution passait par des courbes telles que les coniques. L'aire du cercle est étudiée, au douzième livre des *Éléments* d'Euclide, en approchant le cercle par des n -gones réguliers avec n de plus en plus grand. Outre des polygones réguliers convexes, on obtient, pour $n \geq 5$, des polygones réguliers étoilés, en joignant les n sommets de deux en deux ou de trois en trois, etc.

En dimension 3, seuls cinq polyèdres réguliers convexes existent : le tétraèdre, le cube, l'octaèdre, le dodécaèdre et l'icosaèdre. Les faces du tétraèdre, de l'octaèdre et de l'icosaèdre sont des triangles équilatéraux ; celles du cube sont des carrés et celles du dodécaèdre sont des pentagones réguliers. La connaissance de ces solides est sans doute aussi très ancienne ; des fouilles ont mis au jour des dés ou des grains de collier dodécaédriques étrusques ou celtiques à partir de la première moitié du premier millénaire avant notre ère. Dans le *Timée*, Platon élabore une théorie cosmologique où les quatre éléments sont représentés par le tétraèdre (feu), l'octaèdre (air), le cube (terre) et l'icosaèdre (eau) ; de là vient le nom de solides platoniciens attribué à ces polyèdres. Kepler avait tenté d'expliquer la répartition des planètes autour du Soleil en les plaçant sur des sphères chacune circonscrite à un polyèdre régulier lui-même circonscrit à la sphère précédente. Le treizième et dernier livre des *Éléments* d'Euclide est consacré à l'étude et à la construction des cinq polyèdres ; on en attribue l'origine à Théétète

(début du IV^e s. avant notre ère). Le tétraèdre, le cube et l'octaèdre sont des formes courantes de cristaux ; on a trouvé récemment des quasi-cristaux de forme icosaédrale, mais il n'existe pas de réseau régulier ayant ce type de symétrie. La nature vivante affective au contraire la forme icosaédrale, fréquente chez les virus ou chez les radiolaires. Aux cinq polyèdres réguliers convexes il faut adjoindre quatre polyèdres réguliers étoilés (deux dodécaèdres et deux icosaèdres), dont les faces se recoupent ; il existe aussi 13 polyèdres convexes quasi réguliers, découverts par Archimède, dont les faces sont des polygones réguliers alternativement de deux espèces différentes.

Les frises, les myriapodes, un système de deux miroirs parallèles se faisant face donnent des exemples de symétries de translation (à une dimension). Beaucoup de systèmes de nature temporelle ont aussi une symétrie de ce type : le calendrier, le rythme en poésie ou en musique. On y rencontre des motifs qui se répètent identiquement après un certain intervalle d'espace ou de temps ; une autre manière de s'exprimer qualifie ces phénomènes de périodiques. Un motif spatial périodique dans le travail du bois ou de la pierre résulte le plus souvent de la périodicité temporelle du geste de l'artisan qui produit ce motif. La musique connaît une périodicité d'un autre type : la gamme se reproduit, avec les mêmes intervalles, après une « translation » (en hauteur) d'une octave. La division euclidienne d'un nombre entier p par un entier $m \geq 1$ fait apparaître un quotient entier q et un reste $r \in [0, m - 1]$ tels que $p = mq + r$; on voit que, lorsque p varie, les restes r se reproduisent périodiquement avec la période m .

En dimension 2 ou 3, on rencontre de nombreux exemples de symétries de translation. Les « pavages » du plan (carrelages), les empilements de pierres ou de briques d'un mur ou l'arrangement régulier des cellules dans les rayons de cire d'une ruche sont constitués d'un motif qui se reproduit par des translations dans le plan ; les empilements de caisses ou de boulets de canon et les structures cristallines (empilements d'atomes ou de molécules) en sont l'analogue en dimension 3.

Les exemples précédents peuvent d'ailleurs présenter une symétrie supplémentaire, de nature bilatérale ou rotatoire : le motif élémentaire d'une frise peut ainsi admettre une symétrie bilatérale par rapport à un axe perpendiculaire à celui de la frise. Dans un carrelage à carreaux rectangulaires ou losanges, le motif élémentaire a deux symétries bilatérales ; si les carreaux sont carrés il y a une symétrie de rotation d'un quart de tour et si les carreaux sont hexagonaux (« tommettes ») il y a une symétrie de rotation d'un sixième de tour (60°).

Les spirales et les hélices présentent un genre de symétrie particulièrement esthétique ; on les rencontre dans la nature sous la forme des coquilles de mollusques, des cornes des chèvres ou des antilopes ou de l'arrangement régulier des feuilles ou des graines de certaines plantes (« phyllotaxie »). Cette fois le motif élémentaire est reproduit par une similitude, transformation géométrique qui combine une rotation et un

changement d'échelle. Dans les exemples cités, ce changement d'échelle est clairement lié à la croissance des êtres vivants considérés : à chaque étape de la croissance, un élément de même forme mais de taille supérieure s'ajoute, la forme globale restant la même. Un exemple géométrique abstrait de cette situation est donné par le « rectangle d'or », dont la forme est telle que, lorsqu'on lui ajoute un carré le long de son plus grand côté, le grand rectangle obtenu soit semblable au rectangle de départ ; depuis la Renaissance, on a beaucoup spéculé sur le caractère particulièrement harmonieux de ce rectangle et on a voulu le retrouver dans les édifices grecs de l'âge classique. Quoi qu'il en soit, les symétries de similitude de la spirale ou des hélices ont souvent été employées à des fins décoratives ; il suffit de songer aux volutes des chapiteaux ioniques ou à certains motifs de l'art scythe.

Transformations

La géométrie classique ignorait le concept de transformation ; elle considérait seulement des figures liées par certaines relations comme l'égalité ou la similitude. C'est ainsi qu'Euclide, dans son premier livre, parle de figures égales, d'ailleurs sans en donner de définition, mais en se référant à la notion commune 4 « des choses qui coïncident sont égales » et au postulat 4 « tous les angles droits sont égaux » ; le premier cas d'égalité des triangles (proposition 4) est établi en amenant les deux triangles à se superposer par un déplacement qui n'est pas explicité. Au livre VI, Euclide définit des figures rectilignes semblables comme ayant des angles correspondants égaux et les côtés qui les entourent proportionnels. Archimède établit que le rapport de l'aire d'une ellipse à celle de son cercle principal est égal au rapport du petit axe au grand axe en reliant l'ellipse et le cercle par ce que l'on a appelé plus tard une affinité orthogonale. Mais la projection stéréographique, utilisée par Ptolémée dans la construction d'un planisphère (II^e s. de notre ère), est déjà conçue comme une transformation.

On retrouve l'affinité orthogonale systématiquement utilisée dans la géométrie arabe à partir de Thâbit ibn Qurra (IX^e s.) ; le même auteur a aussi exploité les projections cylindriques ou coniques qui servaient par ailleurs dans la construction des astrolabes. Il a ainsi amorcé un nouveau type de géométrie, développée ensuite au X^e s. par Ibn Sahl, Al-Qūhī, Ibn al-Samhī et Ibn al-Haytham.

La pratique de la perspective chez les peintres de la Renaissance a conduit G. Desargues (1639) à bâtir une nouvelle théorie des coniques, dominée par l'idée de projection. C'est aussi au XVII^e s. que l'on voit apparaître de nouveaux genres de transformations comme l'inversion introduite par Fermat dans sa tentative de restitution des *Porismes* d'Euclide. Les figures associées par certaines transformations réapparaissent dans les développements géométriques du début du XIX^e s., avec la *Géométrie de Position* de L. Carnot (1803) et le *Traité des propriétés projectives des figures* de

J.-V Poncelet (1822) ; ce dernier s'attache à rechercher les propriétés qui restent invariantes par les projections coniques. A.F. Möbius (1827) envisage une classification des propriétés géométriques selon le type « d'apparement géométrique » considéré : égalité et similitude, affinité, collinéation (qui transforme les lignes droites en lignes droites).

Les transformations géométriques se sont aussi naturellement introduites dans la géométrie des coordonnées cartésiennes ; L. Euler (1748) étudie systématiquement les changements de coordonnées, qui s'expriment par des formules de transformation linéaires. Cette fois-ci, la transformation est considérée en elle-même et non plus comme un « apparement » de figure à figure. Euler établit que le degré d'une courbe algébrique est invariant par changement de coordonnées.

On retrouve les transformations linéaires dans un domaine totalement distinct des mathématiques ; J.-L. Lagrange (1773) les introduit pour bâtir la théorie arithmétique des formes quadratiques. Il s'agit d'expressions du type $f(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2$ où a, b et c sont des entiers et x et y des indéterminés ; le problème principal est de déterminer quels entiers peuvent se représenter par une telle forme en prenant x et y entiers. Lagrange a observé qu'une substitution linéaire $x = \alpha X + \beta y, y = \gamma X + \delta y$ avec $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ entiers et $\alpha\delta - \beta\gamma = \pm 1$ transforme $f(x, y)$ en une nouvelle forme quadratique $F(X, Y)$ qui représente exactement les mêmes entiers ; d'où l'idée de classer les formes en considérant comme équivalentes deux formes qui se transforment l'une dans l'autre par une substitution linéaire.

Les déplacements dans l'espace et leur composition ont été étudiés au XIX^e s. : O. Rodrigues (1840) dans le cas des rotations, L. Poincaré (1851) dans le cas des mouvements hélicoïdaux ou vissages. Les rotations sont systématiquement utilisées par W.R. Hamilton (1846) en liaison avec les quaternions. Elles avaient déjà été considérées dans l'étude géométrique des cristaux à partir des travaux de R.-J. Haüy (1815) qui était arrivé à caractériser 8 types de symétrie des cristaux parmi les 32 possibles que devait découvrir le cristallographe allemand J.F.C. Hessel (1830). Ces études ont été renouvelées par A. Bravais dans trois mémoires fondamentaux (1849-1851) où il caractérise les symétries « ponctuelles » par leurs éléments (axe de rotation d'ordre q , centre de symétrie, etc.) et la manière dont ils se combinent et il classe les réseaux de points dans l'espace et leurs types de symétrie ponctuelle ainsi que la manière dont des molécules de symétrie donnée peuvent s'organiser en un réseau.

Groupes et équations algébriques

Le problème de la résolution algébrique de l'équation générale de degré n a été étudié par Lagrange au moyen des substitutions des n racines (1770) ; ce sont les applications bijectives quelconques de l'ensemble des racines dans lui-même. Dans ce cas de l'équation générale, dont les coefficients sont des paramètres

indéterminés, les n racines sont tout à fait indiscernables ; un théorème de Newton affirme que les fonctions rationnelles des n racines qui restent invariantes par toutes les substitutions de ces racines (on qualifie ces fonctions de symétriques) peuvent s'exprimer rationnellement en fonction des coefficients de l'équation et il en résulte facilement qu'une fonction rationnelle des racines qui prend p valeurs distinctes lorsqu'on soumet les racines à toutes les substitutions possibles est elle-même racine d'une équation de degré p dont les coefficients sont des fonctions rationnelles de ceux de l'équation donnée. Lagrange analyse, à la lumière de ce résultat, les méthodes de résolution connues des équations de degré 3 ou 4 : il exprime les quantités auxiliaires que font intervenir ces méthodes au moyen des racines et il trouve que ces quantités sont racines d'équations de degré inférieur. Il tente ensuite de trouver *a priori* des fonctions rationnelles des n racines d'une équation de degré n qui prendraient moins de n valeurs, mais sa recherche échoue pour $n \geq 5$.

P. Ruffini (1799) poursuit le travail de Lagrange en établissant que l'équation générale de degré 5 n'admet pas de résolution algébrique ; sa démonstration n'est pas tout à fait complète, car il admet implicitement que les radicaux qui interviendraient dans une telle résolution sont nécessairement des fonctions rationnelles des 5 racines (ce point sera établi par N.H. Abel en 1824). À chaque fonction rationnelle des racines, Ruffini associe sa *permutazione*, c'est-à-dire l'ensemble des substitutions qui laissent invariante cette fonction ; d'après un résultat de Lagrange, le nombre d'éléments de la *permutazione* ou *grado di uguaglianza* de la fonction divise le nombre $5! = 120$ de toutes les substitutions et le quotient est le nombre de valeurs que prend la fonction lorsque les racines sont soumises à ces substitutions. Ruffini établit une liste de toutes les *permutazioni* possibles et il trouve ainsi que le *grado di uguaglianza* ne peut pas valoir 15, 30 ou 40 ; ainsi une fonction rationnelle des 5 racines ne peut pas être racine d'une équation de degré 8, 4 ou 3 à coefficients rationnels par rapport à ceux de l'équation considérée. A.-L. Cauchy (1815) a repris le travail de Ruffini en généralisant son résultat au cas des substitutions de n lettres (n quelconque) ; en notant p le plus grand nombre premier $\leq n$, il démontre qu'une fonction rationnelle des n lettres qui prend moins de p valeurs lors des substitutions des n lettres est symétrique ou bien ne prend que 2 valeurs. Il ne peut évidemment pas atteindre un tel résultat par une énumération explicite des cas possibles comme le faisait Ruffini ; au lieu de cela, il se sert d'un calcul sur les substitutions elles-mêmes en considérant la composée de deux substitutions.

À côté de l'équation générale de degré n , on connaissait (pour chaque n) des équations particulières (à coefficients numériques ou dépendant de moins de n paramètres) résolubles par les radicaux, par exemple l'équation de la division d'un angle en n parties égales (Moivre, 1707). A. Vandermonde (1771), qui avait introduit les substitutions dans la théorie des équations

indépendamment de Lagrange, avait découvert que l'équation du cinquième degré à laquelle se ramène la division du cercle en 11 parties égales est résoluble par les radicaux ; cette observation a été généralisée par Gauss (1801) dans la théorie de la division du cercle en n parties égales (n premier impair) qui occupe la septième section de ses *Disquisitiones arithmeticae* et qui est l'étude arithmétique des polygones réguliers. Le point de départ de la théorie de Gauss est le fait que si r est une racine $\neq 1$ de l'équation $r^n = 1$, les autres racines sont des puissances r^k de r (k entier $\text{mod } n$, premier à n), donc elles sont liées par certaines relations ; les entiers $k \text{ mod } n$ premiers à n sont eux-mêmes les puissances d'une racine primitive $g \text{ mod } n$ (par exemple 2 est racine primitive $\text{mod } 11$). La liste des $n-1$ racines est donc $r^k, k = 0, 1, \dots, n-2$, et le remplacement de r par r^g transforme r^k en r^{kg} ; on en déduit que les seules substitutions des racines à considérer sont du type précédent. Leur étude permet à Gauss de démontrer que, si $n-1 = ef$, les $n-1$ racines se groupent en e périodes de f éléments qui sont les racines d'équations de degré f dont les coefficients s'obtiennent en résolvant une équation auxiliaire de degré e à coefficients rationnels ; cette théorie permet d'établir la résolubilité algébrique de l'équation de la division du cercle.

Aux exemples précédents, Abel (1828) a ajouté l'étude, sur le même modèle, de la division des intégrales elliptiques ; il est ensuite parvenu à caractériser une vaste classe d'équations résolubles par les radicaux (1829). Sa première observation est qu'une équation dont toutes les racines s'expriment rationnellement en fonction de l'une d'entre elles (x) se décompose en un certain nombre d'équations de degré moindre au moyen d'une équation auxiliaire, comme dans le cas étudié par Gauss ; ensuite, si θ_x et θ_{x^2} étant deux racines quelconques (θ, θ^2 rationnelles), on a $\theta, \theta, x = \theta, \theta_x$, les équations de degré inférieur obtenues et l'équation auxiliaire ont encore les mêmes propriétés. On en déduit, par récurrence sur le degré, que ces équations sont résolubles par les radicaux.

Le concept de groupe, déjà en filigrane dans les travaux de Lagrange, Ruffini, Gauss, Cauchy et Abel que nous venons d'évoquer, a été finalement explicité par E. Galois (1830). Reprenons l'énoncé de la proposition 1 de son mémoire : « Soit une équation donnée, dont a, b, c, \dots sont les m racines. Il y aura toujours un groupe de permutations des lettres a, b, c, \dots qui jouira de la propriété suivante : 1° Que toute fonction des racines invariable par les substitutions de ce groupe, soit rationnellement connue ; 2° Réciproquement, que toute fonction des racines, déterminable rationnellement, soit invariable par les substitutions. »

Dans cet énoncé, les permutations se réfèrent aux arrangements ou dispositions des lettres et le mot groupe est employé dans le sens courant d'un groupement d'objets ; les substitutions du groupe sont les substitutions qui permettent de passer d'une permutation à une autre et « la permutation d'où l'on part pour indiquer les substitutions est toute arbitraire...

Cependant comme on ne peut guère se former l'idée d'une substitution sans celle d'une permutation, nous ferons dans le langage un emploi fréquent des permutations ». Ainsi, en partant de l'une quelconque des permutations du groupe, on obtient les mêmes substitutions et Galois réserve en fait le mot « groupe » à des systèmes de permutations qui ont cette propriété ; elle équivaut au fait que la composée de deux substitutions du groupe est encore une substitution du groupe.

Dans la suite de son mémoire, Galois examine l'effet de l'adjonction (aux quantités considérées comme rationnelles) de la racine r d'une équation auxiliaire irréductible : le groupe G reste inchangé ou bien il se partage en p groupes partiels de la forme H, HS, HT, \dots où S, T, \dots sont des substitutions de G qui n'appartiennent pas à H . Si U désigne une substitution de H , il lui correspond la substitution $S^{-1}US$ de HS ; Galois dit que les groupes partiels sont semblables. Dans le cas où l'on adjoint d'un coup toutes les racines de l'équation auxiliaire, les groupes partiels ont tous les mêmes substitutions, et Galois a qualifié ce cas de décomposition propre (on dit maintenant sous-groupe distingué ou normal). Cette théorie permet à Galois de caractériser les équations résolubles par les radicaux en termes de la structure de leur groupe ; ce sont celles dont le groupe peut être réduit à un seul élément par adjonctions successives de radicaux et cela se traduit par le fait que le groupe admet une suite de décompositions propres en un nombre premier de groupes partiels (groupes résolubles). Dans le cas des équations irréductibles de degré premier n , Galois note x_i les racines d'une telle équation, où k est un entier $\text{mod } n$ et il représente les substitutions du groupe comme des opérations sur les indices k ; le groupe n'est résoluble que s'il est formé de transformations du type $k \rightarrow ak + b$. Inversement, l'ensemble des transformations de ce type constitue un groupe résoluble.

On voit maintenant que les équations considérées par Abel sont celles dont le groupe est commutatif ou, comme on dit encore abélien. Galois appelle imprimitives les équations qui peuvent se décomposer en équations de degré inférieur au moyen d'une équation auxiliaire et il les caractérise en termes de groupes. Il avait préparé un second mémoire consacré aux équations primitives qui sont résolubles algébriquement ; leur degré est une puissance p^d d'un nombre premier p et, en indexant les p^d racines par des n -uplets d'entiers $\text{mod } p$, le groupe est représenté par des transformations affines de ces n -uplets. Le cas $n = 2$, lié à la division par p des périodes des fonctions elliptiques, se ramène à une équation de degré $p+1$ dont Galois indexe les racines par les quotients $\frac{k}{\ell}$ (k, ℓ entiers $\text{mod } p$) et le

groupe de cette équation est représenté par les transformations homographiques $\frac{ak + b\ell}{ck + d\ell}$

À l'opposé des groupes résolubles, on trouve les groupes simples, que Galois qualifiait d'indécomposables ; ce sont ceux qui n'admettent pas de

décomposition propre. Galois savait que c'était le cas du groupe alterné (substitutions paires) de degré 5 et du groupe des transformations homographiques $\text{mod. } p$ si $p \neq 2$ ou 3.

On sait que les travaux de Galois n'ont pas été publiés de son vivant ; Liouville les a édités en 1846. Entre-temps, Cauchy (1844) était revenu sur la théorie des substitutions ; il appelait système de substitutions conjuguées ce que nous appelons maintenant groupe de permutations.

Groupes et géométries

La première utilisation consciente des groupes en géométrie se trouve dans le *Mémoire sur les groupes de mouvements* de C. Jordan (1869), inspiré par les travaux de Bravais en cristallographie ; Jordan considère six catégories de groupes de rotations dans l'espace, les groupes cycliques, les groupes diédraux, les trois groupes des polyèdres réguliers et le groupe de toutes les rotations. Il subdivise ces catégories en espèces et il établit d'une manière plus complète que Bravais comment un groupe de rotations peut se combiner avec les translations d'un réseau. La classification exhaustive des 230 groupes cristallographiques a été finalement obtenue par E. Fedorov (1885) et par A. Schoenflies (1891).

Le même Jordan a aussi montré comment la théorie de Galois pouvait s'appliquer à un grand nombre de problèmes géométriques dont la solution dépend d'une équation algébrique (points d'inflexion d'une cubique, bitangentes à une quartique, droites d'une surface cubique, etc.) et il a consacré à ces questions un important *Traité* (1870) où la notion de groupe de substitutions permet d'unifier un grand nombre de questions ; on y trouve en particulier la notion d'isomorphisme de groupes de substitutions, la notion de suite de composition d'un groupe et un théorème de structure précisé ensuite par Hölder (1889).

F. Klein et S. Lie ont rencontré les groupes dans un contexte géométrique vers la même époque ; il s'agissait d'étudier le complexe des droites de l'espace qui rencontrent les quatre faces d'un tétraèdre donné en des points dont le birapport est fixé. L'ensemble des transformations projectives de l'espace qui laissent fixes les sommets du tétraèdre joue un rôle déterminant dans cette question ; ces transformations, qui dépendent continûment de trois paramètres, commutent deux à deux et la composée de deux d'entre elles est à nouveau une transformation du même type. Lie et Klein appelaient système fermé de transformations un système possédant cette dernière propriété. Les transformations précédentes ont servi à Lie pour ramener à une forme simple l'équation aux dérivées partielles qui détermine les surfaces tangentes, en chacun de leurs points, au cône du complexe ; Lie a ainsi été conduit à concevoir un programme ambitieux tendant à élaborer, pour les équations différentielles (ordinaires ou aux dérivées partielles), l'analogue de la théorie de Galois pour les équations algébriques.

Lie avait aussi découvert une remarquable correspondance entre les droites et les sphères de l'espace (1870) ; si (a, π) est le couple d'un point a et d'un plan π passant par a , les droites de π passant par a correspondent à des sphères toutes tangentes au même plan π' en un point a' et Lie a exploité la transformation de contact $\Sigma : (a, \pi) \mapsto (a', \pi')$ ainsi obtenue. En particulier Σ transmue certains groupes de transformations projectives des droites en des groupes intéressants. Par la suite (1872), Lie a interprété les équations aux dérivées partielles du premier ordre en termes d'éléments de contact (a, π) et il leur a appliqué sa notion de transformation de contact. C'est pendant l'hiver 1873-1874 qu'il a commencé son programme de classification des groupes continus à un nombre fini de paramètres ; il formulait le problème en termes des transformations infinitésimales du groupe, en utilisant les notions introduites par Jacobi dans la théorie des équations aux dérivées partielles. Au contraire des groupes de substitutions, ces groupes de Lie ont une infinité de transformations et Lie a reconnu qu'il fallait leur imposer, outre la fermeture par composition, le fait de contenir l'inverse de chacune de leur transformation (automatique pour un groupe fini). Les travaux de Lie ont été poursuivis par ses élèves Engel et Killing et, en France par E. Cartan (1894).

Inspiré par un mémoire de Cayley (1859) sur l'interprétation projective de la métrique, Klein (1871) a présenté la géométrie non euclidienne de Lobatchevski et Bolyai comme celle des transformations projectives qui laissent invariante une certaine quadrique ; en combinant ces idées avec celles que développait Lie, il est parvenu, dans son célèbre *Programme d'Erlangen* à la conception d'une géométrie comme l'étude des invariants d'un groupe de transformations d'une certaine « multiplicité ». Ce texte a été très peu diffusé à l'époque, mais il a été traduit (en italien, en français, etc.) dans les années 1890 et réédité en 1893, à la suite de la publication des travaux de Lie. Entre-temps, les idées qu'il contient avaient été mises en œuvre par les élèves de Lie (Study, Killing) et retrouvées par d'autres mathématiciens (Poincaré).

Universalité de la notion de groupe

La théorie des nombres est, elle aussi, dominée par les groupes ; nous avons fait allusion plus haut à la classification des entiers selon leurs restes dans la division par un entier donné m (le module) et à la classification des formes quadratiques binaires relativement aux substitutions linéaires. Les entiers *modulo* m forment un groupe additif et ceux qui sont premiers à m forment un groupe multiplicatif ; Gauss (1801) a construit, sur l'ensemble (fini) des classes de formes quadratiques binaires de discriminant donné, une loi de composition qui fait de cet ensemble un groupe commutatif ; il a soigneusement vérifié que cette loi est associative, qu'elle admet une classe neutre et qu'à chaque classe correspond une classe inverse. Ce genre d'exemple avait conduit L. Kronecker à formuler une

définition axiomatique des groupes commutatifs en 1870.

Dans la théorie de Gauss, certains caractères, à valeurs ± 1 , sont associés aux classes et ils en dépendent de façon multiplicative ; ainsi le symbole de Legendre pour les entiers *modulo* un nombre premier p (caractère quadratique). Pour établir l'infinitude des nombres premiers dans une progression arithmétique, Dirichlet (1837) a été conduit à considérer les caractères χ du groupe multiplicatif des entiers *modulo* m : il s'agit de fonctions $n \mapsto \chi(n)$ à valeurs complexes telles que $\chi(mn) = \chi(n)\chi(m)$ et que $|\chi(n)| = 1$. H. Weber (1881) a étendu cette notion à tous les groupes commutatifs finis et G. Frobenius (1896) s'est rendu compte que, dans le cas d'un groupe non commutatif G (comme les groupes de Galois en général), il fallait considérer les homomorphismes de G à valeurs dans des groupes de matrices ; c'est l'origine de la théorie des représentations linéaires des groupes finis, développée par Frobenius et par W. Burnside (1898). Une théorie analogue a été faite par J. Schur (1924) pour le groupe des rotations, puis par H. Weyl (1925-1926) pour les groupes de Lie compacts ; ensuite Weyl a reconnu (1927) que la théorie des séries de Fourier correspondait au cas particulier du tore $T = \mathbb{R}/\mathbb{Z}$. Dans le cas des groupes continus, il faut considérer des représentations en dimension infinie, dans des espaces fonctionnels. La découverte par A. Haar (1933) d'une mesure invariante sur tout groupe localement compact a permis d'étendre encore cette théorie.

La théorie de l'intégrale de Fourier apparaît aussi comme un cas particulier d'une analyse harmonique commutative, qui associe à tout groupe localement compact commutatif G un groupe dual \hat{G} formé des caractères de G ; pour $G = \mathbb{R}$, les caractères sont de la forme $\chi(x) = e^{i\xi x}$ ($\xi \in \mathbb{R}$) et \hat{G} s'identifie à \mathbb{R} . Cette analyse a été mise au point par L. Pontrjagin (1934), E.R. van Kampen (1935) et A. Weil (1940). L'analyse harmonique non commutative, c'est-à-dire la théorie des représentations linéaires des groupes topologiques non nécessairement commutatifs est un secteur mathématique en pleine activité ; elle a des liens étroits avec la théorie des nombres, la géométrie algébrique et la théorie des fonctions spéciales.

C'est précisément par la théorie des représentations linéaires que les groupes sont intervenus dès 1927 en mécanique quantique, dans des travaux de H. Weyl et d'E. Wigner. Mais la théorie des groupes avait déjà eu des contacts avec la physique, à propos de la cristallographie (voir plus haut), de la relativité restreinte (Poincaré 1906) et de la mécanique analytique où E. Noether (1918) a montré comment les grandeurs conservées dans le mouvement sont liées à l'existence de groupes de transformations qui laissent les équations invariantes (impulsion et translations, énergie et translations dans le temps, moment cinétique et rotations).

E. Cartan a appliqué systématiquement la théorie des groupes à la géométrie différentielle dans sa théorie des espaces symétriques (1926), dont la courbure est

conservée par transport parallèle et sur lesquels un groupe de Lie opère transitivement ; la théorie des fonctions sphériques s'interprète et se généralise dans ce cadre (1929). Par ailleurs, son extension de la méthode du repère mobile de Darboux à la géométrie riemannienne et aux géométries apparentées a conduit à la notion d'espace fibré à groupe structural et à la théorie des connexions sur un tel espace (H. Whitney, 1940 ; C. Ehresmann, 1941) où l'espace n'admet pas de transformations globales, mais on peut quand même étudier sa structure grâce à des symétries locales ; par exemple, une variété riemannienne ressemble, au voisinage de chacun de ses points, à son espace tangent, qui est euclidien et admet le groupe des rotations. Une connexion permet de relier les points de l'espace les uns aux autres comme le transport parallèle de la géométrie riemannienne ; on a compris, vers 1970, que les théories de jauge des interactions fondamentales faisaient justement intervenir un espace fibré (où la fibre est l'espace des états « internes » d'une particule) muni d'une connexion qui s'interprète comme le potentiel de l'interaction.

- ABEL N.H., « Mémoire sur une classe particulière d'équations résolubles algébriquement », *Journ. für die reine und angew. Math.* 4 (1829) (= *Œuvres complètes*, Christiania 1881, t. 1, 478-507). — BURNSIDE W., *Theory of groups of finite order*, Cambridge, 1897 ; 2^e éd. 1911. — CARTAN É., *Notice sur les travaux scientifiques*, Paris, 1931 (= *Œuvres complètes I*, Paris, 1984, 1-105). — CAUCHY A.-L., « Sur le nombre des valeurs qu'une fonction peut acquérir lorsqu'on y permute de toutes les manières possibles les quantités qu'elle renferme », *Journ. Éc. Polyt.* 10 (1815), 1-28 (= *Œuvres complètes*, 2^e série, 1, 64-90) ; « Mémoire sur les arrangements que l'on peut former avec des lettres données et sur les permutations ou substitutions à l'aide desquelles on passe d'un arrangement à un autre », *Exerc. d'analyse et de phys. math.* 3, Paris, 1844, 151-252 (= *Œuvres complètes*, 2^e série, 13, 171-282). — D'ARCY W. THOMPSON, *On Growth and Form*, Cambridge, 1917. — DIEUDONNÉ J., « Le développement historique de la notion de groupe », *Bull. Soc. Math. de Belgique*, t. XXVIII, 1976, 267-296. — DMITRIEV I.S., *Simmetrija v mire molekul*, Moscou, 1976. — ENGEL F., « Sophus Lie », *Ber. Verh. Sächs. Ges. Wiss.*, 51, 1899, XI-LXI. — FROBENIUS G.F., « Ueber Gruppencharaktere », *MB. Ak. Berlin*, 1896, 1343-1382. — GALOIS É., *Œuvres et mémoires mathématiques*, Paris, 1962. — GAUSS C.F., *Disquisitiones arithmeticae*, Leipzig, 1801 (trad. fr., Paris, 1807). — GRAY J., « Poincaré and Klein — Groups and Geometries », 1830-1930 : *A Century of Geometry*, Berlin, 1992, 35-44 ; « The three supplements to Poincaré's prize essay of 1880 on Fuchsian functions and differential equations », *Arch. Intern. d'hist. des Sc.*, 32, 1982, 221-235. — HAWKINS T., « The Erlanger Program of Felix Klein : Reflections on its place in the history of mathematics », *Historia Mathematica*, 11, 1984, 442-470 ; « Line geometry, differential equations and the birth of Lie's theory of groups », *The History of Modern Mathematics I*, Boston, 1989, 275-327 ; « The birth of Lie's theory of groups », *The Sophus Lie Memorial Conference*, Oslo, 1994, 23-50. — JAEGER F.-M., *Le principe de symétrie et ses applications*, trad. fr., Paris, 1924. — JORDAN C., « Mémoire sur les groupes de mouvements », *Annali Mat.*, 2^e série, 2, 1868-1869, 167-215 et 322-345 (= *Œuvres* 4, 231-302) ; *Traité des substitutions et des équations algébriques*, Paris, 1870. — KLEIN F., *Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen*, Erlangen, 1872 (= *Ges. Math.*

Abh. 1, 460-497) (trad. fr., *Le programme d'Erlangen*, Paris, 1974). – LAGRANGE J.-L., « Réflexions sur la résolution algébrique des équations », *Nouv. Mém. Ac. Berlin 1770/1771, 1772-1773* (= *Œuvres* 3, 203-421); « Recherches d'arithmétique », *ibid.*, 1773-1775 (= *Œuvres* 3, 693-795). – LÉVISTRAUSS L., *Anthropologie structurale*, Paris, 1958. – LIE S., « Theorie des Transformationsgruppen I-V », *Arch. Math. Naturv.*, 1, 1876; 3, 1878 et 4, 1879 (= *Ges. Abh.* 5, 9-197). – LIE S. & KLEIN F., « Ueber diejenigen ebenen Kurven, welche durch ein geschlossenes System von einfach unendlich vielen vertauschbaren linearen Transformationen in sich übergehen », *Math. Ann.*, 4, 1871, 50-84 (= Klein, *Ges. Math. Abh.* 1, 424-459 = *Lic. Ges. Abh.* 1, 229-285). – MACKEY G.W., *The scope of commutative and noncommutative harmonic analysis*, Amer. Math. Soc., 1992. – NOETHER E., « Invariante Variationsprobleme », *Nachr. v.d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen*, 1918, p. 235-257. – POINCARÉ H., « Sur la dynamique de l'électron », *Rend. del Circ. mat. di Palermo*, 21, 1906, 129-176 (= *Œuvres* 9, 494-550); *Trois suppléments sur la découverte des fonctions fuchsienues*, éd. J. Gray & S. Walter, Berlin/Paris, 1997. – RASHED R., *Géométrie et dioptrique au x^e siècle : Ibn Sahl*,

Al-Qūhī, Ibn al-Haytham, Paris, 1993. – ROWE D.E., « Klein, Lie and the "Erlanger Programm" », *1830-1930 : A Century of Geometry*, Berlin, 1992, 45-54. – ROZENTAL I.L., *Geometrija, dinamika, Vseleennaja*, Moscou, 1987. – RUFFINI P., *Teoria generale delle Equazioni, in cui si dimostra impossibile la soluzione algebrica delle equazioni generali di grado superiore al quarto*, Bologne, 1799. – SCHOLZ E., « Crystallographic symmetry concepts and group theory (1850-1880) », *The History of Modern Mathematics II*, Boston, 1989, 3-27. – WEIL A., *L'intégration dans les groupes topologiques et ses applications à l'analyse*, Paris, 1940. – WEYL H., *Gruppentheorie und Quantenmechanik*, Leipzig, 1928 (trad. angl., *The Theory of Groups and quantum Mechanics*, New York, 1931); *Symmetry*, Princeton, 1952. – WUSSING H., *Die Genesis des abstrakten Gruppen Begriffes*, Berlin, 1969. – Coll. : Secrétariat d'Etat à la Culture, *Or des Scythes*, Paris, 1975.

Christian HOUZEL

→ Analyse harmonique ; Cristal ; Équation ; Extension ; Géométries ; Structure ; Symétrie ; Transformation géométrique.

HACKING Ian, né en 1936

Philosophe canadien né à Vancouver. Hacking a étudié à Cambridge en Angleterre, où il obtint son Ph.D. Il a enseigné à Vancouver, à Stanford puis, depuis 1982, à Toronto. Toujours à la pointe de la réflexion contemporaine, dont Hacking a toujours bien perçu et présenté les enjeux, son œuvre épistémologique tranche, dans le champ anglo-saxon, par son originalité et sa radicalité. Ses premiers travaux portent, classiquement, sur la logique et la philosophie du langage, puis s'orientent sur la théorie des probabilités, à laquelle il a consacré plusieurs travaux historiques importants. Hacking est un des premiers, dans le monde anglo-saxon, à revendiquer, à la suite de Kuhn (*La structure des révolutions scientifiques*, 1962), la dimension historique de la philosophie des sciences, ainsi que l'héritage de l'épistémologie française, de Comte à Foucault. Cela l'a conduit à un examen original et critique des théories, qu'elles soient néopositivistes, poppériennes et post-poppériennes, de la connaissance et du réalisme scientifique (voir *Concevoir et expérimenter*, 1983). Sans rejeter les diverses formes d'antiréalisme (Feyerabend, Lakatos selon lui) ou de réalisme (Popper, Putnam) qui émergent de ces débats, Hacking préfère les dépasser par son concept d'expérimentation, qui lui offre une solution concrète aux apories conceptuelles de l'épistémologie récente. Mêlant la réflexion sociale et historique à une maîtrise inégalée, théorique et technique, des enjeux de la science contemporaine, dans le champ physique comme biologique, l'œuvre de Hacking, en plein développement, est une des plus riches et provocatrices de l'épistémologie contemporaine.

● *Representing and intervening* (1983), trad. fr., *Concevoir et expérimenter*, Paris, C. Bourgois, 1989. – « Five parables », in RORTY R., SCHNEEWIND J. & SKINNER Q., *Philosophy in history*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1984. – *Rewriting the Soul, Multiple personality and the sciences of memory*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1995.

Sandra LAUGIER

→ Épistémologie ; Feyerabend ; Kuhn ; Popper ; Putnam.

H

HADAMARD Jacques, 1865-1963

J. Hadamard a été un des mathématiciens français les plus importants de ce siècle. Il a contribué au progrès des branches les plus variées des mathématiques. Il a démontré, indépendamment de La Vallée-Poussin, le célèbre théorème sur la répartition asymptotique des nombres premiers. Il a fait progresser la théorie des fonctions, la géométrie riemannienne, le calcul des variations et des questions plus élémentaires, en particulier une importante inégalité vérifiée par les déterminants. Il a unifié les résultats jusque-là épars sur les caractéristiques des équations aux dérivées partielles et dégagé la notion d'hyperbolicité. Entre les deux guerres, son séminaire a été le lieu privilégié de l'ouverture aux idées mathématiques venant de l'étranger.

Un esprit aussi ouvert devait inévitablement s'intéresser aux problèmes de philosophie des mathématiques et d'enseignement. Dans un échange de lettres avec Baire, Borel et Lebesgue sur le théorème de Zermelo, il est le seul à défendre la méthode formaliste qui s'est imposée depuis. Ses interventions concernant l'enseignement visent avant tout à défendre la position des sciences expérimentales. Il est l'auteur d'une monumentale *Géométrie élémentaire* qui n'a pas perdu son intérêt.

● *Œuvres*, Paris, CNRS, 4 vol., 1968.

► LEVY P., MANDELBROJT S., MALGRANGE B. & MALLIAVIN P., *La Vie et l'œuvre de Jacques Hadamard*, Genève, L'Enseignement Mathématique, 1967.

Martin ZERNER

→ Propagation.

HAECKEL Ernest, 1834-1919

Zoologiste allemand, propagandiste, en Allemagne, de la pensée de Darwin qu'il enrichit de concepts nouveaux et transforma substantiellement du fait de ces ajouts, il voit dans l'œuvre de Darwin le moyen de rendre compte des formes vivantes et inertes par les mêmes lois. Cette conception unitaire le conduit à poser très tôt une relation entre la descendance des espèces (la phylogénie) et la formation des individus

(l'ontogénie) qu'il synthétisera plus tard en une loi : la loi biogénétique fondamentale. Cette loi est articulée autour du concept de récapitulation qui pose que l'ontogénie (le développement embryonnaire) récapitule la phylogénie (l'évolution des espèces). Le principal argument à l'appui de ces affirmations était constitué par des planches représentant des embryons d'espèces différentes (poisson, oiseau, mammifère...) par lesquelles il était montré que, initialement très semblables, les embryons n'acquerraient leur spécificité d'espèce que progressivement au cours de leur développement de sorte que celui-ci pouvait, selon Haeckel, être regardé comme une récapitulation en accéléré de l'histoire évolutive. La cellule initiale (la cellule œuf résultant de la fécondation d'un ovule et d'un spermatozoïde) donnait donc l'image de la forme de vie primitive : un protoplasme indifférencié.

● *Anthropogénie, ou histoire de l'évolution humaine*, trad. fr. C. Letourneau, Paris, C. Reinwald, 1877. — *Essais de psychologie cellulaire*, trad. fr. J. Soury, Paris, G. Baillière, 1880. — *Histoire de la création des êtres organisés d'après les lois naturelles*, trad. fr. C. Letourneau, Paris, Reinwald, 1874. — *Les énigmes de l'univers*, trad. fr. C. Bos, Paris, Schleicher Frères, 1902.

Pascal NOUVEL

→ Anatomie comparée ; Biogéographie ; Développement ; Écologie ; Embryogenèse ; Loi biogénétique fondamentale ; Plasma germinatif ; Vivant (Théorie du).

HANSON Norwood Russell, 1924-1967

Né à New Jersey. N.R. Hanson compte parmi les philosophes qui grâce à leur solide bagage scientifique ont démolé la conception « physicaliste » du savoir défendue par le Cercle de Vienne en usant d'arguments empruntés à la physique. Comme Michael Polanyi, Stephen Toulmin et Thomas Kuhn, Hanson estimait que l'analyse logique des théories physiques empêche en fait de comprendre les pratiques auxquelles les physiciens recourent pour résoudre les problèmes. La caractéristique essentielle du savoir scientifique ne tient pas à sa certitude, contrairement à ce qu'ont pu soutenir les rationalistes de Descartes à Carnap, mais au seul fait que la science évolue. Pour Hanson, la philosophie des sciences consiste, sur un mode très kantien, à s'interroger sur les « conditions de possibilité de la découverte ». Il considère que l'observation est fonction du cadre conceptuel ou du contexte dans lequel sont posées les questions (« voir, c'est voir "en tant que" », disait Wittgenstein). La découverte est possible parce que apprendre à formuler nos questions de manière différente nous amène à poser un regard différent sur le monde physique et donc à enrichir métaphoriquement le langage de la recherche. Hanson partit en guerre contre l'épistémologie pétrifiée du néopositivisme en puisant dans l'arsenal de ses prodigieuses connaissances en histoire des sciences, y trouvant d'innombrables exemples pour illustrer sa vision

contextualiste et pluraliste de la dynamique scientifique. Il était à ses yeux tout aussi important que les philosophes puissent comprendre les positions scientifiques de leur époque. Aussi, déployant l'érudition et l'éloquence qui marquent toute son œuvre, entreprit-il de préciser les implications philosophiques des tout derniers développements de la physique des particules, et notamment de l'apparition du concept d'« antimatière ».

● *Patterns of Discovery*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1958. — *The Concept of the Positron*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1963. — (Œuvres posthumes : *Constellations and Conjunctions* (dir. W. Humphrys), Dordrecht, Reidel, 1973. — *Perception and Discovery* (dir. de W. Humphrys), San Francisco, Freeman, Cooper, 1969. — *What I Do Not Believe and Other Essays* (dir. S. Toulmin & H. Woolf), Dordrecht, Reidel, 1971. — Vol. III des *Boston Studies in Philosophy of Science*, 1964-1967 (dir. R.S. Cohen & Marx Wartofsky), Dordrecht, Reidel, 1967 (avec bibliogr. de tous les travaux publiés par Hanson de son vivant).

Allan JANIK
(trad. O. Bonis)

→ Cercle de Vienne ; Découverte ; Fait.

HARVEY William, 1578-1657

Médecin anglais. Tout comme Aristote, Harvey attribuait au cœur la fonction d'organe principal, de « soleil du microcosme » (*De motu cordis*, VIII) répartissant la chaleur dans toutes les parties du corps. Comme Galien il concevait l'existence d'une « faculté pulsive » assurant l'expulsion du sang des ventricules du cœur. Il fut néanmoins l'homme qui imposa un tournant révolutionnaire à la physiologie en démontrant l'existence de la circulation du sang. Pour ce faire, Harvey sut s'inspirer des enseignements de la dissection et de la vivisection, perfectionner l'usage d'un ensemble de techniques expérimentales (ligature, insufflation, injection et quantification) et s'appuyer sur le témoignage de l'embryologie. Pour éclairer la compréhension des mécanismes de la physiologie cardiovasculaire Harvey se servit du modèle de la pompe – aspirante et foulante. D'où la comparaison simultanée du fonctionnement du cœur à une « déglutition » (*De motu cordis*, V) et à l'action d'un moteur (*impulsor*) communiquant son impulsion (*impulsus*) au sang. Cependant, l'alternance des phases de systole et de diastole cardiaques ainsi métaphorisée ne doit pas faire oublier que le seul mécanisme serait, si l'on en croit Harvey, impuissant à assurer la continuité des mouvements du cœur sans l'intervention d'une *vis pulsifica*, dont la nature demeure inconnue. « Qualité occulte » que Descartes s'empressa de remplacer par le « feu sans lumière ». Non moins vigoureusement battue en brèche sera l'explication des phénomènes de la génération proposée par Harvey. Ainsi, Leeuwenhoek réfutera-t-il l'ovisme défendu par ce dernier dans le *De generatione* et les *Exercitationes*. Dans cette dernière œuvre,

Harvey soutenait le caractère épigénétique du développement de l'embryon à partir d'un élément premier oviforme.

● *Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus* (1628), trad. fr. Ch. Richet, *Traité anatomique sur les mouvements du cœur et du sang chez les animaux*, 1869. — *Exercitatio anatomica de circulatione sanguinis* (1649). — *Exercitationes de generatione animalium* (1651). — Les notes des leçons d'anatomie d'Harvey ont été publiées en fac-similé sous le titre de *Prelectiones anatomiae universalis*, Londres, 1886.

▷ BAYON H.P., « William Harvey, Physician and Biologist, His Precursors, Opponents and Successors », *Annals of Science*, 3, 1938, 59-118, 435-456 ; 4, 1939, 65-106, 329-389. — BYLEBYL J.J., « Harvey », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1972, t. VI, p. 150-152. — GRMEK M.D., *La première révolution biologique*, Paris, Payot, 1990. — LAMBERT J., « Le "récit scientifique" à l'âge baroque : l'exemple du récit de la découverte de la circulation du sang (Harvey et le "de motu cordis", 1628) », Paris, 1974. — LESKY E., « Harvey und Aristoteles », *Sudhoffs Archiv für Geschichte der Medizin*, 41, 1957, 289-316, 349-378. — PAGEL W., *William Harvey's Biological Ideas*, New York, 1967. — ROGER J., *Les sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e siècle*, Paris, A. Colin, 1963. — WEBSTER C., « Harvey's De generatione : its Origins and Relevance to the Theory of Circulation », *British Journal for the History of Science*, 3, 1967, 262-274.

Éric HAMRAOUI

→ Anatomie comparée ; Van Leeuwenhoek.

HASARD

L'usage de la notion de hasard est presque toujours lié à une difficulté de l'explication causale. Quoique la notion soit notoirement ambiguë et vague, il est possible de lui conférer une signification méthodologique précise dans des contextes définis de science empirique. Aussi proposera-t-on ici une classification des sens épistémologiques du hasard. Il y a trois sens épistémologiquement pertinents du mot « hasard » : la chance, l'aléatoire, et la contingence par rapport à un système théorique. Ces termes sont souvent utilisés l'un pour l'autre, et de surcroît confondus avec celui de « fortuit ». « Fortuit » est l'adjectif dont l'extension coïncide aujourd'hui assez bien en français avec celle du substantif « hasard », dans toutes ses significations possibles, même si son étymologie (*fortis*, la « fortune » en latin) fait penser à l'un des sens du mot – la « chance ». En fait, il est bien rare aujourd'hui, en particulier en contexte scientifique, qu'un événement « fortuit » soit compris comme signifiant un événement « chanceux ». Il est donc préférable de faire du « fortuit » un terme générique, et de ne pas chercher à lui conférer le sens d'une forme particulière du hasard. Par ailleurs, si l'on fait du « hasard » un terme générique, il vaut mieux ne pas accorder non plus trop d'importance à son origine étymologique (*az-zahr*, « le dé » en arabe) ; prise comme guide, cette étymologie

conduirait en effet à restreindre le hasard à l'une de ses significations, l'aléatoire (du latin *alea*, « dé »).

Chance

Le sens le plus familier du mot « hasard » apparaît dans des contextes où quelque chose se produit de manière inattendue plutôt que comme conséquence d'un plan d'action défini à l'avance. Soit, par exemple, un jardinier qui bêchant le sol pour le cultiver, y trouve une pièce d'or. Dire que le jardinier a trouvé « par hasard » la pièce d'or, c'est une formule commode pour exprimer une pensée qui a la structure suivante : « Le jardinier a trouvé un objet hautement désirable en poursuivant un objectif tout à fait différent. » Dans la langue de tous les jours, on dira simplement : « il a eu de la chance. »

Cette notion familière du hasard est aussi la première à avoir reçu un traitement philosophique. Aristote la commente en *Physique* (II, 4-6). Dans ce texte, il explique qu'il y a fortune (*tuchè*) ou hasard (*to automaton*) lorsqu'un certain effet est obtenu de manière accidentelle « dans les faits qui se produisent en vue d'une fin » (196b29), autrement dit lorsqu'une fin est atteinte sans avoir été la cause immanente de l'effet produit : « ce qui s'est produit n'est pas la fin visée par la cause, mais ce qu'aurait produit une autre cause, existant en vue de la fin qui a été réellement produite » (197b21). La distinction aristotélicienne entre *tuchè* et *to automaton* est une simple nuance, qui a trait au domaine d'application de la notion. *Tuchè* (Fortune) concerne « les choses qui, étant en vue de quelque fin, relèvent en outre des choix » (197a5). La fortune est donc limitée à la *praxis* : « les êtres qui ne peuvent agir pratiquement ne peuvent, non plus, produire aucun effet de Fortune » (197b5). Par exemple, l'homme qui creuse une fosse pour planter un arbre et trouve de l'argent est confronté à la Fortune (197a1-5). Mais des bêtes ou des enfants ne produisent pas d'effet de Fortune, car « ils n'ont pas la faculté de choisir » (197b6). Quant à *to automaton*, c'est un terme générique, qui s'applique à la Nature entière, et englobe la Fortune (*tuchè*) à titre de cas particulier. L'élément de finalité y est tout aussi essentiel, mais pas nécessairement sous la forme de la finalité consciente. Par exemple : « La chute du trépid est un hasard, si après sa chute il est debout pour servir de siège, sans qu'il soit tombé pour servir de siège » (197b16-18). L'on se souviendra ici que dans la physique aristotélicienne la chute des corps est expliquée par une cause finale (la tendance des graves à regagner leur lieu propre, le centre de la Terre).

La notion du hasard comme chance n'est pas seulement une notion populaire. Il arrive qu'elle joue un rôle important dans certaines théories scientifiques. Le meilleur exemple qu'on en puisse donner est celui du concept de mutation favorable dans la théorie de la sélection naturelle. Si Darwin reconnaissait une place au hasard dans l'interprétation des variations, c'était uniquement du point de vue du rapport entre la

survenance d'une variation, et le fait qu'elle soit avantageuse ou défavorable pour son porteur. Cette doctrine fondamentale n'a guère changé depuis 1859, au détail près qu'on dit aujourd'hui « mutation » plutôt que « variation ». Futuyama, dans l'un des meilleurs traités de biologie évolutive de ces dernières années, écrit : « Une mutation se fait au hasard au sens où la chance qu'une mutation spécifique se produise n'est pas affectée par son utilité virtuelle » (*Evolutionary Biology*, Sinauer, 1979). La notion de hasard que l'on trouve ici n'est rien d'autre que celle de « chance », sous réserve bien sûr de ne pas la faire dépendre de la présence d'un élément d'intentionnalité humaine. Le caractère favorable ou défavorable d'une mutation pour un organisme est tout à fait comparable à la situation du jardinier qui trouve accidentellement une pièce d'or dans son champ de pommes de terre. Le jardinier n'a pas découvert une pièce d'or parce qu'il l'a cherchée, mais il se trouve que cette découverte a des effets importants pour lui. De la même manière, dans la vulgate de la biologie évolutive contemporaine, les organismes ne disposent pas d'une physiologie qui leur permette de construire individuellement des mutations favorables, mais lorsqu'une mutation se présente qui a un intérêt dans un certain environnement, les conséquences en sont importantes pour eux-mêmes et pour leur descendance.

Événements aléatoires

Il s'agit là d'un sens plus technique, et beaucoup plus tardif, du mot « hasard ». Il s'applique à des événements dont nous ignorons complètement les conditions déterminantes ou, plus exactement, des événements dont nous savons qu'ils sont réalisés dans certaines classes de conditions, mais sans que nous sachions lesquelles sont effectivement réalisées dans un cas particulier (Nagel, 1961). L'immobilisation d'un dé non pipé sur telle ou telle face est un événement aléatoire. En génétique mendélienne, le fait qu'un individu soit de génotype *AA* ou *aa* quand ses parents sont tous deux *Aa* est aussi un événement aléatoire. L'invocation du hasard ne signifie pas ici que l'événement singulier qui s'est produit n'avait pas de conditions déterminées, mais simplement que, eu égard à ce que nous savons, il y avait plusieurs possibilités, et que nous ne pouvions prédire laquelle serait réalisée.

Cette notion du hasard requiert davantage de théorie que la première. Elle exige qu'une hypothèse soit faite sur ce qui est aléatoire, et que l'on démontre que l'on est bien en fait dans la situation postulée. La solution la plus classique consiste à faire appel au calcul des probabilités. L'aléatoire n'implique aucunement l'idée d'un désordre absolu. Au contraire, nous utilisons ce concept lorsque nous savons que des événements se produisant dans certaines conditions se manifestent avec une certaine fréquence. Depuis le XVII^e s., le calcul des probabilités s'est efforcé de préciser des critères opératoires permettant de reconnaître ce genre d'événements. Un événement aléatoire est un événement qui

suit une « loi de probabilité ». Cette procédure consiste à construire un tableau dans lequel on énumère la probabilité P_A pour que l'événement *A* se produise, la probabilité P_B pour que l'événement *B* se produise, etc. (par exemple : probabilité de tirer un roi, une dame, etc., dans un jeu de cartes). L'aléatoire n'a donc de sens que par rapport à une théorie formelle qui lui donne un sens quantitatif précis. Cette notion du hasard n'exclut pas qu'il y ait une causalité stricte au niveau de l'événement. C'est par exemple le cas du dé qui tombe sur telle ou telle face : il y a certainement un jeu de causes rigoureusement déterministe qui aboutit à cet effet. Simplement, nous ne disposons pas de théories et/ou d'observations suffisamment précises pour déduire l'événement. Ainsi la chute d'un dé est-elle rigoureusement déterministe. Toutefois la notion du hasard comme événement aléatoire n'implique pas nécessairement qu'une telle causalité existe ; la mécanique quantique offre un bon exemple de cette situation.

Contingence par rapport à un système théorique

Le troisième sens épistémologiquement important du hasard peut être aisément présenté au travers d'un exemple. En mécanique newtonienne, la prédiction de la position future d'une planète exige de connaître l'état du système planétaire, autrement dit les masses, les positions et les vitesses des planètes à un certain instant *t*. Il ne suffit donc pas de connaître les lois dont l'ensemble logiquement coordonné constitue le système théorique pour effectuer des prédictions ; il faut aussi introduire des « conditions initiales », qui sont elles-mêmes contingentes par rapport au système théorique, et qui ne nous sont donc connues qu'à titre de vérités empiriques. Un événement peut fort bien être contingent dans un certain système théorique (c'est-à-dire non logiquement dérivable à l'intérieur de ce système théorique), et ne pas l'être par rapport à un autre. Le même événement sera donc contingent dans le premier, tandis qu'il sera logiquement déterminé dans le second.

Un exemple plus abstrait de cette notion est fourni par les constantes figurant les lois physiques. Aussi longtemps que l'on ne dispose pas d'un cadre théorique permettant de déduire la valeur d'une constante, celle-ci est contingente par rapport à la théorie. Ainsi, dans la loi galiléenne de chute des corps, la valeur du facteur d'accélération *g* est contingente, car seule l'expérience nous contraint à l'admettre. Dans la physique newtonienne, cette valeur est déductible, pour autant que l'on ait des informations sur la masse et la forme de la Terre. Mais la valeur de la constante de gravitation universelle *G* demeure une vérité contingente.

Dans les sciences biologiques, cette signification du mot hasard revêt une extrême importance, que l'on a tendance à oublier tant elle est triviale et, il faut bien le reconnaître, peu glorieuse pour ce genre de science. La faible capacité prédictive des sciences biologiques tient à ce qu'elles ont affaire à des systèmes complexes, pour lesquels on ne dispose en général que de modèles

pauvres (donc débordés par les particularités du cas étudié), ou encore pour lesquels les conditions initiales ne sont pas déterminables avec exhaustivité et précision.

Remarque

Nous avons délibérément ignoré un quatrième concept philosophique, célèbre, du hasard. Augustin Cournot a proposé de définir le hasard comme la « combinaison ou la rencontre de phénomènes qui appartiennent à des séries indépendantes dans l'ordre de la causalité ». Le philosophe et mathématicien illustre cette définition en prenant l'exemple d'un homme qui prend le train pour faire une partie de campagne, et meurt du fait du déraillement du train. « La victime – dit Cournot – est fortuite, car les causes qui ont amené l'accident ne tiennent pas à la présence du voyageur. » Cette notion du hasard a sans aucun doute un fort pouvoir de conviction intuitive. Elle est même sans doute extrêmement utile d'un point de vue pragmatique. Mais elle présente de sérieuses faiblesses épistémologiques, comme l'a montré Ernst Nagel (1961). La conception du hasard comme convergence de séries causales indépendantes repose en effet sur le postulat artificiel que les causes et les effets s'enchaînent selon des « lignes » bien définies. Or, ce postulat paraît bien peu fondé. Car n'importe quel événement du monde physique est l'effet d'un nombre indéfiniment grand de déterminants causaux. Chaque événement est à l'intersection d'un nombre indéfini de « lignes » ou « séries causales ». Ce n'est guère que dans des situations expérimentales contrôlées que la notion de série causale pleinement efficiente prend une signification objective. La science expérimentale consiste tout entière à fixer autant que possible les conditions d'un genre d'un événement, à l'exception d'un facteur que l'on fait varier. Dans la nature, les choses ne se passent pas ainsi. Sans doute certaines lignes de causalité sont-elles plus autonomes que d'autres. Mais c'est là une situation assez rare.

Jean GAYON

→ Causalité (Principe de) ; Contingence ; Loi de la nature ; Probabilité [LOGIQUE/MATHÉMATIQUE] ; Probabilité [PHYSIQUE] ; Statistique ; Téléologie.

HEGEL Georg Wilhelm Friedrich, 1770-1831

Philosophe allemand. En août 1801, Hegel soutenait sous le patronage de Schelling une thèse devant lui accorder le droit d'enseigner à l'université d'Iéna. Dans cette *Dissertatio philosophica de orbitis planetarum* il

dirigeait ses attaques contre la mécanique newtonienne et contre la formule proposée par Bode pour décrire la distance des planètes au soleil. La mécanique newtonienne se voyait accusée d'être une mathématique plus qu'une physique, quant à la formule de Bode, elle se voyait critiquée au moment même où les astronomes découvraient un astéroïde confirmant sa pertinence. On put ainsi faire du nom de Hegel le symbole du rapport vicieux aux sciences propre aux philosophes de la nature d'inspiration schellinguienne. La dénonciation hégélienne de la physique newtonienne se retourna contre la philosophie hégélienne elle-même, suspecte d'ignorer les théories scientifiques de son temps, de méconnaître les acquis de la physique classique, et de vouloir cependant concurrencer de savoir positif jusque dans des questions empiriques.

On notera cependant que Hegel est tout sauf un contempteur du savoir positif. Il prend plaisir à rappeler dans la page de garde de sa *Phénoménologie de l'esprit* qu'il est « membre et assesseur de la société minéralogique grand-ducale ainsi que d'autres sociétés savantes ». Son information scientifique était remarquable. Le nombre des ouvrages scientifiques de sa bibliothèque personnelle est déjà considérable, et les multiples références au savoir de l'époque dans sa *Philosophie de la nature* révèlent que l'étendue de son savoir scientifique est loin de s'y réduire. À la lumière d'études récentes, on s'aperçoit que ses prétendues grossières erreurs ou contresens impardonnables sont en fait des énoncés présents dans la culture scientifique de l'époque et qu'ils doivent être interprétés en référence au contexte historique et national de la science allemande du début du XIX^e s.

Il faut ajouter en outre que les principes et la méthode de la philosophie hégélienne de la nature subirent de profondes modifications. Si la *Dissertation* de 1801 n'est pas si irrationnelle que l'on veut bien le dire, elle est certes tributaire de la philosophie schellinguienne de la nature par son organicisme comme par sa prétention à substituer le savoir *a priori* au savoir empirique. Ce n'est plus le cas des philosophes de la nature publiés dans les différentes versions de l'*Encyclopédie des sciences philosophiques* (1817, 1827, 1830). Hegel y procède à une critique virulente de l'irrationalité des philosophes de la nature d'inspiration schellinguienne, il y fait de la Mécanique une sphère de la nature à part entière (au même titre que la Physique et l'Organique), et il y insiste sur la nécessité du conditionnement du discours philosophique par le discours scientifique, ce qui le conduit à prendre explicitement ses distances avec son écrit de 1801.

Hegel est-il effectivement parvenu à conformer sa philosophie de la nature au programme ainsi formulé, celui d'une collaboration rationnelle de la philosophie et des sciences ? Pour répondre à cette question, il faudrait se livrer à une analyse détaillée de la culture scientifique de l'époque qui prenne en compte les différentes conséquences des échos favorables que les hypothèses dynamistes de Kant, Goethe et Schelling recevaient alors en Allemagne ; le débat est loin d'être

cles. Mais il semble cependant établi que si Hegel se rattache par sa volonté de fonder la science dynamiste de son temps à la *Naturphilosophie* allemande, sa philosophie de la nature n'est pas réductible aux philosophies de la nature romantiques (Novalis) ou métaphysiques (Schelling) que Liebig devait bientôt considérer comme la « peste noire » de la vie intellectuelle.

► CHÂTELLET G., *Les enjeux du mobile. Mathématique, physique, philosophie*, Paris, Le Seuil, 1993. — ENGELHARDT D. VON, *Hegel und die Chemie. Studie zur Philosophie und Wissenschaft der Natur um 1800*, Wiesbaden, Guido Pressler, 1976. — FARRAR W.V., « Science and the German University System, 1790-1850 », in CROSSLAND M.P., *The Emergence of Science in Western Europe*, Londres, Macmillan, 1975, p. 179-192. — FERRINI C., *Guida al « De Orbitis planetarum » di Hegel ed alle sue edizioni e traduzioni*, Berne, Paul Haupt, 1995. — GREGORY F., « Kant's Influence on Natural Scientists in the German Romantic Period », in WISER R.P. et al., *New Trends in the History of Science*, Amsterdam, 1990, p. 53-72. — IHMIG K.N., *Hegels Deutung der Gravitation*, Frankfurt, Athenäum, 1989. — KNIGHT D.M., « German Science in the Romantic Period », in CROSSLAND M.P., op. cit., 1975, p. 161-178. — KNIGHT D.M., *Ideas in Chemistry. A History of the Science*, Londres, Athlone Press, 1992. — NEUSER W., « Die naturphilosophische und naturwissenschaftliche Literatur aus Hegel privater Bibliothek », in PETRY M.J., *Hegel und die Naturwissenschaften*, Stuttgart/Bad Cannstadt, Frommann-Holzboog, 1987, p. 479-499. — PETRY M.J., trad., introd. et notes, in HEGEL G.W.F., *Philosophy of Nature*, Londres/New York, Allen & Unwin, 3 vol., 1970 : (éd.), *Hegel and Newtonianism*, Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1993. — RENAULT E., « Les philosophies de la nature d'aujourd'hui et la Naturphilosophie d'hier », in MALLER H., *Hegel passé, Hegel à venir*, Paris, L'Harmattan, 1995, p. 29-53 ; « Système et historicité du savoir chez Hegel », *Hegelfahrerbuch*, 1997.

Emmanuel RENAULT

→ Dialectique ; Naturphilosophie ; Phénomène.

HEIDEGGER ET LA QUESTION DE LA TECHNIQUE

La question de la technique porte sur son essence. Martin Heidegger (1889-1976) y répond par le mot *Gestell*, traduit avec autant de prudence que de pertinence par « arraisonnement » (A. Préau) puisqu'« il ne saurait en aucun cas désigner une simple chose » (*Questions IV*, p. 330). *Gestell* est un mot difficilement traduisible et dont la signification est déjà détournée par Heidegger lui-même : entre « armature » et « squelette », donc entre cloisonnement et destruction, le mot laisse entendre que la nature (la totalité de l'étant) est poussée dans ses derniers retranchements à force d'être investie. Il dit l'essence provocante de la technique. Dès que la nature est forcée (*gestellt*) de livrer toute son énergie — parce qu'elle est placée (*gestellt*) comme telle pour être mise en exploitation —, il y a affirmation de la technique. Soit l'exemple de la mise en place d'une centrale électrique dans le courant du Rhin : la cen-

trale somme (*stellt*) le fleuve de livrer sa pression hydraulique, qui somme à son tour les turbines de tourner ; la production du courant électrique suppose qu'un réseau soit commis aux fins de transmission de cette énergie... mise en place par l'enchaînement de ces conséquences. Ce Rhin, « mûré dans l'usine d'énergie », ne demeure fleuve du paysage « que comme un objet pour lequel on passe une commande, l'objet d'une visite organisée par une agence de voyages, laquelle a constitué là-bas une industrie de vacances » (*Essais et conférences [EC]*, p. 22). Nous reviendrons sur l'abîme que creuse Heidegger entre « vacances » (de la pensée) et « séjours » (de celle-ci) sur terre.

Autonomie de la technique et Arraisonnement

Selon Heidegger, l'essence de la technique n'est ni instrumentale ni anthropologique : elle est un mode essentiel du dévoilement. « Le dévoilement qui régit la technique moderne est une provocation par laquelle la nature est mise en demeure de livrer une énergie qui comme telle puisse être extraite et accumulée » (*EC*, p. 20). Appuyer sur l'interrupteur électrique fait venir la lumière : ce dévoilement est sommation à comparaître et nullement jaillissement de l'être. En fait, rien ne s'entend de la réflexion heideggérienne hors de l'Historial qu'elle dresse de la présence, c'est-à-dire hors de l'attention tournée vers ce qui n'a « cessé d'être », à savoir le processus d'exténuation de la Vérité de l'être que trahit l'accumulation des conceptions métaphysiques. Car la métaphysique est l'histoire de l'oubli de l'être : elle pense l'étant en tant que tel, mais ne s'arrête pas à cet « en tant que tel » pour le penser, préférant caractériser l'être comme « quelque chose » alors que le retrait lui appartient essentiellement : « L'être se retire en ce qu'il se déclôt dans l'étant » ; il « n'entre pas dans la lumière du déploiement de son règne » (*Chemins*, p. 217). La métaphysique, escamotant ce retrait, enquête sur l'étantité, sur ce qui fonde et donc rend présent ce qui est. Cette volonté ne pénètre aucunement la Vérité de l'être mais s'accroche à « un » être conçu et représenté sous le mode de la causalité et du fondement. L'être recherché par la métaphysique n'est qu'une présence stable, disponible, maîtrisable, capable de « sauver les phénomènes ». La Vérité de l'être étant ainsi tenue pour rien dans la métaphysique, celle-ci recèle la puissance nihiliste que la technique va prolonger dans les Temps modernes. L'essence de la technique procède à son tour d'un envoi (*Geschick*) de l'être, c'est-à-dire d'un mode particulier du dévoilement du monde réalisé en deçà de toute volonté humaine : tout provient de l'être voilé, c'est-à-dire de l'être dans sa Vérité. C'est parce que l'être s'est détourné de sa vérité dans la métaphysique, qu'il se destine maintenant comme essence de la technique dans le *Gestell*. Il y a donation technicienne, ce qui exclut toute possibilité de domination humaine de la technique. On peut maîtriser des machines mais

l'essence de la technique ne ressortit pas à notre volonté : elle n'est rien d'humain. En ce sens, elle est la forme achevée de l'attitude métaphysique obstinément rivée sur l'étantité.

L'Arraisonnement est envoi de l'être : « Arraisonnement (*Ge-stell*) : ainsi appelons-nous le rassemblant de cette interpellation (*Stellen*) qui requiert l'homme, c'est-à-dire qui le provoque à dévoiler le réel comme fonds dans le mode du « commettre » » (*EC*, p. 27). Le mot « fonds » (*Bestand*), indissociable du mot « disponible », caractérise « la manière dont est présent tout ce qui est atteint par le dévoilement qui provoque. Ce qui est là au sens de fonds n'est plus en face de nous comme objet ». À la neutralité objective de ce face à face avec l'objet, les Temps modernes ont substitué « des stocks, des réserves, des fonds ». La détermination ontologique de l'étant comme fonds de réserve est envisagée dans l'horizon de l'utilité, dans « la possibilité constante d'être commandé et commandité » (*Questions IV*, p. 304). La machine est dépendante du fonds : elle tient son être d'une commission donnée à du commissible, à l'instar de l'avion commercial qui, sur la piste, est un objet qui se dévoile aussitôt comme fonds une fois qu'il est commis à assurer un transport (*EC*, p. 23) : son essence n'est donc plus l'objectivité. La provocation (*Herausfordern*), à la fois sommation et consommation, est la mise en pratique du dépouillement des choses de leur statut d'objet ; la mise en demeure de traiter la nature comme un immense réservoir de forces et d'énergies exploitables, comme un « stock » disponible pour l'« usure », toujours calculable à l'avance. Tout est commissible, même l'homme qui devient à son tour fonds au point de devenir « la plus importante des matières premières » : manipulations génétiques et techniques de fécondation artificielle déplacent l'humain sur le modèle de la production industrielle. L'étant n'est plus soit objet du sujet, soit sujet du sujet : sa présence se déploie telle une matière transformable et déformable à volonté. « Être, aujourd'hui, c'est être-remplaçable » (*Questions IV*, p. 304).

Les grands principes que la métaphysique, mue par l'oubli de l'être, a dégagés vont se réaliser dans la technique et ainsi subir une transformation qui les rend difficilement reconnaissables. La volonté devient « volonté de la volonté » ; la représentation, Arraisonnement. Essence de l'être à l'époque de la technique, la volonté de la volonté désigne l'exploitation organisée de l'étant. Elle « nie toute fin en soi et ne tolère aucune fin si ce n'est comme moyen » (*EC*, p. 103) : elle produit pour produire, accumule pour accumuler, stocke pour stocker et non pour répondre à des besoins mais bien plutôt pour en susciter et permettre ainsi à la technique d'accroître sa domination. Chaque principe métaphysique trouve sa signification achevée dans la technique. En ce sens, l'achèvement de la métaphysique marque non pas la fin mais le commencement de son règne. « L'être se retire en ce qu'il se déclôt dans l'étant » aujourd'hui livré comme fonds.

Dépendance de la science

La science n'est qu'un des multiples aspects de la technique. Son essence réside dans « le projet mathématique de la nature ». Lorsque Galilée affirme que la nature est écrite en langage mathématique, il n'énonce pas une proposition scientifique, mais lance une pétition de principe dont Heidegger décèle à la fois l'inspiration métaphysique et le coup de force dirigé contre la nature. Appartient à la nature tout phénomène se conformant à un plan unique projeté *a priori* : ce plan fixe à l'avance, selon une série d'axiomes (« énonciations anticipantes ») ce que doivent être les choses. Saisis par l'analyse mathématique, les phénomènes « n'existent » que dans leurs déterminations quantitatives : ils sont mis en demeure de se dévoiler comme un complexe calculable de forces. Et Heidegger de citer un mot de Max Planck : « Est réel ce qu'on peut mesurer. » En ce sens, la science, poursuivant la mathématisation de la nature, n'est pas un projet autonome : « La physique moderne n'est pas une physique expérimentale parce qu'elle applique à la nature des appareils pour l'interroger, mais inversement : c'est parce que la physique — et déjà comme pure théorie — met la nature en demeure (*stellt*) de se montrer comme un complexe calculable et prévisible de forces que l'expérimentation est commise à l'interroger, afin qu'on sache si et comment la nature ainsi mise en demeure répond à l'appel » (*EC*, p. 29). Certes la science décide-t-elle d'avance du réel en n'admettant que l'objectivable et le calculable, mais elle est fondamentalement au service du projet plus général de l'Arraisonnement technique et répond à une nécessité de son essence. « C'est parce que l'essence de la technique moderne réside dans l'Arraisonnement que cette technique doit utiliser la science exacte de la nature. Ainsi naît l'apparence trompeuse que la technique moderne est de la science naturelle appliquée » (*EC*, p. 31).

À cause de son projet mathématique de la nature, « la science ne pense pas » (*EC*, p. 157), et c'est précisément ce qui rend possible sa démarche (*Qu'appelle-t-on penser ?*, p. 26). La science n'existe qu'à partir du préalable d'une réduction du mode d'être de l'étant à une objectivité représentable pour un sujet et manipulable par une volonté. Ce préalable s'effectuant dans la métaphysique, c'est-à-dire dans la « non-pensée de l'être » (*Chemins*, p. 113), la science ex-siste ainsi de celle-ci et donc ne pense pas, si penser signifie bien être convoqué par l'énigme de la Vérité de l'être qui, se refusant afin de donner, laisse la pensée se perdre dans la métaphysique qui, elle-même et à son insu, nous voile l'événement de ce refus (*ibid.*, p. 175). Il ne saurait y avoir une définition de la pensée car celle-ci n'est ni axiome ni règle. Indéfinissable, « la pensée ne commencera que lorsque nous aurons appris que cette chose tant magnifiée depuis des siècles, la Raison, est la contradiction la plus acharnée de la pensée ». Continuant toujours de parler de l'être de l'étant, les sciences

répercutent l'origine même de la métaphysique : l'oubli de l'être.

Instrument et pensée méditative

La technique produit des instruments que l'utilisateur ne comprend pas. Une remarque de Hannah Arendt a une certaine pertinence dans le contexte heideggerien : « Nous ne sommes plus capables de comprendre, c'est-à-dire de penser et d'exprimer les choses que nous sommes cependant capables de faire » (*La condition de l'homme moderne*, Paris, Calmann-Lévy, 1961, p. 10). On peut utiliser une machine informatique sans la comprendre : elle fonctionne malgré notre méconnaissance totale de ses lois quand nous l'utilisons. C'est ce qui inquiétait Heidegger. Aux journalistes du *Spiegel* lui opposant l'idée naïve selon laquelle, même si la technique n'a effectivement plus rien à voir avec des outils, « tout fonctionne, [...] la production va son train [et que] nous vivons dans l'aisance », le penseur donna cette réponse : « Tout fonctionne. C'est bien cela l'inquiétant, que ça fonctionne, et que le fonctionnement entraîne toujours un nouveau fonctionnement, et que la technique arrache toujours davantage l'homme à la terre, l'en déracine. Je ne sais pas si cela vous effraie, moi, en tout cas, cela m'a effrayé de voir maintenant les photos envoyées de la lune sur la terre. Nous n'avons plus besoin de bombe atomique, le déracinement de l'homme est déjà là. Nous ne vivons plus que des conditions purement techniques. Ce n'est plus une terre sur laquelle l'homme vit aujourd'hui » (*Réponses et questions*, p. 45-46). À l'occasion d'un séjour en Grèce, Heidegger livrera clairement et simplement au détour d'une banale anecdote ce qu'il entend par Terre et ce qu'il considère comme utilisation d'un produit technique : « Pendant que nous séjournerions dans l'enclos sacré [de Delphes], la foule des visiteurs avait, au fil des heures, considérablement augmenté – partout des gens en train de photographier. Ils évacuent leur mémoire dans l'image de production technique. Ils ne se doutent même pas, n'en ayant nulle idée, qu'ils renoncent à la fête de la pensée » (*Séjours – Aufenthalt*, Le Rocher, 1992, p. 79-81).

On a parlé de technophobie là où Heidegger empruntait des chemins ouverts sur l'éclaircie de la pensée. À force d'arraisonner le monde, la technique, enfin poussée à son terme, convoquera peut-être l'homme à se révéler à son destin pour s'éloigner de l'étant car « là où est le danger, là aussi croît ce qui sauve ». Mais tant que nous nous représenterons la technique comme un instrument, nous resterons prisonniers de la volonté (illusoire) de la maîtriser. La pensée de l'essence de la technique n'a d'autre interlocuteur que l'être dans son oubli. Ainsi est-elle essentiellement questionnement.

● *Essais et conférences* (« La question de la technique », « Science et méditation », 1953), trad. fr. A. Préau, Paris, Gallimard, 1958. – *Qu'appelle-t-on penser ?* (1954), trad. fr. A. Becker & G. Granel, Paris, PUF, 1959. – *Chemins qui ne*

mènent nulle part, trad. fr. W. Brokmeier, Paris, Gallimard, 1962. – *Le principe de raison* (1957), trad. fr. A. Préau, Paris, Gallimard, 1962. – *Réponses et questions sur l'histoire et la politique* (interrogé par « Der Spiegel », 1966), trad. fr. J. Launay, Paris, Mercure de France, 1977. – *Questions IV* (1969-1973), trad. fr., Paris, Gallimard, 1976.

► BEAUFRET J., *Entretiens*, Paris, PUF, 1984. – HAAR M., *La fracture de l'Histoire. Douze essais sur Heidegger*, Grenoble, Millon, 1994. – Coll. : *Martin Heidegger*, Paris, Cahiers de L'Horne, 1983.

Reynal SORLE

→ Nature ; Objectivité ; Phénoménologie ; Reproductibilité ; Technique.

HÉLIOCENTRISME

La Terre tourne-t-elle autour du Soleil, ou l'inverse ? C'est la question centrale des *Dialogues sur les deux principaux systèmes du monde*, qui valent à Galilée sa condamnation de 1633. Or, à cette date, il y a déjà soixante-dix ans que Copernic a publié son système : on voit que cette publication n'a pas mis fin au long règne des thèses géocentriques. De même, ce règne ne commence pas avec Ptolémée, au II^e s. de notre ère, mais bien plus tôt encore : au temps de Platon. C'est celui-ci, en effet, qui impose entre la Terre et le « ciel » une séparation rigoureuse destinée à durer vingt siècles, jusqu'à Galilée justement. L'interdiction des idées héliocentriques n'est qu'un aspect de cette séparation, dont la description exige que l'on remonte à une époque encore antérieure à celle de Platon.

La nature du monde

« De quoi est fait le monde ? » Cette question aurait été posée pour la première fois par Thalès, à Milet, vers 585 avant notre ère. En tout cas c'est là, et à ce moment, que naît ainsi l'interrogation scientifique. Jusque-là, en Ionie comme en Égypte ou à Babylone, les mythes suffisent à rendre compte des apparences. Ainsi la Terre est circulaire et plate, sous une voûte solide où les dieux circulent des messages aux hommes. En moins de cent ans, les Ioniens remplacent cette description par celle d'un univers étonnamment moderne, où la Terre est une sphère, ainsi que le Soleil et la Lune, le premier étant fait de feu et la seconde, terreuse, lui « empruntant sa lumière » ! Les étapes de ce bouleversement se succèdent rapidement. Le monde de Thalès est fait d'eau, une Terre en forme de galette y flottant au fond d'une bulle d'air. Son élève Anaximandre, toujours à Milet, enlève l'eau : sa Terre cylindrique occupe le centre du monde, sans avoir plus tendance à tomber vers le bas que vers le haut. Puis les Perses envahissent l'Ionie, et les Ioniens se réfugient dans le Sud de l'Italie : Pythagore y fonde son école, et c'est sans doute lui, pour des raisons de perfection géométrique, qui proclame la rotondité de la Terre. En tout cas son disciple Parménide (~ 490 av. J.-C.) la

considère comme acquise, et l'étend au Soleil et à la Lune – en découvrant à la fois l'explication des phases de notre satellite et la propagation de la lumière.

Puis les vicissitudes de la guerre portent à la tête du monde grec une petite cité religieuse et guerrière, Athènes. Dès 450 avant J.-C. on y condamne pour impiété l'Ionien Anaxagore, venu enseigner que la Lune est une pierre dans le ciel, et les autorités de la ville interdisent, sous peine de mort, de « donner un enseignement sur les choses du ciel », c'est-à-dire sur la nature des corps célestes. Cette interdiction va rester en vigueur pendant vingt siècles, grâce au soutien de ceux qui mettent en forme, à ce moment, les règles de la raison, les philosophes athéniens, Socrate et Platon : elle coûte la vie au premier, mais cela ne fait que renforcer la détermination du second, qui va trouver chez les Pythagoriciens l'ébauche d'une astronomie débarassée de toute question physique.

Les disciples les plus orthodoxes de Pythagore, en effet, sont restés fidèles à son goût exclusif pour les nombres et la perfection géométrique. Philolaos aboutit ainsi, de façon paradoxale, à une image de l'univers où la Terre bouge, où elle n'est plus au centre du monde ! Celui-ci est occupé par un « feu central », autour duquel tournent dans l'ordre : une « Anti-terre », la Terre, la Lune, le Soleil et les cinq planètes visibles à l'œil nu (les Pythagoriciens voulaient sans doute dix astres en tout). La Terre fait un tour en vingt-quatre heures autour du feu central, en tournant toujours vers lui la même face, ce qui rend compte du mouvement apparent des étoiles. Cette face n'est pas celle qui porte la Grèce, où l'on ne voit donc jamais l'Anti-terre, ni le feu central.

L'ordre athénien

De ce modèle Platon retient l'emboîtement des sphères concentriques, mais il remplace au centre la Terre – redevenue immobile – en supprimant le feu central et l'anti-terre. Son ami Eudoxe réalise ainsi un modèle de l'univers à vingt-sept sphères centrées sur la Terre. Chaque astre est porté par une sphère qui tourne autour de deux pivots portés par la suivante, tournant elle-même autour de deux pivots portés par une troisième : cela suffit pour le Soleil ou la Lune. Pour chaque planète il faut quatre sphères, mais pour le firmament étoilé une seule suffit.

Aristote reprend le modèle d'Eudoxe, en insistant davantage sur le caractère matériel des sphères – leur matière étant nécessairement parfaite, puisque céleste – ce qui l'amène à en rajouter un certain nombre : il finit par en utiliser cinquante-cinq, toutes concentriques évidemment. Mais surtout, avec Aristote, la coupure s'institutionnalise entre la Terre, domaine de l'accident, de l'irrégularité, où il est convenable de rechercher une explication naturelle des phénomènes, et le Ciel divin, parfait, immuable, où il serait impie de s'interroger aussi bien sur la nature des astres que sur la cause de leurs mouvements : l'astronomie doit se borner à

trouver des descriptions mathématiques, les plus fidèles possibles, de ces mouvements.

La limite entre ces deux domaines radicalement différents est la sphère de la Lune. L'adjectif « sublunaire » a un sens bien précis : il s'applique à tout ce qui est « non céleste », c'est-à-dire imparfait et accessible à l'étude physique.

Aristarque ou Ptolémée ?

Ce modèle va durer vingt siècles, malgré quelques réticences initiales, par exemple celles d'Héraclide du Pont, dissident de l'École de Platon, qui fait tourner la Terre sur son axe en 24 heures, et propose que Mercure et Vénus tournent autour du Soleil, animé lui-même d'un mouvement annuel autour de la Terre.

Ces réticences vont même, avec Aristarque, jusqu'à un modèle complètement héliocentrique, où la Terre tourne autour du Soleil comme les autres planètes. Ce modèle, où la coupure entre ciel et terre a évidemment disparu, date de 250 ans environ avant notre ère. Non seulement il vaut à son auteur une accusation d'impiété (qui n'aboutit à rien, Alexandrie en 250 av. J.-C. n'étant pas Athènes en 450 av. J.-C.), mais de plus il effarouche même les savants : Archimède par exemple ne peut s'y rallier, car l'orbite assignée à la Terre lui semble ridiculement petite par rapport aux distances des étoiles...

Aristarque ne fait pas école et son héliocentrisme disparaît avec lui. Ainsi Hipparque, le plus précis des astronomes de l'Antiquité, auteur vers 130 avant J.-C. du premier catalogue d'étoiles et de la première mesure correcte de la Lune, reprend pour ses calculs planétaires le modèle géocentrique, tel qu'il a été perfectionné par un autre Alexandrin, le géomètre Apollonius (~ 230 av. J.-C.). Ce modèle mérite que l'on s'y arrête, car c'est à peu de chose près le « système de Ptolémée », où les sphères – toujours nécessaires sur le plan théologique – laissent place, pour les calculs, à d'ingénieux assemblages de cercles.

Chaque astre tourne sur un cercle, l'épicycle, dont le centre décrit un autre cercle, le déférent, centré sur la Terre immobile. Ce système permet de rendre compte, par exemple, des écarts au cercle que présentent les trajectoires, par rapport à la Terre, du Soleil et de la Lune, tout en ne faisant appel qu'à des mouvements circulaires uniformes, c'est-à-dire parfaits, comme il convient dans le ciel.

Ptolémée, bénéficiant, au II^e s. de notre ère, de trois cents ans d'observations supplémentaires, est obligé de s'écarter, discrètement, de cette perfection. Pour la Lune, il excentre le déférent : le mouvement reste uniforme vu de la Terre, mais il ne l'est plus le long du déférent. Pour les planètes c'est pire : l'uniformité n'est plus maintenue que par rapport à l'« équant », point symétrique de la Terre par rapport au centre du déférent – excentré lui aussi.

Dès lors, le modèle géocentrique dispose en quelque sorte de deux lignes de défense, contradictoires entre elles mais parfaitement utilisables à tour de rôle : d'une

part le modèle des sphères concentriques de cristal, dont la perfection limpide nourrit la ferveur religieuse du grand public, et d'autre part le système de cercles, très compliqué, sur lequel reposent les calculs des astronomes professionnels. L'édifice est si solide qu'il va durer, tel quel, pendant les quatorze siècles qui séparent Ptolémée de Copernic.

Plus aristotélicien que Ptolémée

Le livre de Copernic, *Des Révolutions des orbés célestes*, paraît à peu de chose près le jour de sa mort, en 1543. Il est précédé d'une préface rédigée à l'insu de l'auteur par le théologien Osiander, préface où celui-ci explique que le modèle héliocentrique présenté par l'ouvrage n'est qu'une description mathématique parmi d'autres. Cette allégation est notoirement fautive. Pour Copernic, son modèle n'est pas du tout « une description parmi d'autres » : c'est un retour nécessaire à la pureté aristotélicienne, mise à mal par tous les manquements de Ptolémée à l'uniformité des mouvements circulaires ! On a pu dire ainsi que son œuvre se réduisait à la suppression de l'équant, ce qui est tout aussi faux, comme on va le voir. D'après les témoignages de ses amis, Copernic se convainçait dès 1510 de la justesse d'une théorie héliocentrique : s'il laisse s'écouler trente-trois ans avant de la publier, c'est à la fois pour accumuler des arguments, et pour éviter des démêlés, qu'il juge inévitables, avec l'Église. Qu'est-ce qui le pousse à bouleverser ainsi les idées admises ?

D'abord, on vient de le voir, le désir de revenir aux sources aristotéliciennes... Au-delà du paradoxe, en effet, ce désir recouvre une volonté de simplicité : si Copernic, par exemple, fait tourner en vingt-quatre heures la Terre, plutôt que la voûte céleste, c'est parce que c'est plus simple. Il traduit cela en termes aristotéliciens (la sphère des fixes étant le lieu de l'univers, il serait absurde de faire tourner le contenant plutôt que le contenu) dont l'obscurité pittoresque ne doit pas faire illusion : c'est bien d'une recherche de simplicité qu'il s'agit. De même pour l'héliocentrisme, qui permet de supprimer tous les épicycles puisque ceux-ci ne font – on s'en aperçoit maintenant – que traduire, à l'envers en quelque sorte, le parcours de la Terre autour du Soleil. On réalise ainsi que ces épicycles sont tous égaux, et que l'on peut déduire de leurs diamètres apparents une estimation des rapports des distances planétaires. Mais ce n'est pas tout, et il semble bien que Copernic ait été animé d'une sorte de « ferveur solaire », moins absolue que celle qui habitera Kepler, mais très puissante tout de même : il chante la « beauté » de l'astre du jour, et souligne que celui-ci, chargé d'éclairer le monde, ne saurait mieux le faire qu'en occupant son centre. Pourtant, ce n'est pas exactement le Soleil qu'il place au centre des orbites planétaires, mais un point légèrement excentré, et d'ailleurs mobile, le centre de l'orbite terrestre. Paradoxe des paradoxes : il finit, à cause de cela, par réintroduire des corrections à base d'épicycles.

Une révolution à retardement

La publication du livre n'a pas de conséquences immédiates. Il n'est même pas condamné, ni par les protestants – Melancthon en dit du bien dès 1549 – ni par les catholiques, qui profitent de la préface d'Osiander pour fermer les yeux. Toutefois, l'enseignement officiel reste fidèle à Ptolémée, absolument en Italie et majoritairement dans les pays du Nord, même si quelques novateurs, comme Mästlin, le maître de Kepler, adoptent hardiment la description héliocentrique. Cela n'empêche pas Copernic d'être, aux yeux de tous, celui qui a enlevé la Terre du centre du monde pour en faire une planète comme les autres. Aussi la plupart de ceux qui mettent en doute la perfection céleste le reconnaissent, à tort ou à raison, comme leur maître.

Or, la perfection céleste reçoit de rudes coups en cette fin du XVI^e s. En 1572 Tycho Brahé découvre une nouvelle étoile, une « nova » : le firmament n'est plus immuable ! En 1577 survient une comète, dont Tycho détermine qu'elle est plus éloignée que la Lune : loin d'appartenir au monde « sublunaire » auquel semblait la vouer son caractère fantaisiste, la comète circule à travers les sphères de cristal – qui n'existent donc pas. Et même si Tycho, qui n'est pas copernicien, tente de « sauver l'essentiel » en laissant la Terre au centre du monde (le Soleil tournant autour d'elle tandis que les planètes tournent autour de lui), ses découvertes n'en mettent pas moins en cause, tout comme la théorie de Copernic, la coupure entre ciel et Terre.

Kepler, lui, est copernicien, et sans doute plus « héliomane » encore que Copernic. Son *Astronomie Nouvelle* de 1609 ne laisserait aucun doute à cet égard si on la lisait, si quelqu'un avait la patience nécessaire pour y découvrir les lois – les deux premières « lois de Kepler » – révélant la position, plus que centrale, occupée par le Soleil au foyer de chacune des trajectoires elliptiques des planètes. Mais personne ne lit l'énorme livre de Kepler. Ce n'est pas lui qui entraîne l'interdiction officielle des idées coperniciennes en 1616 – soixante-treize ans après leur publication. C'est un livre beaucoup plus petit, qui paraît au printemps de 1610, le *Messenger des Étoiles*, de Galilée.

Copernic enfin à l'index

Galilée est depuis longtemps partisan de la théorie copernicienne – bien qu'il doive enseigner à Padoue l'immobilité de la Terre – mais comme il l'écrit à Kepler dès 1597, il ne veut pas se lancer dans la bataille sans munitions. Ces munitions, sa lunette les lui fournit, en abondance, dès qu'il la tourne vers le ciel pendant l'hiver de 1609.

Pour Galilée, la plus belle de ses découvertes, celle qui lui semble la plus capable de réduire au silence les adversaires de Copernic, est celle des satellites de Jupiter. En effet, le premier argument contre le mouvement de la Terre était que la Lune ne la suivrait pas : voici que l'on peut voir non pas une mais quatre lunes

qui suivent Jupiter dans son mouvement – car Jupiter se déplace sans aucun doute, que ce soit autour du Soleil ou de la Terre. La première réaction des astronomes du Vatican est de refuser ces satellites. Quand ils se rendent à l'évidence et reçoivent triomphalement le savant toscan, le Saint Office s'émeut. En 1616 la théorie de Copernic est déclarée idiote, absurde et hérétique. Il est en effet contraire à l'Écriture de prétendre le Soleil immobile, puisque Josué « l'arrête dans sa course ». Les lunes de Jupiter ne sont pas le seul apport subversif du *Messenger des Étoiles*. Toute la première partie du livre est consacrée à la Lune, à ses montagnes, aux ombres variables qu'elles projettent – comme sur la Terre – et à la « lumière cendrée » que Galilée interprète comme le « clair de terre sur la Lune ». Or, s'il consacre des pages de texte, et de nombreux dessins, à cette « physique lunaire », c'est parce qu'elle contribue, plus encore peut-être que les satellites de Jupiter, à briser la barrière établie deux mille ans plus tôt entre Terre et « ciel ». C'est cette barrière que l'Église doit défendre à tout prix – comme les prêtres d'Athènes vingt siècles plus tôt. Et c'est parce qu'il l'attaque aussi, à sa manière, que Copernic se retrouve interdit si longtemps après la sortie de son livre. On sait les conséquences de cette interdiction pour Galilée. On sait d'autre part à quel point l'essentiel de son œuvre physique – la « relativité galiléenne » – était indissociable du combat pour le mouvement de la Terre : avec la rupture de la barrière entre Terre et ciel, ce n'est pas seulement l'astronomie qui prend un nouveau départ. On peut estimer que la victoire totale et définitive de l'héliocentrisme est acquise avec Newton. C'est donc une victoire de Galilée plus encore que de Copernic : quoi de plus galiléen que la liberté de considérer du même œil la pomme et la Lune ?

► COUDERC P., *Histoire de l'astronomie*, Paris, PUF, 1974.
 ► DREYER J.L.E., *History of the planetary systems from Thales to Kepler*, Cambridge, Univ. Press, 1906. – GALILÉE, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, Paris, Le Seuil, 1992 ; *Siderius Nuncius (le messenger céleste)*, Paris, Les Belles Lettres, 1992.

Jean-Pierre MAURY

→ Brahé ; Bruno ; Copernic ; Galilée ; Gravitation ; Kepler ; Pythagorisme.

HELMHOLTZ Hermann Ludwig VON, 1821-1894

Professeur à Königsberg, Bonn, Heidelberg et Berlin, il est l'un des plus grands savants allemands du XIX^e s. Ses contributions portent sur la géométrie non euclidienne, la thermodynamique, l'électrodynamique, l'anatomie, la physiologie et la psychologie des sensations, l'optique, l'acoustique, l'esthétique musicale, et la philosophie des sciences. Parti, à la suite de J. Müller, d'une position matérialiste et empiriste radicale opposée à l'idéalisme allemand, il développa une forme de kantisme naturalisé, en cherchant dans les conditions physiologiques de la sensation les formes de

l'intuition, tout en rejetant la thèse kantienne du caractère euclidien de l'espace perçu. Selon lui tout ce que nous connaissons du monde extérieur est accessible à la conscience en vertu des changements produits sur nos sens par des causes externes (dont les sensations sont des signes), changements qui sont transmis au cerveau par les nerfs, et qui produisent des perceptions qui sont des jugements et des inférences inconscientes. Cette théorie influencera fortement les conceptions contemporaines de la perception.

● *Handbuch der Physiologischen Optik*, Leipzig, 1856-1866 (trad. fr., 1867, rééd. J. Gabbay, Sceaux, 1989). – *Die Lehre von dem Tonempfindung*, Leipzig, 1863 (trad. fr., 1868, rééd. J. Gabbay, Sceaux, 1990). – *Populäre wissenschaftliche Vorträge*, Leipzig, 1865-1871.

Claudine TIERCELIN

→ Crise de la physique moderne ; Énergétisme ; Monisme ; Vision.

HEMPEL Carl Gustav, né en 1905

Épistémologue américain d'origine allemande, C.G. Hempel, connu sous le nom de « Peter » par ses collaborateurs, accepte les thèses fondamentales de l'empirisme logique, en particulier le vérificationisme et la distinction entre termes observationnels et termes théoriques. La place de Hempel a été de libéraliser les thèses de l'empirisme. Il met en lumière toute une catégorie de termes qui ne peuvent être immédiatement observables, et qu'il appelle « dispositionnels » (tel « magnétique »), et dont la définition comporte nécessairement une forme en « si... alors ». Pour mettre en rapport une telle formulation avec les faits observationnels, il faut une série d'énoncés de réduction, qui indiquent sous quelles conditions empiriques une telle définition n'est pas arbitraire : c'est la thèse libéralisée de l'empirisme. Une définition a donc affaire à des lois expérimentales. Cela ne règle pas pour autant les relations entre les hypothèses théoriques et les faits. Hempel met en lumière un paradoxe de la confirmation : si l'on admet qu'un énoncé universel du type $(\forall x)(ax \supset bx)$ peut être confirmé partiellement par l'observation, on admet aussi qu'une telle observation confirme une formulation logiquement équivalente à $(\forall x)(-bx \supset -ax)$; l'observation de n'importe quel objet qui n'a pas la propriété *a* confirmerait l'hypothèse. C'est pourquoi Hempel s'est consacré aux relations entre le système déductif-nomologique de la science et la logique inductive : la synthèse de ces aspects se joue dans une relation entre explication et prédiction, paradigme général des régularités.

● *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*. *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. 2, n° 7, Chicago, Univ. Press of Chicago, 1952. – *Aspects of Scientific Explanation and other Essays in the Philosophy of Science*, New York, Free Press, Londres, Collier-Macmillan, 1965. – *Philosophy of Natural Science*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1966 (trad. B. Saint-Sernin, *Éléments d'épistémologie*,

Paris, A. Colin, 1972). — HEMPEL C.G. & OPPENHEIM P., *Der Typusbegriff im Lichte der neuen Logik*, Leyde, A.W. Sijthoff, 1936.

► ESSLER W.K., PUTNAM H. & STEGMÜLLER W. éd., *Epistemology, Methodology, and Philosophy of Science. Essays in honor of Carl G. Hempel on the Occasion of his 80th Birthday, January 8th 1985*, *Erkenntnis*, vol. 22, n° 1, 2 et 3, janv. 1985. Dordrecht, D. Reidel, 1985. — FETZER J. H., *The Philosophy of Carl G. Hempel: Studies in Science, Explanation, and Rationality*, Oxford, New York, Oxford Univ. Press, 2001. — HEMPEL C. G., *Selected philosophical Essay*, éd. R. C. Jeffrey, Cambridge, UK, New York, Cambridge Univ. Press, 2000. — RESCHER N. éd., *Essays in Honor of Carl G. Hempel. A Tribute on the Occasion of his Sixty-Fifth Birthday*, Dordrecht, D. Reidel, 1969 (avec bibliogr. complète des écrits de Hempel, de 1934 à 1969). — SMILI R., *La spiegazione nel discorso storico. Il modello di Carl G. Hempel*, Bologne, Cooperativa Libreria Univ., 1981. — TEGTMEIER E., *Komparative Begriffe. Eine Kritik der Lehre von Carnap und Hempel*, Berlin, Duncker & Humblot, 1981. — WOLTERS G., « Pragmatischer Empirismus : In Memoriam Carl Gustav Hempel (1904-1997) », *Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie* 31 (2000), 205-242.

Anne-Françoise SCHMID

→ Induction.

HINTIKKA Jaakko, né en 1929

Philosophe finlandais, professeur à l'université d'Helsinki puis à l'Académie de Finlande, Hintikka est, depuis 1990, titulaire d'une chaire de philosophie à Boston University. Spécialiste de logique formelle, il se fait connaître dès 1955 en exposant la technique des formes normales distributives dans les calculs des prédicats avant d'analyser, à la manière des philosophes d'Oxford, les modes de pensée immanents à l'usage de la langue ordinaire. Constituée pour l'essentiel d'articles, son œuvre très diversifiée traite également de questions d'histoire de la philosophie, à travers des études audacieuses consacrées à Platon, Aristote, les Stoïciens, Descartes, Leibniz, Kant, Husserl et Russell, voire même à l'esthétique. Son apport majeur à la philosophie de la connaissance réside dans son intervention décisive dans l'important débat qui oppose les théoriciens de la logique modale à ses détracteurs dont Quine apparaît comme le chef de file.

L'originalité de la philosophie d'Hintikka, qu'on peut globalement caractériser comme une théorie de la constitution des divers types d'objets, réside autant dans ses méthodes que dans les liens qu'elle instaure entre des problèmes maintenus jusqu'à elle disjoints.

● Éditeur de la revue *Synthese* depuis 1965. — *Knowledge and Belief*, Ithaca/Londres, 1962. — *Models for Modalities*, Dordrecht, 1962. — *Time and Necessity: studies in Aristotle's theory of Modality Logic, Language-Games and Information*, Oxford, 1973. — *Knowledge and the Known. Historical Perspective in Epistemology*, Dordrecht, 1974. — *The intentions of Intentionality and other new models for modalities*, Dordrecht, 1975. — *L'intentionnalité et les mondes possibles*, PUF, 1989. — *The principles of Mathematics Revisited*, Cambridge Univ. Press, 1996. — HINTIKKA J. & REMES U., *The method of*

Analysis, Dordrecht, 1974. — HINTIKKA J., REMES U. & KNUUTILA S., *Aristotle on Modality and Determinism*, Amsterdam, 1976. — HINTIKKA J. & KULAS J., *The game of language*, Dordrecht, 1985. — HINTIKKA J. & HINTIKKA B., *Investigating Wittgenstein*, Oxford, 1986 (trad. fr., Bruxelles, Mardaga, 1991).

François BOITUZAT

→ Nécessité.

HOFFMANN Roald, né en 1937

Né à Zloczow (Ukraine, alors polonaise), prénommé Roald en hommage à Roald Amundsen, il vécut l'intolérable : en 1941, année où un pogrom tua le tiers des juifs de la ville (dont son grand-père), il fut déporté avec ses parents dans un camp. Sa mère Clara et lui furent sortis clandestinement du camp, puis cachés 15 mois durant par un Ukrainien compatisant. Son père, Hilel Safran, ingénieur civil, fut tué lors d'une tentative d'évasion. En juin 1944, à la libération par l'Armée Rouge, Clara et Roald étaient parmi les 150 survivants d'une population de 8 000 juifs. Un périple de cinq ans durant lequel un certain M. Hoffmann devint son père adoptif, aboutit à New York.

Après ses études secondaires (Stuyvesant High School), il entra à Columbia (B.A., 1958), puis à Harvard (M.A., 1960 ; Ph.D., 1962). *Junior Fellow* à Harvard, attiré aussi par une carrière d'historien de l'art, il commença une collaboration avec le chimiste William N. Lipscomb particulièrement fructueuse puisqu'elle lui permit d'ouvrir une nouvelle voie en chimie quantique, par extension de la théorie de Hückel. Puis s'engagea une autre collaboration, tout aussi féconde, avec Robert B. Woodward, pionnier de la synthèse des grandes substances naturelles, qui aboutit aux règles de sélection dites de Woodward-Hoffmann, applicables à une vaste classe de réactions chimiques. Cette découverte, l'une des plus grandes en chimie au XX^e s., valut au professeur Hoffmann de partager avec Fukui Kenichi le prix Nobel de chimie en 1981.

C'est un esprit rationnel, émerveillé par la beauté des formes, qui cherche des analogies profondes entre des structures très diverses. Le recours au calcul théorique est un moyen, jamais une fin, d'accès aux aspects prédominants. Homme de dialogue entre cultures et entre spécialités scientifiques, « circulateur » de concepts et polyglotte, poète et grand communicateur, bienveillant et généreux, c'est l'un des grands esprits de notre temps.

● « Building bridges between inorganic and organic chemistry » (1981). *Les Prix Nobel*, Stockholm, Almqvist & Wiksell, 1982. — « How chemistry and physics meet in the solid state », *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 26, 1987, p. 846-878. — HOFFMANN R. & WOODWARD R., *The Conservation of Orbital Symmetry*, Weinheim/New York, Verlag Chemie/Academic Press, 1970.

Pierre LASZLO

→ Synthèse.

HUME David, 1711-1776

Fils d'une famille de petite noblesse écossaise, Hume entre à 11 ans au collège d'Édimbourg où il reçoit une solide formation humaniste et s'initie à la philosophie naturelle de Newton. À 23 ans, se rendant en France après s'être essayé au commerce, il entreprend la rédaction du *Traité de la nature humaine* qui affiche l'ambition « d'introduire les méthodes expérimentales de raisonnement dans les sujets moraux ». De retour à Londres, il fait paraître sans nom d'auteur les livres I et II du *Traité* (1739), ouvrage qui tombe « mort-né de la presse ».

Après avoir cherché en vain à susciter l'attention des lecteurs avec la publication anonyme de son *Abrégé* (1740), il change de registre et, commençant à livrer le *Traité* en pièces détachées, s'oriente vers des essais ou des enquêtes qui ne cesseront de s'enrichir. Ainsi la publication du livre III du *Traité* (1740) précède celle des *Essais moraux et politiques* (1741) dont le succès conduit Hume à se présenter à la chaire de Morale de l'université d'Édimbourg. Accusé de scepticisme, il en est écarté et devient le secrétaire du général Saint-Clair puis son maréchal de camp durant une mission diplomatique sur le continent. En 1748, Hume sort définitivement de l'anonymat pour faire paraître cette version remaniée du livre I et du début du livre II du *Traité* que sont les *Essais philosophiques sur l'entendement humain*. De retour en Angleterre, il publie une *Enquête sur les Principes de la morale* (1751), refonte du livre III du *Traité*, puis les *Discours politiques* (1752) qui rencontrent immédiatement un grand écho. Suite à une cabale des dévots, la chaire de l'université de Glasgow lui est refusée en 1751 ; mais il trouve enfin une situation stable de conservateur de la bibliothèque de l'Ordre des avocats d'Édimbourg et se consacre à une impressionnante *Histoire d'Angleterre* dont six volumes sont publiés de 1754 à 1762. Simultanément, il fait paraître en 1757 ses *Quatre dissertations*.

S'ouvre alors une carrière mondaine et politique. En 1763, alors que les traductions de ses œuvres sont accueillies avec enthousiasme par les Encyclopédistes français, Hume se voit offrir un poste de secrétaire de l'ambassade d'Angleterre en France avant d'être nommé sous-secrétaire d'État en 1767. Aux échecs universitaires succède la réussite en politique. Entre-temps, il s'occupe de Rousseau avant de se quereller bien vite avec lui.

En 1769, de retour à Édimbourg, jouissant de l'aisance matérielle et de la gloire littéraire, il fréquente les Lumières de l'Athènes du Nord : Ferguson, Adam Smith, lord Kames, John Millar. Peu avant de mourir d'une tumeur intestinale, il rédige une brève autobiographie, *My own life*, afin de témoigner de l'honnêteté de sa vie de philosophe et achève la rédaction, commencée en 1751, de ce couronnement de scepticisme tempéré que sont les *Dialogues sur la religion naturelle* dont il confie la publication posthume à son neveu.

● *The Philosophical Works of David Hume*, éd. T.H. Green & T.H. Grose, Londres, 4 t., 1874-1875 (repr., Darmstadt, Scientia Verlag Aalen, 1964).

► CLÉRO J.-P., *La philosophie des passions chez D. Hume*, Paris, Klincksieck, 1985. — DELEULE D., *Hume et la naissance du libéralisme économique*, Paris, Aubier, 1979. — DELEUZE G., *Empirisme et subjectivité*, Paris, PUF, 1953. — MALHERBE M., *La philosophie empirique de D. Hume*, Paris, Vrin, 1976.

François BOITUZAT

→ Empirisme ; Induction ; Méthode ; Reproductibilité.

HUSSERL Edmund, 1859-1938

Mathématicien de formation, Husserl est l'initiateur d'un des mouvements philosophiques fondamentaux du XX^e s. : la phénoménologie. Élève de Franz Brentano, il se détache de son influence, en rompant avec le « psychologisme », c'est-à-dire avec la prétention de fonder les vérités logiques ou mathématiques sur des processus psychiques. Il invente alors (dans les *Recherches logiques*, 1900-1901) la phénoménologie, qui décrit le mode de donnée de telles vérités sans le déterminer métaphysiquement. L'évolution de sa pensée le conduira pourtant (dans les *Idées directrices*, 1913) à réintroduire au principe de la phénoménalité une subjectivité constitutive, mais cette fois transcendentale déterminée. Il orientera la phénoménologie vers une forme d'idéalisme moderne (cf. les *Méditations cartésiennes*, 1931), par rapport auquel ses nombreux élèves s'inscriront généralement en faux. Les dernières années de sa vie sont assombries par l'influence croissante de son disciple dissident Heidegger et par la montée du nazisme. Il exprime sa préoccupation, ainsi que sa fidélité à la cause de la théorie, dans *La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale* (1937).

► BACHELARD S., *La logique de Husserl*, Paris, PUF, 1957. — BENOIST J., *Phénoménologie, sémantique, ontologie. Husserl et la tradition logique autrichienne*, Paris, PUF, 1997. — BRISART R. éd., *Mathématiques, formes et processus signifiants chez Husserl*, Bruxelles, 1998.

Jocelyn BENOIST

→ A priori ; Continuité ; Donné ; Géocentrisme ; Géométries ; Intentionnalité ; Phénoménologie ; Scientisme ; Transcendantal ; Vision.

HUXLEY Thomas Henry, 1825-1895

Avocat du darwinisme, traducteur d'Ernst von Baer, pourfendeur du cléricisme, inventeur de l'agnosticisme (1869), réformateur de l'enseignement, champion de la professionnalisation de l'activité scientifique, conférencier et écrivain féconds, patriarche d'une lignée d'intellectuels prestigieux, Huxley affirma une conception réaliste et rationnelle de la nature et de ses lois, avec clarté, esprit de synthèse et

ténacité. Mais derrière la figure emblématique de la science victorienne, quelle valeur renferme l'œuvre du zoologiste ?

Autodidacte boulimique, il accumule une vaste culture (y compris le latin, le français et l'allemand) qui resurgit dans ses écrits pédagogiques ou polémiques. Il est attiré par la profession d'ingénieur mais opte pour des études de médecine à Londres (*M.B.* en 1845) puis le service médical de la Marine. Le hasard lui accorde le poste de chirurgien sur le H.M.S. *Rattlesnake* qui entreprend une vaste expédition au nord de l'Australie. Comme pour Darwin ou Joseph Hooker, ce long voyage (1846-1850) constitue la vraie formation d'Huxley : stricte discipline de travail, conditions de vie spartiates, obligation de résultats, immersion permanente et prolongée dans les sciences naturelles. Là, il devient anatomiste et physiologiste des invertébrés marins. Ses premiers articles sur les méduses et les mollusques céphalopodes clarifient leurs affinités respectives à l'aide des analogies embryologiques ; en disséquant ses spécimens, il cherche l'archétype, non pas un idéal platonicien mais une forme incorporant les traits les plus généraux du groupe.

L'Amirauté refuse de lui verser des appointements de naturaliste mais Huxley obtient un poste après avoir publié une démolition du transformisme théiste des *Vestiges of the natural history* (publié anonymement en 1844, l'ouvrage de Chambers connu un grand succès polémique et plusieurs rééditions). Cet éreintement tardif est fondé sur le concept cuviériste des embranchements et un rejet du progressivisme en paléontologie. Ses nouvelles fonctions à l'école des Mines et au relevé géologique l'obligent à s'occuper des vertébrés fossiles. Il discute alors la théorie vertébrale du crâne, défendue par Goethe, Oken et Owen, en affirmant le primat de l'embryologie comparative en morphologie. Pour Darwin, Huxley apparaît comme un brillant zoologiste qui utilise le critère embryogénique afin de retracer les affinités entre formes vivantes. Il le choisit comme interlocuteur principal pour toutes les questions zoologiques (Hooker joue ce rôle pour la botanique depuis 1844) et le convertit à l'évolution par sélection naturelle vers 1857-1858.

Huxley doit sa réputation de débattre à son affrontement avec l'évêque Wilberforce lors de la réunion de l'Association britannique des sciences à Oxford (1860). Il polémiqua aussi avec Richard Owen sur l'anatomie comparée des grands singes et de l'homme et démolit les arguments fondés sur l'*hippocampus minor* (1861-1863). Huxley se nomma lui-même « le bulldog de Darwin » dont il fut le porte-parole même aux États-Unis (1876). En critiquant les pouvoirs établis et en faisant des conférences aux ouvriers, il entretenait le radicalisme latent qui attendait de la science une réponse aux maux sociaux. Mais tout en considérant la sélection naturelle comme le mécanisme le plus probable de l'évolution, il formulait deux réserves : il manquait une preuve matérielle ou expérimentale de la spéciation ; la paléontologie ne confirmait pas le gradualisme. Corrigeant ce dernier point il

démontra à partir de 1870 la progression des fossiles dans une même famille et retraça la série évolutive des Équidés. En 1860 Darwin doutait de sa compréhension de la sélection naturelle, puis l'accepta en tant que bouclier et épée endossant les polémiques.

Huxley aurait été peu écouté comme propagandiste de l'évolution s'il n'avait démontré des compétences de naturaliste. Ses études spécialisées sur de vastes groupes de vertébrés (poissons du Dévonien, reptiles du Mésozoïque, oiseaux fossiles et vivants) en redessinent l'arrangement taxonomique et le développement embryologique ; elles resteront longtemps des références. En outre, ses synthèses pédagogiques conquièrent tous les publics. Grâce à son activisme politico-scientifique et au relais constitué par le X-Club (à partir de 1864), réseau de neuf intellectuels modernisateurs et évolutionnistes dont Hooker, Tyndall, Lubbock et Spencer, il réussit en quelques années à contrôler les principales institutions scientifiques britanniques.

On porte sur Huxley un jugement ambivalent : ici on admire son courage intellectuel dans la formulation d'hypothèses théoriques, le rejet des autorités et la critique des idoles de la tribu, sans rien abdiquer de la rationalité savante et de la compétence technique ; là on constate qu'il imposa avec l'appui des notables bourgeois une nouvelle cléricature scientifique, des réformes éducatives trop limitées, qu'il usa des artifices de la rhétorique et du pouvoir médiatique pour imposer ses vues. Aux nombreuses études hagiographiques (dès 1896) a succédé une ère du soupçon qui en fait l'emblème de la prise du pouvoir des experts qui ne remettent en cause ni la hiérarchie sociale ni le postulat de soumission à une élite.

● *Evidence as to man's place in nature*, Londres, 1863. — *Collected essays*, Londres, 9 vol., 1893-1894 (repr. Hildesheim, Georg Olms, 1970). — Entre 1868 et 1911, 15 essais ou recueils de Huxley ont été traduits en français. — *The scientific memoirs of T.H. Huxley*, éd. M. Foster & E.R. Lankester, Londres, Macmillan, 4 vol., 1900 (repr. Farnborough, Gregg International, 1969).

► Dawson W.R., *The Huxley papers...*, Londres, 1946. — Desmond Ad., *Huxley : the devil's disciple*, Londres, Michaël Joseph, 2 vol., 1994, 1997. — Di Gregorio M., *Huxley's place in natural science*, New Haven, Yale Univ. Press, 1984. — Jensen J.V., *Huxley communicating for science*, Newark, Univ. of Delaware Press, 1991. — Paradis J., *Huxley : man's place in nature*, Lincoln, Univ. of Nebraska Press, 1978. — Pngree J., *Huxley : a list of his scientific notebooks...*, Londres, Imperial College, 1968.

Gérard MOLINA

→ Actualisme ou uniformitarisme ; Darwinisme ; Développement ; Embryogenèse ; Évolutionnisme ; Génération spontanée.

HYBRIDE BIOLOGIE

On désigne par hybride l'animal ou le végétal produit par deux parents ayant des différences génétiques (héréditaires) dans leurs caractères biologiques de race

(appartenance à la même espèce) ou d'espèce. D'une façon plus spécifique, sans pour autant être la règle, on emploie le terme hybride pour désigner le produit de deux espèces (hybridation), et celui de métis pour nommer le produit de deux races (métissage). Nous rencontrons dans l'histoire des sciences de la vie des usages et des définitions du terme hybride que nous pouvons évoquer dans quatre domaines qui ont marqué des étapes de la biologie : la tératologie fabuleuse, la définition de l'espèce, l'étude de la transmission des caractères héréditaires (génétique) et l'embryologie.

La tératologie fabuleuse, qui correspond à cette période de l'histoire des monstres depuis que l'homme a laissé des traces gravées sur ces êtres marginalisés jusqu'à la fin du XVII^e s., nous offre de nombreux exemples d'êtres composites, formés de deux natures, moitié animale-moitié humaine ou de deux moitiés animales différentes. Ces créatures jugées contre nature n'étaient pas toutefois sans explication pour le philosophe ou le médecin qui en faisaient la description. D'abord ces chimères, « enfant demi-chien », « monstre demi-homme et demi-pourceau » ou « monstre chien ayant la tête semblable à une volaille » que cite Ambroise Paré (1509-1590) avec d'autres auteurs du XVI^e s. dont il s'inspire, peuvent se comprendre par le mélange des semences. Quand un auteur adopte la théorie hippocratique du mélange des semences mâle et femelle dans la génération et qu'aucun obstacle ne s'oppose à croire qu'un enfant peut être « conçu et engendré d'une femme et d'un chien » nous comprenons l'utilisation par les auteurs anciens du concept d'hybride dans sa forme initiale contenu dans son origine grecque *hubris*, signifiant « union contre nature », « affront », « adultère » ou « viol ». À ce propos Georges Canguilhem écrit : « Il n'est pas douteux que l'Antiquité classique et le Moyen Âge n'aient considéré la monstruosité comme effet du monstreux. Le terme même d'hybride, en apparence si positif et descriptif, en fait foi dans son étymologie. Les produits animaux interspécifiques sont le résultat de croisement violant la règle d'endogamie, d'union sans observance de similitude. Or de l'hybridation à la monstruosité le passage est aisé » (*La connaissance de la vie*, Paris, Vrin, 1975, p. 174). Si la mythologie grecque fait naître le minotaure à la suite de l'union de Pasiphaé avec le taureau de Crète, Fortunio Liceti (1577-1656) évoque encore au XVII^e s. de nombreux exemples de bestialité comme étant à l'origine de non moins nombreuses formes chimériques monstrueuses (F. Liceti, *De Monstrorum natura, causis et differentiis*, 1616 ; 2^e éd., 1634). Liceti ne manque pas non plus de souligner que c'est dans les pays chauds que les actes de bestialité sont les plus courants : « Cette multitude de monstres résultant du congrès de diverses espèces, l'homme compris, tous poussés à l'amour par la brûlante chaleur de l'air » (congrès signifiant ici « union sexuelle »). Lorsque deux « espèces » s'accouplent trois cas de figures peuvent se présenter : la semence du père domine celle de la mère et le produit sera identique au père ; le produit sera semblable à la

mère si c'est la semence de la mère qui domine ou le produit peut tenir des deux parents. Le monstre, homme dans sa partie supérieure et chien dans sa partie inférieure s'explique dans ce dernier cas. Mais une femme qui après avoir commis un acte de bestialité avec un chien a des rapports avec un homme peut donner naissance à un monstre double homme-chien : les deux produits s'étant développés dans une matrice trop étroite se sont collés l'un à l'autre. Dans cette période du tout possible chaque formation, tout étrange qu'elle puisse paraître dans ses formes monstrueuses hybrides, reçoit de la part de celui qui en fait la description une explication appartenant à une logique de pensée et de compréhension du monde vivant.

Nous devons à Buffon (1707-1788) d'avoir illustré pour le monde animal et l'homme une définition physiologique de l'espèce fondée sur la reproduction : « [...] il y aurait lieu de croire que le Nègre, le Lappon et le Blanc forment des espèces différentes, si d'un côté l'on était assuré qu'il n'y a eu qu'un seul Homme de créé, et de l'autre que ce Blanc, ce Lappon et ce Nègre, si dissemblants entr'eux, peuvent cependant s'unir ensemble et propager en commun la grande et unique famille de notre genre humain » (Buffon, *Histoire naturelle, générale et particulière...*, Paris, Imprimerie Royale, 1766, t. 14, p. 311). Pour Buffon le « barbet » et le lévrier, malgré leur grande différence, sont de la même espèce puisque ensemble ils peuvent produire des individus qui donneront une nouvelle descendance et ainsi de suite ; en revanche l'âne et le cheval qui se ressemblent ne sont pas de la même espèce car ils produisent ensemble des « individus viciés et inféconds » (1753). Ainsi pour Buffon « [...] on doit regarder comme la même espèce celle qui, au moyen de la copulation, se perpétue et conserve la similitude de cette espèce, et comme des espèces différentes celles qui, par les mêmes moyens, ne peuvent rien produire ensemble... » (Buffon, *op. cit.*, t. 2, 1749, p. 10). Buffon fera lui-même ou exécuter par d'autres des expériences « d'hybridation » pour justifier le bien-fondé de sa conception de l'espèce ou pour remonter aux souches originelles sauvages des animaux domestiques. Ainsi le sanglier, le cochon domestique et le cochon du Siam sont pour Buffon de la même espèce car ils produisent ensemble des descendance fécondes. Le sanglier est l'espèce souche et les cochons domestiques des variétés (dégénération de l'espèce) ; mais chez les cochons les « variétés de races » sont beaucoup moins nombreuses que chez le chien. L'hybridation de deux espèces produit un mulet qui se caractérise par son infécondité et le croisement de deux races produit un métis qui est fécond. Buffon se tient à ce discours jusque vers les 1764 quand, constatant que les mulets ne sont pas tous stériles, il emploie le terme de métis pour désigner les produits de l'hybridation de deux espèces dans la mesure où le terme mulet a perdu sa signification d'infécondité. Les hybrides, les mulets et les métis auront la même signification ; ainsi Julien-Joseph Virey (1775-1846) définit pour le *Nouveau Dictionnaire d'Histoire naturelle...* de Deterville les

termes « Métis ou Hybrides ; Les animaux, et même les végétaux d'espèces différentes, mais très-voisines par leur conformation, peuvent engendrer ensemble des individus mixtes, des métis ou mulets... » (t. 20, 1818). La défense de la théorie fixiste par Pierre Flourens (1794-1867) l'avait conduit à donner un sens strict et précis aux termes mulets et métis en se référant à la définition physiologique de l'espèce de Buffon et en se fondant sur les résultats de l'hybridation ou du croisement : « Je dis mulet et non métis : le mulet est le produit infécond de deux espèces distinctes ; le métis est le produit fécond de deux races d'une même espèce. On dit un mérinos métis ; on ne dirait pas un mérinos mulet. On dit un métis en parlant de l'homme, et non un mulet » (P. Flourens, *De l'instinct et de l'intelligence des Animaux*, Paris, Paulin, 1845, p. 120). Mais, en 1855 et 1856, Flourens ne se réfère plus à ses définitions de 1845 et fait de « métis » un synonyme de « mulet », et cela sans qu'il ait, pour autant, modifié ses opinions sur la fixité des espèces dont l'un des arguments majeurs était que le produit de deux espèces distinctes est sans avenir. Nous remarquons que le constat de cette synonymie dans la pensée de l'auteur peut apparaître comme un contresens par rapport aux concepts qu'il défendait. En 1855 Flourens écrit : « Lorsque deux espèces voisines s'unissent ensemble, il résulte de cette union un animal mi-parti des deux, un métis ou mulet » (*De la longévité humaine et de la quantité de vie sur le globe*, Paris, Garnier Frères, 2^e éd., 1855, p. 151). « Ainsi donc, ou les métis, nés de l'union de deux espèces distinctes, s'unissent entre eux, et ils sont bientôt stériles ; ou ils s'unissent à l'une des deux tiges primitives, et ils reviennent bientôt à cette tige : ils ne donnent, dans aucun cas, ce qu'on pourrait appeler une espèce nouvelle, c'est-à-dire une espèce intermédiaire durable » (*ibid.*, p. 152).

En 1860, Isidore Geoffroy Saint-Hilaire (1805-1861) a réfléchi sur les significations des termes « mulet », « métis » et « hybride ». Cet auteur s'en tient, pour désigner tout produit issu d'un croisement et dans un sens général, au terme de métis. Les métis sont pour lui des produits mixtes issus de deux parents non semblables. Puis il établit, parmi les métis, deux divisions : 1) les hybrides, qui correspondent aux produits issus de deux espèces pouvant être de même genre ou de genres différents et 2) les métis, qui correspondent aux produits issus de deux races ou variétés d'une même espèce. Mais comme le terme métis a aussi un emploi général, I. Geoffroy Saint-Hilaire ajoute à ce terme un qualificatif : métis homoïde (c'est-à-dire métis de même espèce) (*Histoire naturelle générale des règnes organiques principalement chez l'homme et les animaux*, Paris, Masson, t. 3, p. 138-140). Quant au terme mulet, I. Geoffroy Saint-Hilaire note que si ce mot se rapporte à tous les animaux d'origine mixte et infécond, il s'est appliqué aussi à définir des individus inféconds (neutres des abeilles) et que la signification qui a été donnée à « mulet » s'est particulièrement rapportée à l'infécondité : « Mulet, à moins de s'élever contre l'usage, et par là même de tomber dans de

graves inconvénients depuis longtemps signalés par Buffon, doit donc se dire, non de tous les êtres d'origine mixte, mais de ceux de ces êtres "qui n'engendrent point". Définition qui est aussi bien celle de l'Académie Française, que de la plupart des naturalistes. » C'est en perdant leur signification taxinomique que les termes « mulet » et « métis » ont pu se généraliser et tomber en synonymie avec « hybride ». Seule la faculté à la reproduction sera retenue et conduira vers une division, ou plus exactement une classification des hybrides en les qualifiant suivant le degré de fécondité des espèces et de leurs hybrides. Ainsi, en s'appuyant sur le seul critère de l'infécondité ou de la fécondité des hybrides, Paul Broca (1824-1888) établissait quatre divisions : « 1) Hybridité agénésique. — Métis de premier sang tout à fait inféconds soit entre eux, soit avec les deux espèces mères... 2) Hybridité dysgénésique. — Métis de premier sang presque entièrement stériles... 3) Hybridité paragénésique. — Métis de premier sang possédant une fécondité partielle... 4) Hybridité eugénésique. — Métis de premier sang tout à fait féconds... » (*Recherches sur l'hybridité animale en général et sur l'hybridité humaine en particulier considérées dans leurs rapports avec la question de la pluralité des espèces humaines*, Paris, J. Claye, 1860, p. 536).

La ressemblance des enfants aux parents et la transmission d'un caractère anatomique particulier sur plusieurs générations (famille à doigts surnuméraires par exemple) ont été l'objet d'interrogations et d'interprétations depuis les médecins grecs jusqu'aux naturalistes, physiologistes, biologistes et généticiens du XX^e s. C'est dans ses célèbres « Recherches sur des hybrides végétaux » (1866) que Johann (Gregor) Mendel (1822-1884) met en évidence par la pratique de l'hybridation et de l'étude des hybrides une loi mathématique de l'expression de certains caractères dominants et dominés concernant la couleur des fleurs et la forme des graines chez le pois. Les lois de Mendel ou lois de l'hybridité n'ont pas été remarquées à son époque et furent en fait « découvertes » simultanément en 1900 par Hugo De Vries (1848-1935), Carl Correns (1864-1933) et Erich Tschermak (1871-1962). Cela signifie que dans ce début du XX^e s. un grand intérêt était porté à la transmission de certains caractères héréditaires à la descendance. D'abord les praticiens de l'horticulture, de l'arboriculture, de l'agriculture et de l'élevage avaient une connaissance de la technique de l'hybridation dans le but d'améliorer des plantes et des animaux pour une meilleure production alimentaire ou pour flatter un goût esthétique. Ensuite des scientifiques s'intéressaient aux aspects théoriques que l'on devait tirer des résultats des pratiques de l'hybridation. C'est à l'initiative de sociétés d'horticulture d'une part et du biologiste William Bateson (1861-1926) d'autre part que vont se mettre en place des « Conférences internationales d'hybridations des plantes » dans lesquelles praticiens professionnels et scientifiques vont se rencontrer et s'informer de leurs résultats et de leurs réflexions. Ces

« Conférences » débutent en Angleterre en 1899, New York en 1902, et de nouveau Londres en 1906. Cette dernière est capitale dans l'histoire de la biologie puisque, débutant avec le titre de « Conférence internationale d'hybridation des plantes », elle s'achève avec celui de « Conférence internationale de génétique ». C'est lors de cette troisième conférence dédiée à Mendel que W. Bateson propose d'appeler cette science nouvelle objet des préoccupations des congressistes, la génétique : « [...] je propose le terme "génétique", il indique suffisamment que nous cherchons à élucider les phénomènes de l'hérédité et de la variation : en d'autres termes c'est la physiologie de la descendance ». C'est de la collaboration entre les « praticiens » et les « hommes de science pure » et autour des résultats et des problèmes posés par l'hybridation et les hybrides qu'est née la génétique en 1906. La quatrième Conférence internationale de génétique eut lieu à Paris en 1911 et Philippe L. de Vilmorin en fut l'organisateur. La génétique était lancée et allait devenir « la science du XX^e s. ».

L'hybridisme, ou plus exactement le « faux hybridisme » ou « fécondation hétérogène », a joué un rôle pour les embryologistes dans l'étude de la fécondation. Oscar et Richard Hertwig ont ouvert un champ de recherches particulièrement riche avec leurs travaux sur l'hybridation entre deux genres d'oursins (*Experimentelle Untersuchungen über die Bedingungen der Bastardbefruchtung*, Iéna, 1885). Ces expériences transposées aux œufs de batraciens ont conduit Eugène Bataillon (1864-1953) à réussir la parthénogénèse expérimentale chez la grenouille et à élaborer une théorie de la fécondation. Observant sur une coupe histologique un œuf de crapaud (*Bufo calamita*) imprégné de spermatozoïdes de triton (*triturus alpestris*) il conçut que dans la fécondation le premier effet du spermatozoïde est mécanique et active l'œuf, ensuite le noyau spermatique conduit à une régulation de l'œuf dans ses divisions harmonieuses. Bataillon réussit

expérimentalement la parthénogénèse traumatique en piquant des œufs vierges de grenouilles avec un fin stylet en verre (20 à 30 µ d'épaisseur à la pointe) et en introduisant avec la piqûre une cellule nucléée (1910-1911). La pratique du « faux-hybridisme » a été largement utilisée pour les recherches de gynogénèse (activation d'un ovule par un spermatozoïde dont le noyau ne peut se fusionner au noyau ovulaire en raison de l'éloignement spécifique et générique : par exemple, fécondation d'un ovule de rainette avec du sperme de triton). Cette méthode a permis en particulier à Jean Rostand (1894-1977) non seulement de poursuivre l'analyse de la théorie de la fécondation énoncée par Bataillon, mais aussi de créer une génétique des amphibiens. Dans la gynogénèse seuls les gènes femelles s'expriment permettent l'expression de gènes récessifs porteurs d'anomalies qui auraient pu être inhibés par des gènes dominants apportés par les chromosomes spermatiques. Les embryologistes ont aussi produit par la technique des greffes des animaux chimères (poule-caille), mais ici il ne s'agit pas d'hybrides mais de structures ou d'individus mosaïques.

► FISCHER J.-L., *Monstres, histoire du corps et de ses défauts*, Paris, Syros-Alternative, 1991. — FISCHER J.-L. & SCHNEIDER W.H. éd., *Histoire de la génétique*, Paris, ARPEM et Sciences et Situation, 1992. — LENAY C., *La découverte des lois de l'hérédité (1862-1900), une anthologie*, Paris, Press Pocket, 1990. — PAPADOGEORGI P., « L'ambiguïté de la notion d'hybride et l'obstacle de l'utilité », *Aster*, 1995, n° 21, p. 161-180. — ROGER J., *Buffon un philosophe au Jardin du Roi*, Paris, Fayard, 1989. — ROSTAND J., *La parthénogénèse animale*, Paris, PUF, 1950.

Jean-Louis FISCHER

→ Buffon ; Gène ; Mendel ; Monstre ; Vivant (Théorie du).

HYPOTHÈSE → Conjecture ; Dédution ; Induction ; Méthode ; Thémata

I - J - K

IDÉALISME

Il existe une acception ordinaire du terme « idéalisme », un sens accrédité par l'opinion, qui tend à désigner une manière de subordonner la réalité aux rêves de notre imagination, voire à un idéal (un type parfait, un modèle). Mais, bornons plutôt, ici, l'usage du terme « idéalisme » à la disposition épistémologique suivante : une orientation de la pensée vers la vérité, qui s'enracine dans un primat (logique, causal et temporel) de la pensée sur la matière.

En 1949, dans le *Rationalisme appliqué*, G. Bachelard (1884-1962) remarque que le couple idéalisme/réalisme n'aurait plus de rôle à jouer dans l'épistémologie contemporaine. Néanmoins, il ajoute aussitôt qu'il a joué, jusqu'alors, un rôle essentiel dans le développement des théories classiques de la connaissance. En somme, pour s'en tenir à lui, l'idéalisme – cette philosophie qui ramène toute réalité à la seule réalité de la pensée – figure à juste titre dans ce dictionnaire, si l'on examine les éléments qui le portent à se donner pour une conception philosophique de la connaissance scientifique. Il contribue à définir une interprétation de l'acte de connaissance, selon laquelle connaître consiste à appréhender ces seules réalités mentales. D'ailleurs, si le nom commun « idéalisme » a été introduit, dans la langue philosophique allemande, vers le début du XVIII^e s., par G.W. Leibniz (1646-1715) notamment (*Répliques aux réflexions de Bayle*, 1702), puis diffusé en France par Madame de Staël (*De l'Allemagne*, 1810), il s'est d'emblée imposé pour désigner essentiellement la manière platonicienne de poser le problème de la connaissance, laquelle prétend montrer comment le connaître atteint l'Idée (*eidos*), la Forme en soi, qui est l'être même de la chose. Dans la version imposée par Leibniz, ce substantif doit une partie de sa signification à son opposition à « matérialisme », terme utilisé cette fois à l'égard d'Épicure et qui, de son côté, désigne une interprétation de la connaissance attribuant à celle-ci la capacité d'abstraire la vérité d'une réalité matérielle. Ajoutons, cependant, que le XIX^e s. amende ces usages et oppose de préférence « idéalisme » à « réalisme », tandis que « matérialisme » est désormais opposé plus exactement à « spiritualisme » (doctrine qui admet un principe spirituel à côté de la matière).

Il faut maintenant essayer de justifier la pertinence de l'idéalisme par rapport aux sciences que cette

disposition interprète. Le problème que souhaite résoudre l'idéalisme est celui du pouvoir ontologique des idées. Quelles que soient ses figures, il s'ancre dans une présupposition constante : faire valoir la seule puissance de l'esprit dans l'édification de la vérité. Pour l'époque moderne, il est mis en œuvre par l'évêque irlandais G. Berkeley (1684-1754). Il prend le nom d'« immatéalisme ». Les *Trois Dialogues entre Hylas et Philonous* (1713) décrivent une vive polémique entre l'ami de la matière et l'ami de l'esprit. Objectif visé : produire une interprétation chrétienne de l'expérience actuelle de la connaissance scientifique. Tout en affichant son refus des idées innées, Berkeley demeure pris dans la révolution cartésienne du sujet de la vérité. Dès lors, l'immatéalisme consiste à se situer d'emblée dans la totalité de l'esprit, et à nier la relation entre l'esprit et un être extérieur. Toute la réalité est enfermée dans le percevoir. Évidemment, Berkeley prend le risque de proposer une image fictive de la connaissance scientifique. Celle-ci devient une simple expérience perceptive difficile à distinguer de la connaissance ordinaire. La science définit, toutefois, une grammaire de la nature, autorisant l'homme à prévoir le déroulement des phénomènes et à régler sa conduite selon ce dernier.

Lorsque E. Kant (1724-1804) décide de prendre au sérieux le champ spécifique de l'expérimentation, il impose à l'idéalisme deux modifications successives. D'une part, il le plie à l'obligation de prendre en compte la réceptivité à l'égard de la matière de l'expérience. Les catégories grâce auxquelles se construit le phénomène scientifique demeurent vides si aucune intuition sensible ne les remplit. D'autre part, il reclasse de façon décisive les auteurs concernés par l'idéalisme, à partir de ce critère. Dans la *Critique de la raison pure* (1781), il nomme son propre idéalisme un idéalisme « transcendantal » parce qu'il soutient que notre connaissance ne saisit que des phénomènes et non des choses en soi. Il le distingue d'abord de l'idéalisme « problématique » (l'existence des objets en dehors de nous est douteuse) de R. Descartes, mis en question dans un célèbre passage intitulé *Réfutation de l'idéalisme*. Et de l'idéalisme « dogmatique » (les choses dans l'espace sont de simples fictions), expression qu'il applique à Berkeley, en s'inspirant d'un article d'un auteur moins célèbre (Ch. Garve).

Mais, dans son rapport à l'histoire des sciences,

l'idéalisme ne s'en arrête pas là. De nombreuses controverses internes amènent encore F.W.J. Schelling (1775-1854) à appeler J.G. Fichte (1762-1814) un idéaliste « subjectif » et à nommer sa philosophie idéalisme « objectif », tandis que G.W.F. Hegel (1770-1831) construit un idéalisme « spéculatif ». À dire vrai, les nuances, qui se multiplient encore avec l'idéalisme critique de L. Brunschwig (1869-1944), et quelques autres, s'établissent à chaque fois en fonction d'un état de la recherche scientifique. Ce qui prouve, à l'évidence, que l'idéalisme ne renvoie pas à une catégorie fermée. Il n'est pas un. Au contraire, les principes de son discours une fois établis, il se perpétue en se déplaçant sans cesse grâce à des concepts dont l'origine métaphorique ne fait pas de doute. En prenant les « lumières de l'esprit » pour fondement de la connaissance, l'idéalisme s'offre les moyens de privilégier l'entendement et de constituer des couples fondamentaux dont les valeurs peuvent être réajustées au fil des remaniements nécessaires : sensible/intelligible, réel/idée.

En dernier lieu, Bachelard, du point de vue du Nouvel Esprit scientifique dénonce l'impuissance de l'idéalisme classique à constituer un rationalisme actif de type moderne, susceptible d'informer les connaissances à partir des nouvelles régions de l'expérience. Il réfute un idéalisme qui perd toute possibilité de rendre compte de la pensée scientifique moderne. Il revient donc encore une fois sur la nécessité, pourtant déjà imposée par Kant, de ne jamais négliger ni l'existence phénoménale du monde ni le travail des hommes qui engendrent les techniques dont le savant se sert. En somme, soutenir l'idéalisme oblige à le corriger sans cesse.

► ALTHUSSER L., *Philosophie et philosophie spontanée des savants*, Paris, Maspero, 1974. — BACHELARD G., *Le Rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949. — BLANCHÉ R., *Les attitudes idéalistes*, Paris, PUF, 1949. — CHOLLET M., *La Tyrannie de la réalité*, Paris, Calmann-Lévy, 2004. — COLLIN D., *La matière et l'esprit*, Paris, Armand Colin, 2004. — CURNOT A.A., *Matérialisme, vitalisme, rationalisme* (1873), Paris, Vrin, 1979. — DELEUZE G., *Différence et Répétition*, Paris, PUF, 1969. — DIDEROT D., *Lettre sur les aveugles* (1749), Paris, GF, 1972. — ENGELS F., *Ludwig Feuerbach et la fin de la philosophie classique allemande* (1888), Paris, Éd. Sociales, 1966. — HEGEL G.W.F., *Leçons sur l'Histoire de la philosophie* (1825), Paris, Vrin, t. 6, 1985. — KANT E., *Critique de la Raison Pure, Réfutation de l'idéalisme* (1781), Paris, PUF, 1984. — POLTZER G., *Principes élémentaires de philosophie*, Paris, Éd. Sociales, 1975.

Christian RUBY

→ Bachelard ; Berkeley ; Brunschwig ; Concept ; Criticisme ; Empiréomnisme ; Immatérialisme ; Kant ; Leibniz ; Réalisme.

IDONÉISME

C'est à partir de l'adjectif idoïne (en latin *idoneus* = qui convient) que Ferdinand Gonseth a formé le mot idonéisme pour caractériser sa philosophie. Ce choix présentait l'avantage de frapper l'imagination ; mais il

manifestait l'inconvénient de laisser entendre que cette philosophie proposait un système. Est-ce la raison pour laquelle Gonseth, tout en restant fidèle au principe d'idonéité, se mit à défendre l'idée d'une philosophie ouverte ? D'ailleurs, pour comprendre le sens que l'idonéisme donne à l'adjectif idoïne, il est nécessaire de souligner que la philosophie gonsethienne a pris son essor à partir d'une réflexion consacrée à la crise des fondements des mathématiques (cf. l'ouvrage de 1926).

À certains égards, Gonseth parvenait alors pour des raisons épistémologiques à des conclusions concernant les mathématiques assez analogues à celles que l'on peut tirer des théorèmes de limitation des formalismes (Gödel, Skolem, Gentzen...) : le statut de sécurité des mathématiques n'a plus le profil que lui connaissaient les philosophes jusqu'à l'aube du XX^e s. Dès lors, quel barrage peut-on faire valoir pour ne pas être submergé par le relativisme, voire le scepticisme ? C'est avec cette question que Gonseth aborde la rédaction de son ouvrage : *Les mathématiques et la réalité*. Il est à la recherche, dit-il, d'une *Théorie de l'adéquation du rationnel au réel* dans le sens à la fois fort et faible que ce mot prend dans les sciences physiques ; il lui donne un nom : l'idonéisme. Pour prêter vie à sa démarche, Gonseth met en scène à trois reprises et en des pages essentielles les interlocuteurs que voici : Sceptique, Parfait et Idoïne. Au terme de son livre, il demande à Sceptique de ne plus recourir à des faits irréductibles et à Parfait de renoncer à l'idée de l'existence de vérités absolues. Et Idoïne ? Nul ne peut l'être si, après avoir dialogué avec Sceptique et Parfait, il n'accepte de devenir un Nouvel Idoïne ; il sait encore être Sceptique en face des faits et Parfait en face des idées. Dans son ouvrage *Qu'est-ce que la logique ?* Gonseth a l'occasion de revenir au problème de l'adéquation du rationnel au réel. Il le fait porter sur toute la connaissance. Qu'est-elle sinon un accord schématique entre un Réel inachevé et un Esprit en devenir ? C'est dire que, dans sa quête de connaissance, l'homme ne peut pas avoir recours à l'idéal de la vérité en soi ou à l'idéal de la réalité en soi. Ainsi, selon Gonseth, il y a crise de la connaissance en ce sens qu'il y a crise des fondements. Pour lui, le problème face aux attaques du scepticisme se dénoue si l'on veut bien considérer l'évolution de la connaissance non comme la construction d'un gratte-ciel, où les générations successives empiètent étage sur étage, mais comme le développement d'un arbre : au fur et à mesure que celui-ci grandit, il retouche son réseau de racines.

Puisqu'il en est ainsi, le chercheur en quête de vérité est amené, en situation, à appliquer le principe d'idonéité, c'est-à-dire à se mettre à la recherche de ce qui convient le mieux à tel moment précis. Gonseth, dans *La géométrie et le problème de l'espace*, propose la règle de gouvernement qu'il attribue à un Grand Calife : « Par mesure idoïne, j'édicte le décret idoïne qui suit. Si tu ne connais le vrai, l'idoïne il te faut chercher » (p. 64). Ici se pose une question : le chercheur est-il sans repères pour accéder à l'idoïne ? Et Gonseth

de proposer ce qu'il appelle une méthodologie ouverte. Mais dans quel sens la considèrera-t-on comme ouverte ? En ce sens qu'elle met en évidence une démarche (procédure des quatre phases) et un organon de principes (révisibilité, technicité, structualité, solidarité, sauvegarde de l'acquis) qui n'introduisent aucune contrainte et ne font que concéder en droit à la recherche des libertés dont celle-ci jouit en fait. La procédure des quatre phases ne se présente pas comme un modèle à appliquer scrupuleusement, mais comme un schéma que l'on a le droit d'interpréter avec toute la souplesse requise. C'est ainsi que le maître d'œuvre en situation a recours à des entrelacs, parfois subtils, de saisies énonciatrices et de saisies expérimentales. En première phase, celle de l'émergence du problème, le chercheur participe à une constellation d'éléments rudimentaires de départ, à laquelle les modalités informationnelles de l'incomplétude, du schématisme et de l'éventuelle révisibilité sont étroitement liées. La deuxième phase comporte la mise en forme d'une hypothèse ou d'une gerbe d'hypothèses favorisant la solution du problème ; en effet, la recherche implique qu'on fasse apparaître des éléments nouveaux qui ne s'intègrent pas d'eux-mêmes à la situation de départ. La procédure, en troisième phase, se poursuit par la mise à l'épreuve des éléments de la phase précédente en des contextes où les saisies expérimentales doivent témoigner ou bien d'une simple situation observationnelle, ou bien de dispositifs expérimentaux très complexes. Enfin, en quatrième phase, celle du retour à la situation de départ, le chercheur est amené à prendre la mesure de son travail ; soit il n'a pas abouti et il convient de mettre en œuvre un second cycle, soit il permet de conclure sans que doivent être réorganisés les éléments de connaissance qui s'imposaient au moment de l'émergence du problème, soit encore il réclame une révision des notions mises en cause, qui peut impliquer une véritable mutation de l'élémentaire. Or, pour mener la procédure des quatre phases, le chercheur doit souvent manifester des qualités d'invention que le schéma proposé ne lui suggère pas ; il est guidé généralement dans sa recherche par des références explicites ou implicites à l'organon des cinq principes signalés plus haut.

Qui n'est pas apte à la révision est handicapé dans son cheminement. Qui n'est pas en état de faire preuve de qualités d'ordre technique est incapable d'imaginer les saisies expérimentales requises en troisième phase. Qui reste fixé sur un seul aspect de sa recherche et se révèle incapable de prendre en compte une pluralité d'aspects, voire la structualité complexe du problème posé (où jouent conjointement par exemple l'approche intuitive, l'essai expérimental et la visée théorique) est démuné pour mener à son terme le processus des quatre phases. Qui n'est pas ouvert à l'idée qu'une solidarité puisse se manifester sur les fronts de la recherche (interdisciplinarité) voit se restreindre son horizon d'invention et risque de mal maîtriser les exigences qu'imposent les visées de la quatrième phase de

procédure. Il en est de même s'il omet le principe de sauvegarde de l'acquis. On notera que rien ne s'oppose à ce que la méthodologie ouverte, applicable aux sciences dites exactes, ne le soit aussi aux sciences humaines, voire en situations quotidiennes. Mais pour que cette méthodologie puisse déployer tous ses effets, il convient que le chercheur soit conscient du rôle, souvent implicite, que le concept de référentiel joue pour le guider dans son cheminement. On n'est jamais au niveau de réalités en soi ; on se situe toujours dans des horizons de réalité. Le référentiel apparaît dès lors comme le concept central de l'idonéisme ou de la philosophie ouverte.

► AGAZZI E., « Introduzione », in *Il problema della conoscenza nella filosofia aperta*, Milan, Franco Angeli, 1992. — ARAUJO J.M.M., « Ce que F. Gonseth a d'important à dire à l'épistémologie contemporaine », *Dialectica*, vol. 44, 3/4, 1990. — BACHELARD G., « L'idonéisme ou l'exactitude discursive », in Bibli. sc., *Dialectica*, n° 90, Neuchâtel, Le Griffon, 1950. — BERNAYS P., « Charakterzüge der Philosophie Gonseth », *Dialectica*, vol. 14, 2/3, 1960. — BERTHOLET E., *La philosophie des sciences de F. Gonseth*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1968. — BONSACK F., « La philosophie de F. Gonseth », *Homage to Gonseth*, Éd. Société jurassienne d'Émulation, 1970. — COHEN-TANNOUDRI G., *L'horizon des particules*, Paris, Gallimard, 1989 ; « La pertinence du concept d'horizon de réalité en physique théorique contemporaine », *Dialectica*, vol. 44, 3/4, 1990. — EMERY É., *F. Gonseth — Pour une philosophie dialectique ouverte à l'expérience*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1985 ; *Pour une philosophie du dialogue*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1995. — GONSETH F., l'ensemble de son œuvre, dès *Les fondements des mathématiques*, Paris, Blanchard, 1926-1974 ; *Théâtre de veille et théâtre de songe*, in Bibli. sc., *Dialectica*, n° 21, Neuchâtel, Le Griffon, 1950. — HORIA V., *Viaje a los centros de la tierra*, Barcelona, Nuovo Arte Thor, 1987. — KUHN T., *The structure of scientific revolutions*, Chicago, Univ. Press, 1962. — LADRIÈRE J., « La philosophie ouverte et les mathématiques », *Revue internationale de philosophie*, n° 93-94, 1970. — MOREL B., *L'autre et l'intime*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1976. — OHE S., « La philosophie ouverte et la sagesse orientale », *Revue internationale de philosophie*, n° 93-94, 1970. — PIAGET J., « Souvenirs sur F. Gonseth », *Dialectica*, vol. 31, 1, 1977. — PILET P.E., « L'idonéisme et la recherche en biologie », *Revue internationale de philosophie*, n° 93-94, 1970. — POUGET P.M., *Pour un nouvel esprit philosophique d'après l'œuvre de F. Gonseth*, Vevey, L'Air, 1994. — SOERENSEN W., « F. Gonseth et la crise des fondements », *Revue du Jura Bernois et de Bienne*, Intervall, n° 27, 1950. — TONOÛ V., « Studu introductiv », *Ferdinand Gonseth*, vol. I, Bucarest, Editura științifică, 1995. — WITKOWSKI L., « On the phenomenon of marginality in epistemology : Gonseth and his tradition », *Dialectica*, vol. 44, 3/4, 1990.

Éric EMERY

→ Gonseth ; Référentiel.

IMAGE

OPTIQUE

L'image est au cœur de problèmes philosophiques majeurs concernant la distinction de la réalité et de l'apparence, la relation de l'homme au monde qui

l'entoure, ou le statut de l'imaginaire et de ses productions. Les sciences de la nature, dont seul l'impact sera ici évoqué, ne recourent qu'une partie de ces problèmes, mais elles en ont sourdement modifié les données. D'abord pur fantasme dans l'optique de l'Antiquité et du haut Moyen Âge, l'image acquiert dans l'optique classique une réalité objective et une définition rigoureuse dont le modèle peut être transféré à d'autres disciplines, jusqu'à ce qu'elle devienne, avec la physique contemporaine, l'objet d'une production massive et diversifiée qui en renouvelle le sens et la portée.

L'image et l'optique du rayon visuel

Ce sont les Grecs qui ont fondé l'optique comme science géométrisée, et la plupart des mots que nous y utilisons nous viennent d'eux. Notre terme d'image a toutefois une origine latine ; *imago* renvoie à la notion d'imitation (racine *im-*), et par elle de ressemblance : il peut s'agir d'un portrait, comme ces portraits d'ancêtres qu'on exposait dans les demeures patriciennes sur l'autel consacré au culte familial, ou même de l'ombre d'un mort ; mais plus généralement d'une reproduction ou d'une représentation d'une chose ou d'une personne ; et bien sûr de ces doubles des objets et des visages que font voir les miroirs. Les termes grecs (il y en avait plusieurs) recourent ces acceptions. Le plus usité et le plus ancien, *eidōlon*, qui a donné notre idole, comporte des significations voisines : effigie, statue, double, fantôme – tout ce qui a l'aspect de la chose sans l'être ; un autre mot encore, employé par Aristote, *emphasis*, désigne ce qui apparaît dans une eau calme ou un miroir. Ces étymologies sont significatives ; elles rappellent que l'image est apparence, et porte en elle l'énigme de la ressemblance, le pouvoir de l'évocation, et le piège de l'illusion.

Entre de multiples théories concurrentes de la vision, l'optique géométrique grecque se fonda sur celle d'un flux de rayons visuels émanant de l'œil et allant frapper les objets. Le rayon visuel était traité comme une sorte d'organe psychique externe ressentant à son extrémité (et donc hors de notre corps), au contact du point-objet, la sensation de sa couleur, avec celle de sa direction et même chez Ptolémée de sa distance. Dévié par une surface réfléchissante, il faisait voir au fond du miroir quelque chose là où il n'y a rien : l'image était pensée comme un pur fantasme dû à l'égarément de notre sens visuel, alors que pour nous elle a pour répondant objectif la réception par l'œil d'un signal lumineux. De ce fait, l'étude des miroirs brûlants et de la concentration des rayons solaires restait en droit distincte de celle de la réflexion des rayons visuels et de ce qu'elle donne à voir. La connaissance par les Grecs, dès le IV^e s. avant J.-C., de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion, qui vaut aussi bien pour les rayons lumineux que pour les rayons visuels, ne doit donc pas conduire à identifier les objets théoriques qu'ils se donnaient avec les nôtres. Il en va de même

pour leur étude des réfractions, qui semble commencer peu après celle des réflexions.

Cette remarque vaut d'abord pour leur conception optique de l'image. Le rayon visuel étant normalement rectiligne, il était censé se produire une méprise chaque fois qu'il se brise sur un obstacle, car on n'a pas conscience de la déviation survenue. On devait donc voir l'image dans le prolongement de la direction initiale du rayon visuel ; mais on savait par ailleurs que dans les miroirs plans on la voit dans le prolongement de la perpendiculaire abaissée de l'objet au miroir ; on en concluait qu'elle se trouvait à l'intersection. Cette construction archétypale de l'image, valable pour les miroirs plans, fut abusivement étendue à toutes les variétés de miroirs convexes et concaves, ainsi qu'aux réfractions. Or pour certaines incidences sur les miroirs sphériques convexes, et plus encore sur les concaves, cette intersection au lieu de se situer derrière le miroir (cas de notre image virtuelle) se situe devant lui (cas de notre image réelle), et même parfois derrière l'œil. Peu importait. Pour un Ptolémée, dès lors que le rayon visuel, même par ricochet, atteignait l'objet, on devait en voir quelque chose dans le miroir, ne serait-ce que de vagues lueurs. Des notions comme celles de stigmatisme restaient hors de portée, l'image n'étant jamais que du faux plus ou moins semblable au vrai.

L'optique du rayon visuel, bien que géométrisée, ne remettait donc nullement en cause les caractères traditionnels de l'image. Les dispositifs optiques y étaient des pièges auxquels le regard se laisse prendre, et où souvent il se perd. Aussi était-on fort loin de travailler à une optique instrumentale. Le but de l'optique n'était pas d'accroître la puissance de la vue, mais de la préserver de l'erreur en étudiant à quelles conditions elle est véridique ou trompeuse. Ce faisant, l'optique s'insérait dans un des plus constants débats philosophiques de l'Antiquité, celui de savoir si et jusqu'où l'homme peut se fier à ses sens, et aux objets de ses sens. Et dans ce débat, l'image relevait d'une catégorie équivoque et déstabilisante. D'un côté, elle ne présentait aucun caractère de vérité ou d'accès à la vérité ; l'image optique pouvait au mieux, comme l'image peinte, faire saisir l'apparence d'une apparence. Imitant les choses sans en avoir la consistance, elle hantait le monde d'une présence se dérobant sans cesse, et, dans une ontologie de tradition platonicienne, représentait la limite extrême de l'être, dont elle respectait les lois sans elle-même être vraiment. Mais en même temps, son mimétisme lui conférait sur les âmes, comme sur Narcisse se mirant dans l'eau, un vertige d'attrance et de fascination.

L'image et l'optique du rayon lumineux

L'image change de statut quand à la fin du X^e s. Ibn al-Haytham (Alhazen) inverse le vieux cône visuel et lui substitue un cône de rayons lumineux pénétrant dans l'œil. La notion se complexifie et s'intériorise. On continue certes à traiter des erreurs provoquées par les images réfléchies ou réfractées ; mais toute vision,

même directe, donne lieu à la formation en nous de quelque chose qui tient de l'image, et qui devient un élément sensoriel fondamental. Car désormais la sensation se produit à l'intérieur du corps, et tout d'abord dans le cristallin, tenu à tort pour l'organe spécifique de la vision, où les rayons reçus dessinent point par point une « forme » (*forma* dans la traduction latine, qui date de la fin du XII^e s.), sorte de projection lumineuse de l'objet. Cette forme, devenue première donnée sensorielle, chemine *via* l'humeur vitrée et le nerf optique, et, après fusion avec celle de l'autre œil dans le chiasma, parvient à l'encéphale, où siègent les instances psychiques supérieures qui l'interprètent. La vue exige donc toujours la transmission d'une quasi-image interne ; et qu'il s'agisse de l'objet proprement dit ou de son reflet dans un miroir, ce qu'on voit présente toujours le caractère objectif d'être produit par un phénomène physique externe, la lumière.

En 1604, Kepler établit que pour les miroirs sphériques comme pour les dioptries, il faut considérer le trajet de faisceaux de rayons et non de rayons isolés, et que la netteté de l'image réelle obtenue dépend de la bonne convergence du faisceau réfléchi ou réfracté. Par ailleurs, il renouvelle la théorie de la vision : le véritable organe sensoriel est la rétine, et non le cristallin, qui joue seulement le rôle d'un dioptré convergent. Il se forme sur elle une image réelle, qui pour assurer une bonne vision doit être parfaitement nette. Désormais, jusqu'au fond de l'œil, tout se produit selon les lois de l'optique. Kepler peut expliquer le rôle des verres correcteurs des myopes et des presbytes, puis, quand Galilée en 1610 lui envoie une de ses lunettes, il en donne une première théorie, et propose d'autres combinaisons de lentilles pour agrandir les objets lointains. Toute vision, même dans un miroir ou à travers un dioptré, exige désormais une image rétinienne réelle ; l'image cesse d'être en tant que telle un mirage ou une fiction.

Déjà l'étude de la perspective avait obligé à penser l'image comme la transformation réglée point par point d'un objet. Cette spéculation se développe dans les mathématiques classiques, qui conceptualisent la notion d'espace et généralisent la théorie des projections. Au-delà de l'acception géométrique d'image d'un point, l'image finira de nos jours par être l'élément d'un ensemble qui correspond, et correspond seul, à un élément d'un premier ensemble. Ainsi, l'une des voies d'évolution ouvertes au XVII^e s. au concept d'image (non sans discussions) est celle de représenter fidèlement ce dont elle est l'objet : le télescope, puis le microscope, révèlent un champ de visibilité inaccessible à l'œil nu et pourtant fiable, parce que justifiable par la théorie. Les sens de l'homme trouvent dans des organes annexes une extension d'eux-mêmes les rendant sensibles à l'insensible. En même temps, l'image dessinée, fixée par la gravure et diffusée par l'imprimerie, joue un rôle scientifique croissant. L'âge classique est celui de l'observation et des voyages, où l'on cherche à voir pour reproduire méthodiquement ce qu'on voit. Le XIX^e s. saura renforcer cet acquis par les applications scientifiques de la photographie et du

cinéma. Plus généralement, au-delà de la description de la nature, les techniques réglées de représentation deviennent un moyen de connaissance, depuis les cartes géographiques jusqu'aux plans gradués ou aux schémas techniques. La visualisation par l'image ou le graphe s'impose comme l'auxiliaire de la conceptualisation et du calcul.

Mais corrélativement, autre voie d'évolution, l'image ne perd rien de ses prestiges. Si elle peut être savante, elle peut aussi être ludique. Autant que de l'optique instrumentale, le XVII^e s. est le siècle de l'optique illusionniste, tout comme des anamorphoses ou des caricatures zoomorphes. La tendance se poursuit au siècle suivant avec la vogue de la lanterne magique. Et au XIX^e s., une optique physiologique et une psychologie de la perception expérimentales donnent leurs bases théoriques aux techniques donnant l'impression du mouvement ; bientôt les progrès conjoints de la photographie, de l'éclairage électrique et de la stroboscopie mènent au cinéma. Tous les truquages, toutes les merveilles s'offrent à l'imaginaire. L'illusion est si prégnante qu'elle crée dès le muet des héros et des univers mythiques. L'image commence à acquérir une présence forte, qui s'impose parfois comme alternative au quotidien.

L'image à l'âge de l'électronique

Concernant la production d'images, la grande innovation du XX^e s. a été d'abandonner le modèle de la vision naturelle, qui se matérialise encore dans une caméra de cinéma. Le champ de l'optique a dépassé le spectre de la lumière visible pour s'étendre à l'ensemble des rayonnements électromagnétiques ; par ailleurs, par analogie avec la propagation de rayons lumineux dans des milieux diversement réfringents, s'est développée une optique électronique étudiant la trajectoire dans un vide poussé d'électrons libres accélérés (ou d'autres particules), et les moyens de les guider comme à travers des lentilles ou des prismes ; on a même inventé des procédés d'investigation visuelle à partir de phénomènes naturels qui n'ont plus d'équivalent optique, tels que la résonance magnétique nucléaire ou l'effet tunnel. De plus, avec l'invention de la radio et de la télévision, l'image sonore, puis visuelle, a pu se transmettre à une vitesse de l'ordre de celle de la lumière. Enfin l'usage de l'ordinateur a conduit à synthétiser visuellement des données numérisées, à créer des formes qui soient non plus inspirées du sensible mais conçues selon un programme, et à analyser visuellement des informations de tous ordres. La conséquence en a été la fabrication d'une visibilité artificielle, devenue indépendante de ses conditions naturelles, et objectivée par l'image pour mieux être exploitée.

Déjà la découverte des rayons X avait permis au début du siècle de visualiser grossièrement l'intérieur des corps : la vue n'était plus un sens des surfaces ; plus tard le microscope électronique, les techniques de résonance magnétique nucléaire ou le scanner affineront les possibilités de microanalyse interne. On visualise

également ce qui relève chez le vivant d'autres sens que de la vue (on les découvre ou les comprend parfois à cette occasion) : les échos radar, les sources thermiques, les champs magnétiques – et même ce qui ne relève d'aucun sens connu, comme les ondes radio ou les courbes barométriques. Non seulement la nature de ce qui se donne à voir change, mais l'exercice de la vue s'affranchit de ses contraintes propres. La télévision fait que l'on n'a plus besoin pour voir d'être en situation de voir. Le monde semble s'offrir à un œil omniprésent. L'image se confirme dès lors plus que jamais comme un moyen de connaissance : tout gain dans la visualisation du très lointain (en astronomie), du très petit (dans les sciences de la matière) ou du très enfoui (dans celles de la vie) est un acquis décisif. De plus l'image s'affirme, et c'est nouveau, comme un irremplaçable moyen d'intervention, de contrôle et de production : de la microchirurgie à la télésurveillance des processus industriels, elle guide la main et oriente la décision. Elle se fait par là un médiateur obligé entre l'homme et l'objet de son action. Archivable dans des banques de données ou des CD rom, manipulable sur ordinateur, échangeable sur les réseaux de communication, elle est un des fondements de la révolution contemporaine des sciences et des techniques.

En même temps, l'usage de l'image se banalise et devient un élément majeur de la vie sociale. Sa vulgarisation instaure un univers de représentation qui tend à déréaliser ce qui est hors image. Programmée de manière interactive, elle entraîne les adolescents dans ses jeux de rôle. Télévisée à des fins d'information, de délassement ou de publicité, elle donne au public un reflet de lui-même et de son monde qui par sa présence immédiate et familière s'impose comme vérité et se constitue comme norme : ne semble réel et valable que ce qui appartient au grand spectacle télévisuel ; d'autoréférences en autocélébrations, une bulle médiatique se constitue, où s'enferment les protagonistes, et qui propose aux téléspectateurs une vie par délégation. Mais cela ne va pas sans un sourd malaise, dû au contraste entre le spectacle en continu et la prose du quotidien : le monde de l'image reste ressenti comme factice, et la parole politique y joue sa crédibilité. Par ailleurs, le besoin se développe contre toute médiatisation d'un contact direct avec les gens, les choses, le monde : vie associative, bricolage, quête de la nature sont peut-être autant de réponses à une demande d'authenticité induite (entre autres) par le règne de l'image et son caractère fantasmagorique.

► ALBERTI L.B., *De la Peinture. De Pictura* (1435), Paris, Macula-Dédale, 1992. – BAIER W.A., *A Source Book of Photographic History*, New York, Focal Press, 1964. – BALLE F., *Médias et sociétés*, Paris, Montchrestien, 7^e éd., 1994. – BALTRUSAITIS J., *Anamorphoses ou thaumaturgus opticus*, Paris, Flammarion, 1984 ; *Le Miroir*, Paris, Elmayer/Le Seuil, 1978. – BARTHES R., *La Chambre claire*, Paris, Cahiers du Cinéma-Gallimard-Le Seuil, 1980 ; *L'Obvie et l'Obtus*, Paris, Le Seuil, 1982. – DAUMAS M., dir., *Histoire générale des techniques*, en part. t. V, *Les Techniques de la civilisation industrielle*, 3^e partie (saisie, transmission et traitement de l'information),

Paris, PUF, 1978. – GALILEO G., *Le Messager des étoiles* (1610), trad., prés. et notes F. Hallyn, Paris, Le Seuil, 1992. – HOOKE R., *Micrographia* (1665), Bruxelles, Culture et civilisation, 1966. – KEMP M., *The Science of Art. Optical Themes in Western Art from Brunelleschi to Seurat*, Yale, Univ. Press, 1990. – LÉCUYER R., *Histoire de la photographie*, 1945. – PINAULT M., *Le Peintre et l'histoire naturelle*, Paris, Flammarion, 1990. – TATON R., dir., *Histoire générale des sciences*, en part. t. IV, *La Science contemporaine*, III, 4 (astronomie) et V, 1 (médecine), Paris, PUF, 1964. – VÉSALE A., *La fabrique du corps humain* (1543), av.-propos C. Ambrosetti, Arles, Actes Sud, 1987. – VIVIÉ J., *Traité général de technique du cinéma*, vol. 1, historique, Paris, BPI, 1946. – Coll. : *Encyclopædia Universalis* (bibliogr. spécifiques), en part. articles « Cinéma », « Électronique », « Microscopie », « Optique », « Photographie », « Télévision », Paris, 1995.

Gérard SIMON

→ Forme ; Lumière ; Vision.

IMMATÉRIALISME

C'est le philosophe Berkeley qui a introduit le terme d'« immatérialisme », dans les *Trois dialogues entre Hylas et Philonous* (1713). Le personnage Philonous en donne la définition suivante : « doctrine qui dénie l'existence de la matière, ou l'existence absolue des choses corporelles » ; il insiste sur la dimension polémique de l'immatérialisme, en l'opposant immédiatement au matérialisme. Notons que, au XVIII^e s., le terme « matérialisme » ne désigne pas la seule doctrine qui propose d'expliquer la genèse de la pensée par des processus matériels, mais aussi la doctrine, dite « réalisme » aujourd'hui, selon laquelle il existe une réalité indépendante de la pensée et d'une tout autre nature qu'elle.

Avec l'immatérialisme, il s'agissait pour Berkeley de faire deux choses : rendre compte de la réalité sans aucun recours à une substance matérielle ; démontrer positivement que la substance matérielle n'existe pas : la matière n'est pas une réalité, ni même un concept, mais un mot vide de sens. Outre la dimension critique de l'immatérialisme, particulièrement visible dans les *Principes de la connaissance humaine* (1710) et les *Trois dialogues* précités, Berkeley se fait donc fort de donner une description nouvelle de tout ce qui est, à partir des seules données sensibles et de leur perception. D'où une ontologie qui établit, de façon non polémique, la vérité de ce qui est ; d'où aussi un phénoménisme qui annonce une « simplification des sciences » : la notion matière simplement est devenue inutile dans une ontologie qui n'a plus rien à en dire, ni à en faire. C'est ce qui se passe dans la *Nouvelle théorie de la vision* (1709), où Berkeley établit que, par la vue seule, nous ne voyons pas la distance, la taille et la situation des « objets », mais seulement une myriade instable de couleurs que leur correspondance régulière avec des données tactiles nous apprend à constituer en « choses ». C'est ce qui se passe dans la *Siris* (1744), où Berkeley, de la description d'une

panacée contre toutes les maladies (l'eau de goudron), nous conduit pas à pas à des considérations générales sur l'ordre du cosmos. C'est toutefois pour la démonstration de l'inexistence de la matière que Berkeley fut tenu pour extravagant en même temps qu'irréfutable.

Quoique inventé par Berkeley dans sa facture la plus décapante, l'immatérialisme était « dans l'air » à la fin du XVII^e s. La question de la nature dernière de la matière donnait lieu à controverses entre les « cartésiens » qui identifiaient la matière à l'étendue divisible à l'infini, et les « corpusculaires » qui se recommandaient de l'atomisme d'Épicure. Quant à la question de l'existence de la matière, le doute radical de Descartes à l'endroit d'un monde matériel extérieur, dans la *Première Méditation* (1640), s'articulait à la restauration de l'existence d'un tel monde, dans la *Sixième*. Mais cette restauration reposait sur une « certitude morale » : puisque Dieu nous a donné une très grande inclination à croire que nos idées nous sont envoyées par des corps, il devrait être accusé de tromperie si nos idées étaient produites par d'autres causes. Dans le premier volume de la *Recherche de la vérité* (1674), Malebranche compte la croyance en l'existence des corps hors de nous parmi les « jugements naturels » qui se produisent en nous spontanément, de par notre expérience sensible. À cette date, il souligne que, de même que nos sens nous trompent relativement aux qualités qu'il appelle « sensibles » (les qualités secondaires de Boyle et Locke), de même ils nous trompent relativement aux « propriétés » considérées comme essentielles au corps (les qualités primaires) : la taille, la forme, le mouvement. Mais Malebranche tient que ces propriétés existent réellement, même s'il ajoute qu'il est « très difficile de le prouver démonstrativement ». Or, demandera Foucher, comment peut-on imaginer une preuve de l'existence de telles propriétés, une fois qu'on a mis en évidence qu'elles étaient tout aussi dépendantes du sujet percevant que les qualités dites « sensibles » ? C'est dans les *Éclaircissements* que, en 1677-1678, Malebranche entreprend directement de répondre. De fait, il reconnaît son accord avec Foucher sur le fait qu'on ne peut fournir aucune démonstration de l'existence de la matière : ni les sens ni la raison ne peuvent prouver que les corps existent ; nous ne sommes pas invinciblement portés à croire en leur existence. Seule la foi peut nous assurer qu'il existe bien des corps hors de nous.

Avec Bayle, la voie vers l'immatérialisme se caractérise par une radicalité très proche de Berkeley. En effet, par rapport aux philosophes précédents, qui affirment que l'existence d'un monde matériel extérieur est une certitude simplement morale ou fondée sur les Écritures, Bayle étale l'embarras des savants sur la nature de la matière (*Dictionnaire*, 1696) ; et de là montre que l'existence de la matière est impossible. Dans l'article « Pyrrhon », il se contente d'aller jusqu'au bout du constat que si nos sens nous trompent relativement sur les qualités secondaires, ils nous trompent tout autant sur les qualités primaires. Mais, dans l'article « Zénon », il fait observer que, pour nier

l'existence du mouvement, Zénon aurait pu aller jusqu'à nier l'existence de l'étendue. Le raisonnement est le suivant : si l'étendue existe, il faudrait qu'elle soit composée : (a) ou de points mathématiques sans étendue ; (b) ou d'atomes étendus ; (c) ou de parties infiniment divisibles. Bayle se débarrasse très aisément de (a) : d'une accumulation de « riens » – les points mathématiques –, on ne saurait faire quelque chose : « Plusieurs néants joints ensemble ne feront jamais une étendue... n'en parlons plus. » Quant à (b), il fait remarquer que la notion même d'« atome » est contradictoire. Aussi petit qu'il puisse être, un atome possède une certaine étendue. Il a donc une droite et une gauche, c'est-à-dire « deux côtés qui ne sont pas dans un même lieu [...] ». L'indivisibilité d'un atome est donc chimérique. Reste une seule possibilité, décrite en (c) : « S'il y a de l'étendue, il faut que ses parties soient divisibles à l'infini. » La suite de l'article s'attarde à plaisir sur la faiblesse de cette dernière hypothèse, qui n'est soutenue que comme un pis-aller : « La divisibilité à l'infini est l'hypothèse qu'Aristote a embrassée », rappelle Bayle, « et c'est elle de presque tous les professeurs en philosophie [...] ». Ce n'est pas qu'on la comprenne, ou que l'on puisse répondre aux objections ; mais que, ayant compris l'impossibilité des points, soit mathématiques, soit physiques, on n'a trouvé que ce seul parti à prendre.

Les difficultés insurmontables relatives à la divisibilité à l'infini auraient dû induire une thèse radicale. Les « zénoniens » pouvaient dire : « Si l'étendue existait, elle serait composée ou, ..., ou..., ou... Or, elle n'est composée ni de points mathématiques, ni de points physiques, ni de parties divisibles à l'infini ; donc elle n'existe point. » Bayle tire de là une conclusion dont Kant se souviendra : dans leurs spéculations, les hommes sont condamnés à des apories. Et le meilleur moyen qu'ils aient trouvé pour se sortir d'affaire, c'est de « choisir d'éviter un précipice en [se] jetant dans un autre ». Reconnaissions, insiste Bayle, que « la raison nous met à bout » dans certaines disputes ; alors, « nous devons nous contenter pleinement des lumières de la foi ». À côté des mystères de la foi, Bayle défend cependant la valeur pratique de la vie courante : pour le vulgaire, l'expérience visuelle et tactile suffit à justifier l'existence d'objets matériels hors de nous-mêmes. Berkeley ne dira pas autre chose, et la défense du sens commun, contre la virtuosité verbale des savants, devient axiale dans son œuvre.

Dans l'*Essai philosophique concernant l'entendement humain* (1690), Locke avait, quant à lui, fait vaciller les édifices séculaires construits sur la notion de substance. C'est d'abord par inadvertance que, selon Locke, nous en arrivons à parler comme d'une idée unique de substance, de ce qui n'est qu'un amas d'idées jointes ensemble : ces idées, allant constamment ensemble, sont regardées comme appartenant à une seule chose, et sont désignées par un seul nom, « dans le style expéditif du langage ordinaire ». N'étant pas capables d'imaginer comment les idées simples peuvent subsister par elles-mêmes, les hommes en

arrivent à « supposer quelque chose où elles subsistent, d'où elles résultent et qu'ils appellent *substance* ». Or, qu'on demande à quelqu'un ce que c'est que le « sujet » en lequel la couleur et le poids existent, il n'aura autre chose à répondre sinon que c'est dans des parties solides et étendues. Mais : « Si on lui demande ce que c'est que la chose dans laquelle la solidité et l'étendue sont inhérentes, il ne saura pas moins en peine que l'Indien [...] qui, ayant dit que la terre était soutenue par un grand éléphant, répondit à ceux qui lui demandaient sur quoi s'appuyait cet éléphant, que c'était une grande tortue, et qui, pressé de dire sur quoi reposait la tortue, répliqua que c'était quelque chose, mais *un je ne sais quoi* qu'il ne connaissait pas. Ainsi, ici comme dans tous les autres cas où nous utilisons des mots sans y associer des idées claires et distinctes, nous parlons comme des enfants qui, étant interrogés sur la nature de quelque chose qu'ils ignorent, ont cette réponse toute prête, fort satisfaisante à leur gré : « c'est quelque chose » [...] signifiant ainsi purement et simplement qu'ils ne savent ce que c'est. »

Berkeley ne se contentera pas de dire que nous n'avons aucune idée claire de la substance. Il concède que nous avons une notion de la substance spirituelle, traduite dans l'expérience concrète d'un « je » ou une conscience ; mais il dénie l'existence de la substance matérielle, en montrant que c'est une notion contradictoire et dépourvue de sens. Les « choses » de l'expérience courante – la pomme par exemple, décrite au début des *Principes* – sont analysées en collections de qualités (*i.e.* idées) sensibles. Ces qualités idéales n'existent que si elles sont perçues. Seule une prétendue abstraction produit la distinction entre exister et être perçu.

Toutes les notions les plus générales de la philosophie naturelle sont dès lors passées au crible d'un réquisitoire dont Berkeley avait fourni le principe avec la critique des idées abstraites : le temps, l'espace, le mouvement absolu de Newton ne sont pas épargnés. Et le philosophe, qui perçoit bien l'extrême limitation, voire l'impossibilité d'un langage et d'une théorisation qui se voudraient compatibles avec le principe « exister c'est être perçu ou percevoir », propose une conception instrumentaliste et phénoméniste de la physique. C'est par abus de langage que l'on traite du corps, de la figure ou du mouvement, et plus généralement « des axiomes primitifs de la science mécanique », comme de véritables principes agissants. La différence entre les philosophes de la nature et les autres hommes, « ne consiste pas dans une connaissance plus exacte de la cause des phénomènes, mais seulement dans une compréhension plus large des ouvrages de la nature, dont les effets particuliers sont ramenés à des règles générales ». Et comme les voies stables et cohérentes qui constituent le cours de la nature peuvent, selon Berkeley, être considérées comme le langage de son Auteur, les naturalistes sont des grammairiens qui peuvent toujours tomber dans les excès du pinaillage sur les règles et les signes, en perdant de vue la signification de chaque phénomène particulier.

En dépit des célèbres tentatives de « réfutation de

l'idéalisme » faites par Kant ou Moore, Russell fait remarquer qu'il n'y a aucune impossibilité logique à dire que le monde se réduit à mes seules perceptions. Aussi bien le monisme idéaliste de Berkeley a-t-il inspiré Mach pour l'établissement d'un monisme neutre qui, à la question « qu'est-ce qui existe ? », tenait que la seule réponse est : « une seule masse complexe de sensations ». Quant à la critique dirimante des spéculations vides de sens par Berkeley, c'est une source reconnue du néopositivisme et de la philosophie logique au début de ce siècle, comme aussi de la philosophie du langage contemporaine.

● *The Works of George Berkeley*, éd. Luce & Jessop, 9 vol., Édimbourg/Londres, 1948. – *Œuvres*, Paris, PUF « Epiméthée », 4 vol., 1985-1996.

▷ BERCHIELLI L., « Color, Space, and Figure in Locke : An Interpretation of the Molyneux Problem », in *Journal of the History of Philosophy*, vol. 40, n° 1, 2002, p. 47-65. – BERKELEY, *Principes de la connaissance humaine*, trad. D. Berlioz, GF-Flammarion, 1991 ; *Trois dialogues entre Hylas et Philonous*, trad. G. Brykman-R. Dégremont, GF-Flammarion, 1998 ; Berkeley, coordonné par R. Bouveresse, *Cahiers d'histoire de la philosophie de l'Université de Bourgogne*, n° 1, 2000. – BRACKEN H.M., *The Early Reception of Berkeley's Immaterialism*, M. Nijhoff, 1965. – BRYKMAN G., « Microscopes and Philosophical Method in Berkeley », *Critical and Interpretive Essays*, Minneapolis, Univ. of Minnesota Press, 1982 ; *Berkeley et le voile des mots*, Paris, Vrin, 1992 ; « Kant, Berkeley et la méthode sceptique », in RAMON CH. éd., *Kant et la pensée moderne : alternatives critiques*, Bordeaux, Presses Univ., 1996. – CHARLES S., *Berkeley dans la pensée des Lumières*, Paris, Vrin, 2003. – DÉGREMONT R., *Berkeley, l'idée de nature*, Paris, PUF « Philosophies », 1995. – DOKIC J., *Qu'est-ce que la perception ?*, Vrin, coll. « Chemins philosophiques », 2004. – GARBER D., « Locke, Berkeley and Corpuscularian Scepticism », in *Berkeley : Critical and Interpretive Essays*, op. cit., 1982. – HAMOU Ph., *La mutation du visible. Essai sur la portée épistémologique des instruments d'optique XVII^e siècle*, 2 vol., Presses Univ. du Septentrion, 1999. – LOCKWOOD M., « Russell, Berkeley and the inscrutability of Matter », in CLEMENTZ F. éd., *Hermès 7 : Bertrand Russell, de la logique à la politique*, 1990. – MACH E., *Die Analyse der Empfindungen* (1886), rééd. 1922 ; trad. *L'analyse des sensations*, Nîmes, J. Chambon, 1995. – PETERSCHMITT L., « Berkeley et les hypothèses mathématiques », in *Archives Internationales d'histoire des sciences*, vol. 53, 2004. – POPPER K., « A Note on Berkeley as a Precursor of Mach and Einstein », *Conjectures and Refutations*, Londres, Routledge, 1963. – ROBINSON H., *Matter and Sense*, Cambridge Univ. Press, 1982 ; *Objections to Physicalism*, Oxford, Univ. Press, 1993. – RUSSELL B., *The Problems of Philosophy* (1912), chap. 1-4, Oxford, Univ. Press, rééd., 1986 (trad. *Problèmes de philosophie*, Paris, Payot, 1991). – SCHUMACHER R., co-ordinateur, *Perception and Reality from Descartes to the Present*, éd. Mentis-Verlag, 2004. – TIERCELIN C., « Pierce, Berkeley, l'esprit et les signes », *Recherches sur la philosophie et le langage* 8, 1985. – TRICAUD F., éd. Brykman, « L'immatérialisme est-il réfutable ? », in *History of European Ideas, a Special Issue on George Berkeley : 1685-1985*, vol. 7, 1986. – Coll. : *The Concept of Matter in Modern Philosophy*, éd. E. Mc Mullin, Notre-Dame, 1963, rééd. 1978. – WILSON M. D., « Berkeley and the Corpuscularians », in *Essays on Berkeley*, coll. éd. par J. Foster et H. Robinson, OUP, Oxford, 1985.

→ Berkeley ; Cartésianisme ; Descartes ; Idéalisme ; Phénoménisme ; Réel ; Vision.

IMMUNOLOGIE

Le cas de l'immunologie est riche en enseignements pour l'histoire des sciences et l'épistémologie en général. Cette science, dont le nom a été forgé au début du siècle sur le radical anciennement connu im-mun... (exemption de charge, privilège...) a suscité en effet de nombreux débats exemplaires sur la délimitation de son domaine et sa place dans la classification des sciences, les rapports entre biologie et médecine, ou entre sciences théoriques et leurs applications, le statut des objets sur qui elle délibère, sa contribution à la compréhension de l'évolution des espèces, enfin plus récemment sa portée anthropologique et sa signification pour une théorie du corps.

L'impact centenaire de l'immunologie sur la santé publique par la mise en place d'une prophylaxie contre nombre de maladies infectieuses rend compte de la visibilité sociale d'une science jugée pourtant par les biologistes eux-mêmes comme assez ésothérique. L'épidémie de Sida dont l'acronyme signifie syndrome d'immunodéficience acquise a largement contribué à populariser les idées générales et les mots-clés de l'immunologie, et a offert un cas, là encore exemplaire, de diffusion rapide des connaissances scientifiques dans le grand public et de sensibilisation aux problèmes soulevés par la recherche en ce domaine.

Le développement de l'analogie des réactions immunitaires avec des phénomènes de cognition a enfin entraîné, au cours des deux dernières décennies, un rapprochement de l'immunologie avec les sciences cognitives et les neurosciences, considérées comme les disciplines contemporaines les plus aptes à traiter des effets de système et de formalisme, de communication et d'information.

La science du système immunitaire et son histoire

L'immunologie est souvent couramment définie comme la science du système immunitaire, renvoyant à un ensemble de cellules et de molécules en cours de caractérisation, responsable de plusieurs fonctions physiologiques, parmi lesquelles émergent la protection de l'intégrité corporelle et la défense contre les agressions. Bien que cette définition cursive et pragmatique fournisse des repères pour organiser l'histoire de la discipline et comprendre l'émergence de l'objet théorique et expérimental appelé système immunitaire, elle est incomplète et ne tient pas compte de toutes les dimensions de l'immunité, notamment son rôle au cours de l'évolution.

Les premières recherches historiques (Parish, Foster) ont surtout été de nature historiographique voire épique et ont porté sur l'immunologie considérée comme le verso de la microbiologie. Les ouvrages s'efforçaient de suivre chronologiquement la marche

trionphante de l'esprit humain, complétant méthodiquement l'inventaire, entrepris à la fin du XIX^e s., du règne microbien et parasitaire, et poursuivant parallèlement une offensive médicale préventive et thérapeutique. L'histoire de l'immunologie se logeait ainsi dans une histoire plus ample qui était celle des épidémies, des maladies infectieuses et de la microbiologie médicale.

L'histoire de l'immunologie a donc dû d'abord répondre à une interrogation sur la légitimité de son existence en tant que discipline scientifique, son contenu et ses limites. Une première distinction a porté sur l'histoire de l'immunologie et celle de l'immunisation. Une certaine confusion entre les deux était facilitée par le flou extrême de ce que nous savons sur cette dernière. Des manipulations de liquides pathologiques, à des fins magiques ou rituelles, destinées à préserver les individus de maladies mortelles, ont probablement eu lieu depuis des temps immémoriaux, et dans de très nombreuses cultures que l'histoire nationale de chaque pays s'efforce aujourd'hui de reconstruire. La variole est à cet égard un modèle classique, histoire exceptionnelle et presque parfaite d'éradication d'un fléau, qui a durablement influencé les tentatives internationales d'intervention sur l'histoire de l'humanité. Aux approches de l'an 2000, le désir reste fort, en particulier dans les organismes internationaux de santé publique (OMS...), de rééditer l'exploit pour d'autres fléaux comme la tuberculose ou la méningite ou la poliomyélite, malgré les déconvenues subies avec de pareils programmes dans des infections aux mécanismes écologiques complexes (paludisme).

L'inoculation de la variole, d'après les historiens occidentaux (Needham) de l'entre-deux-guerres, aurait remonté au X^e s. en Chine, où les empereurs auraient donné le signal d'une véritable politique de santé publique en imposant des pratiques d'inoculation généralisée. Nous traversons aujourd'hui une période révisionniste de ces évaluations généreuses, et les historiens, chinois cette fois (Leung) s'accordent assez prudemment sur le début du XVIII^e s. Chose intéressante puisque c'est précisément au début du XVIII^e s. que se situe le transfert de l'inoculation préventive de la variole ou variorisation de l'Empire ottoman en Angleterre (Moulin & Chuvin, 1981).

Il est à remarquer à cette occasion que le choix d'une immunisation artificielle (vaccination), de préférence à l'immunité aléatoire constituée spontanément à l'occasion d'une infection naturelle, a été un choix historique dont nous ne mesurons pas exactement toutes les conséquences biologiques et médicales. Un choix qui, en dépit des contestations et des incidents et accidents de parcours qui ont jalonné l'expérimentation humaine dans ce domaine, n'a pas été fondamentalement remis en question (Moulin, 1996), bien que les biologistes soulèvent le problème des effets à long terme, individuels et populationnels, des stimulations répétées ou anarchiques de l'immunité ainsi que des conséquences sur l'évolution des virus.

Autour des phénomènes d'immunité, mis en lumière

au cours des années montantes de la bactériologie, volontiers surnommées en France période pastoriennne, s'est développée dans les laboratoires de médecine l'étude des réactions et des mécanismes par lesquels l'organisme gère les infections causées par les microbes de l'environnement voire les microbes appartenant à son milieu intérieur. L'apprentissage de toutes ces réactions a conduit à isoler deux grandes familles de mécanismes, dits les uns humoraux, par référence aux liquides baignant le corps, et les autres cellulaires. Un certain nombre de débats ont porté sur ces questions. Les anticorps ont notamment constitué le centre d'un débat sur leur existence aussi bien que sur leur rôle réel dans la défense anti-infectieuse. L'élucidation de leur séquence et de leur structure entre les deux guerres a constitué un épisode avant-coureur de la biologie moléculaire des années 1950 et ils ont pu être considérés comme « l'ADN des immunologistes » (Corbellini, 1983).

Les hypothèses sur leur formation ont opposé la théorie instructive, où l'anticorps se moule sur l'antigène à la demande (Pauling, 1940), à la théorie sélective (Burnet, 1959) où l'antigène stimule électivement un clone préexistant qui se multiplie. La théorie sélective a situé l'immunologie dans le courant du darwinisme contemporain et l'a durablement intégrée dans les grands débats de la biologie contemporaine. Bien qu'elle soit loin de synthétiser toutes les questions posées à l'immunologie, elle a fait office de cadre théorique général, et de ce point de vue, aucune synthèse importante ou révision déshonorante des postulats de base n'est intervenue depuis cette date, en dépit des critiques portant sur l'importance excessive donnée à l'idée de défense anti-infectieuse et la recherche pour le système immunitaire de finalités physiologiques plus générales que la simple défense contre les agents pathogènes.

L'immunologie a récemment attiré l'attention de nouveaux spécialistes des sciences humaines. Si, dans le passé récent, elle avait fait l'objet surtout de travaux historiques, visant d'abord à célébrer ou présenter les grandes découvertes puis à identifier une périodicité dans son développement, les intérêts des nouveaux venus se sont déplacés, incluant notamment une interrogation récurrente sur le rapport entre les historiens des sciences contemporaines et les acteurs de cette histoire, engagés dans des recherches en cours, soulevant le problème d'une déontologie des historiens et d'une méthodologie adaptée à un terrain mouvant et une réalité rapidement évolutive. Les scientifiques eux-mêmes, conscients de leurs propres enjeux, sont enrôlés dans une nouvelle histoire qui se cherche, mais aussi les juristes intervenant par le biais de la régulation des brevets et du label social et commercial donné à une invention. La multiplication des ouvrages à caractère historique, autobiographies de savants renommés, mais aussi articles de synthèse à caractère historique dans des revues incisives comme *Immunology Today* suggèrent la possibilité en histoire des sciences d'un partenariat inédit, à la recherche d'une méthodologie rigoureuse et d'une déontologie professionnelle.

L'ingéniosité lexicale et les parallèles linguistiques des immunologistes, notamment quand ils revendiquent l'étude d'un « répertoire » de cellules et le « décodage » des « récepteurs » cellulaires, autant que l'intervention de nombreux métaphores dans leur production scientifique rendent compte de l'intérêt des sémioticiens pour leur écriture. Ce n'est pas pour rien que Françoise Bastide, biologiste passée par la théologie et la patristique, a trouvé, avant sa disparition prématurée, un champ d'exploration privilégié dans l'analyse des textes biologiques et plus particulièrement immunologiques, attentive à la rhétorique employée, aux effets de facilité des termes imagés (comme en témoigne son analyse exemplaire du terme de « cascade » dans la description de réactions biochimiques en série, dont l'immunologie offre de nombreux exemples).

Des spécialistes des sciences humaines les plus diverses, de l'anthropologie à la sémiotique, en interaction avec les historiens, ont donc trouvé dans l'immunologie un champ d'application privilégié de leurs méthodes d'investigation. Mais ce sont les sociologues qui ont peut-être de la façon la plus directe contesté les constructions classiques de l'histoire des sciences d'une série de « découvertes », et tenté de reconstruire le contexte social et institutionnel de la marche de la science. Dans *An imaged World*, la sociologue June Goodfield avait décentré son étude autour d'acteurs scientifiques de deuxième ordre, occupés à résoudre des questions scientifiques à la mode comme la circulation des lymphocytes et leur migration préférentielle ou « homing » vers certains sites électifs du corps humain. L'ouvrage de Goodfield inaugurerait l'approche socio-anthropologique de Bruno Latour et Steve Woolgar dans *Laboratory Life*, où délibérément l'activité de laboratoire, observée de l'extérieur, était décrite comme un processus de production d'articles ou de gravure d'« inscriptions », sans référence ni à la vérité ni au sens, ni même à l'utilité sociale. Les objets immunologiques pouvaient apparaître comme une nouvelle catégorie d'entités créant des réseaux entre les chercheurs et les laboratoires et s'autonomisant au point d'accéder au statut d'acteurs (non humains) dans le champ de la recherche.

Les recherches sociologiques remettaient en cause le primat des découvertes comme objet de l'histoire des sciences, en soulignant les circonstances dans lesquelles un ensemble descriptif est isolé et reconnu comme « découverte », instaurant une rupture qui induit une réécriture du passé, tant de la part des acteurs eux-mêmes que de celle des historiens, respectueux d'un milieu socialement prestigieux et prisonniers de la transcendance de la science. Alberto Cambrosio et Peter Keating ont ainsi bien montré dans *Exquisite Specificity* (1996) que la découverte des anticorps monoclonaux n'a pas révélé la discontinuité qu'on lui prête habituellement et que l'événement requiert des interprétations plus nuancées. La découverte des anticorps monoclonaux en 1975 a marqué en fait la maîtrise de la production à volonté d'anticorps de même séquence

moléculaire. Elle a volontiers été présentée comme la réalisation fulgurante du fantasme central de l'immunologie : comprendre et mettre en œuvre la spécificité absolue, c'est-à-dire le modèle d'une congruence totale entre l'antigène et l'anticorps, excluant toute réaction croisée gênant l'interprétation univoque des phénomènes et entravant la gestion de l'immunité au niveau expérimental comme en thérapeutique. La production *ad libitum* d'anticorps monoclonaux offrait, semblait-il, d'autre part, une panoplie de réactifs biologiques et d'outils thérapeutiques, permettant, par exemple, l'utilisation élégante d'anticorps dirigés comme des têtes chercheuses contre tel ou tel antigène tumoral ou viral dans les moindres recoins de l'organisme. Si l'on suit Cambrosio, plutôt qu'une rupture éclair, la découverte représenterait une augmentation différentielle des connaissances intervenant au cours d'un processus continu et parfois divergent, d'amélioration des détails techniques et d'élucidation de microphénomènes. Les raisons pour lesquelles une découverte apparaît tout à coup dans l'histoire comme marquant une discontinuité fondatrice s'avèrent en grande partie contingentes au regard de la sociologie des sciences, critique du culte de la personnalité et de la recherche de parousies fréquente dans l'histoire des sciences.

Il faut rappeler à cet égard un épisode pionnier de la sociologie des sciences ou du moins reconstruit comme tel par l'un des plus célèbres d'entre eux, Thomas Kuhn, auteur de *La structure des révolutions scientifiques*. Le médecin et philosophe polonais Ludwik Fleck, sensibilisé par sa profession de sérologiste au caractère aléatoire et relatif des faits en biologie, a appliqué ses réflexions philosophiques et épistémologiques au cas particulier de la réaction de Wassermann. Ce test de la syphilis résulte de l'application d'une réaction de laboratoire à la recherche d'anticorps spécifiques dirigés contre le tréponème pâle, agent de la syphilis. Cette réaction, imprécise et difficile à mettre en œuvre, a subi, à partir de 1907, date à laquelle Wassermann l'a proposée comme examen de routine pour identifier la maladie, de très nombreuses modifications qui ont abouti à utiliser comme matériaux de la réaction des substances n'ayant pas grand-chose à voir avec le tréponème. Fleck a souligné le caractère élastique de la notion de spécificité, pivot officiel de l'immunologie et gage de sa véracité et de l'univoque de ses énoncés autant que de son efficacité médicale. Il a suggéré l'importance des facteurs sociaux consolidant une direction privilégiée de recherche et imposant l'adoption d'un style commun à une époque donnée en sciences, ce style pouvant même s'imposer à un groupe de nouveaux venus sans éducation scientifique particulière (cas de l'analyse du comportement de déportés travaillant dans un laboratoire de sérologie au bloc du typhus de Buchenwald et amenés à « croire » en une réaction immunologique). Le lien entre phénomènes de science et de croyance était donc affirmé et a contribué à attirer les sciences biologiques dans le champ des sciences humaines.

La dichotomie entre histoire des sciences et sociologie des sciences était jadis très marquée et présentée comme une opposition entre histoire « externaliste » et histoire « internaliste », donnant la priorité au débat conceptuel et à la logique du raisonnement sur les dispositifs contingents, institutionnels ou sociaux qui interviennent dans le déroulement de la science. L'École dite de Manchester, adepte du programme dur (*strong program*) allait jusqu'à manifester un désintérêt à l'endroit de l'« effet de vérité » et érigeait en méthode le respect du « principe de symétrie » : les doctrines jugées erronées dans le passé méritent la même attention que les doctrines ayant fait l'objet d'un consensus. L'opposition tranchée tend aujourd'hui à faire place à une diversification méthodologique du champ de l'histoire des sciences auquel s'intègrent en fait les sociologues, ou vice versa comme on voudra.

L'immunologie et le postmodernisme

Les premiers travaux approfondis sur l'histoire de l'immunologie ont eu lieu au moment où l'épidémie de Sida attirait l'attention sur le fonctionnement pathologique du système immunitaire, paralysé par le virus dans ses composantes cruciales, la cellule dite auxiliaire ou encore « T4 » (du nom de son récepteur ou plus exactement du réactif commercial utilisé pour l'identifier) dans le jargon technique devenu rapidement familier à tous par l'intermédiaire des médias. Par un renversement imprévu de l'habitude consistant à attribuer un nom dérivé de l'agent pathogène (pasteurelloses, leptospiroses, listérioses...), l'épidémie a porté un nom immunologique, avant toute identification du virus causal.

En même temps, une ère d'optimisme fondée sur la dynamique de Pasteur et de Koch s'est trouvée close. Cette ère avait privilégié l'identification de la cause microbienne pour la compréhension de la maladie, débouchant sur des méthodes de culture et d'atténuation de la virulence des espèces pathogènes, permettant prophylaxie et traitement, et suggérant à l'horizon séculaire la possibilité d'éradication. Désormais, l'accent était mis plutôt sur les particularités de la réponse de l'organisme, aboutissant à distinguer des individus capables d'étouffer l'infection *in situ*, des lents progressseurs, des non-progressseurs, des mauvais répondeurs... L'immunologie, jadis concernée surtout par la réponse paradigmatique d'un système immunitaire égal chez tous, se préoccupait désormais de la façon dont l'organisme individuel gère ses rapports avec son environnement, renouant avec la préoccupation traditionnelle de la médecine hippocratogalénique. Elle se trouvait ainsi englobée dans ce que les philosophes appellent le postmodernisme ou la période de désillusions et d'interrogations sur la place de l'individu dans le monde ayant suivi la Seconde Guerre mondiale, et les nouvelles interpellations sur le rôle de la science dans la solution des énigmes métaphysiques et la conduite de la vie. Elle participait au mouvement de remise en cause des philosophies du

sujet en mettant l'accent sur l'immersion des organismes dans un milieu avec lequel ils entretiennent des relations complexes allant de la symbiose au rejet et à la lutte à mort.

Le cas des virus est ainsi un bon exemple de la complexité de l'imbrication des macro- et des micro-organismes dans l'immunologie et la biologie « post-modernes ». Nous sommes désormais loin de voir les virus comme des entités évoluant indépendamment de leur hôte. Par leur intégration potentielle au génome humain, leur pouvoir de déclencher des proliférations cancéreuses (oncogènes) ou des tumeurs du système immunitaire (lymphomes), les virus illustrent bien le caractère évolutif des barrières d'individu et d'espèce. Ils sont capables de développer une grande variété de réactions adaptatives aux réponses immunitaires de l'hôte, en tirant parti des possibilités qu'offre leur structure moléculaire pour contourner, détourner ou éluder ces réponses, offrant ainsi un bon modèle expérimental pour comprendre l'évolution, à travers l'immunologie (Zinkernagel, 1996). Leur pouvoir mutagène est d'autre part rehaussé par leur reproduction explosive (comparée à celle de leur hôte humain !).

L'immunologie a été historiquement liée au mouvement de compréhension et de manipulation des différences interspécifiques et individuelles, elle a notamment participé à la description de « groupes », désignés par référence à des marqueurs biologiques, et constituant de véritables entités populationnelles dont l'anthropologie et l'histoire se sont emparées pour élucider les migrations humaines, ou le devenir des civilisations sous le choc des agents infectieux (découverte du Nouveau Monde et controverse sur l'origine de la syphilis, en Europe disparition de la peste, déclin médiéval de la lèpre et substitution possible par la tuberculose...).

L'impact de l'immunologie sur les sciences humaines a amené à poser le problème du statut épistémologique de ses outils conceptuels.

Épistémologie de l'immunologie

Dans les débuts de l'immunologie, le statut des entités sur lesquelles portait le discours scientifique était loin de faire l'unanimité. Certains chercheurs considéraient par exemple les anticorps comme une propriété globale du sérum ou de l'organisme, sans se prononcer sur l'existence d'entités hypothétiques, comme les « anticorps », que d'autres au contraire s'efforçaient simultanément d'isoler et de caractériser.

L'application de nouveaux instruments et de nouvelles techniques d'étude au laboratoire a régulièrement pour effet de démultiplier le nombre des entités explicatives et de susciter des hypothèses sur le rôle réel de ces facteurs ou de ces cellules. L'adhésion à leur existence et l'attribution de fonctions à ces nouvelles entités dépend souvent des exigences logiques du système plus que de l'arsenal des preuves expérimentales. C'est ainsi que la reconnaissance d'un besoin d'homéostasie dans le fonctionnement du système

immunitaire, sans cesse sollicité et en danger d'éclatement ou d'emballlement, et la nécessité de décrire des fonctions de régulation ont amené à attribuer une réalité à des substances exerçant une fonction négative, comme les cellules « suppressives » ou les « facteurs suppresseurs », parfois au-delà de ce que les données expérimentales permettaient d'affirmer. La description de différences individuelles d'origine génétique à la surface des cellules de l'organisme (marqueurs dits d'histocompatibilité) a été opportunément interprétée comme fournissant un exemple de reconnaissance permanente du soi et du non-soi, ou du non-soi dans le contexte du soi. Le système de ces différences, système HLA chez l'homme et H2 chez la souris, s'est vu attribuer un rôle privilégié tant au cours de l'évolution que dans l'histoire individuelle des réactions immunitaires, où il tient sous sa dépendance le déclenchement d'un grand nombre d'affections et les mécanismes de rejet de greffe. Aujourd'hui, le débat perdure sur la pertinence des êtres caractérisés avec les moyens des technologies nouvelles. Si le FACS (trieur de cellules) a remplacé les méthodes d'ultracentrifugation et d'électrophorèse de l'entre-deux-guerres, le problème demeure du statut des molécules et des cellules identifiées : artefacts expérimentaux ou facteurs à part entière dans les réactions biologiques ?

La notion de récepteur, liée historiquement à la théorie des chaînes latérales (anticorps) de Paul Ehrlich (1900), peut être considérée comme un objet expérimental autant qu'une idée régulatrice, exprimant l'importance des phénomènes de fixation des molécules, plus tard appelés ligands, sur un substrat (comme dans le cas de la réaction entre l'enzyme et son substrat), préalable à toute action biologique. Ce qu'Ehrlich exprimait dans un célèbre adage : « corpora non agunt nisi fixata » (les corps n'exercent une action qu'après s'être fixés), définissant la problématique d'un champ biologique de forces à courte distance et donnant une grande importance aux formes spatiales des substances et à l'accessibilité des sites. Mais si l'immunologie d'hier fournit ses concepts fondamentaux à la biologie moléculaire d'aujourd'hui, quel peut être désormais son centre de gravité propre ?

La science du soi et du non-soi

Précédant la définition pragmatique de la science du système immunitaire, et en contraste avec son allure agnostique, l'immunologie a été présentée dans la deuxième moitié du XX^e s. comme « la science du soi et du non-soi ». La formule qui a connu et connaît encore un succès véritablement médiatique est due au médecin et biologiste australien Frank Macfarlane Burnet. Dans les années 1960, il interpréta un ensemble de phénomènes expérimentaux comme désignant deux stades au cours du développement d'un individu, la période embryonnaire, qui est une période de relative indifférenciation avec l'environnement ou encore de « tolérance » : l'animal ne développe pas de réaction immunitaire de destruction ou de neutralisation

vis-à-vis des antigènes rencontrés, et la phase de maturité, au cours de laquelle l'individu a établi définitivement la différence entre les antigènes du « soi » que par définition il tolère, et ceux du non-soi, qu'il identifie comme tels et contre lesquels il se défend au besoin.

Burnet abandonnait là toute tentative d'identifier de façon définitive des marqueurs biochimiques du soi et du non-soi, la différence entre soi et non-soi n'étant pas déterminée *a priori* mais liée aux circonstances au cours desquelles l'organisme a été en contact pour la première fois avec un antigène : d'où l'importance donnée à la notion d'apprentissage, celui-ci couvrant une période variable selon les individus, la « naissance » n'étant qu'une façon approximative de caractériser la transition d'un stade à l'autre.

Burnet a pu dire que l'immunologie était une science philosophique, entraînant une méprise sur ce qu'il entendait par là. Il voulait dire que son étude ouvrait de nouvelles perspectives pour comprendre les grandes énigmes de l'évolution. Il situait en effet l'immunologie dans un cadre darwinien, l'individu et l'espèce développant un répertoire immunologique particulier en fonction de leur histoire et de l'évolution. Par cette formulation *a priori* surprenante il entendait seulement caractériser le pouvoir interprétatif de la nouvelle science et son émancipation du cadre d'origine. Ce pouvoir interprétatif selon lui s'appliquait aux grandes questions de la biologie : cancérogénèse, sénescence, embryogenèse autant qu'infection. Il aurait pu aussi bien inclure dans ce domaine d'interprétation la médecine et les grandes questions posées par la définition du normal et du pathologique, de la santé et de la maladie, des réactions de l'homme à son milieu. L'hypothèse que l'immunologie fournit une grille d'interprétation à nombre de faits médicaux a été proposée par A.M. Moulin (*Le dernier langage de la médecine*, 1991). Et, de fait, l'explosion des recherches en immunologie a pu amener, dans les années 1970, à proposer de situer au cœur de chaque hôpital un laboratoire d'immunologie théorique, distinct de l'utilisation en routine des outils immunologiques courants, élaborant des protocoles expérimentaux et réfléchissant sur les expériences spontanées que sont les situations pathologiques en pratique médicale quotidienne, afin de bâtir l'« histoire naturelle » de la maladie. L'ambition de comprendre cette histoire naturelle (hors de toute intervention médicale) a marqué l'histoire de la médecine et ne constitue d'ailleurs pas une caractéristique de la biomédecine contemporaine ; l'immunologie prolonge ici une tradition millénaire.

La référence à la distinction entre soi et non-soi, malgré ses relents métaphysiques insolites dans un domaine scientifique marqué par la tradition positiviste, s'est révélée, au cours de la deuxième moitié du XX^e s., assez souple pour intégrer des sens changeants et des niveaux d'interprétation différents : soi et non-soi situés au niveau microscopique, pour comprendre les phénomènes de rejet de greffe, consécutifs à l'introduction dans un organisme de tissus provenant d'un autre individu (allogreffes) ou même

d'autres espèces (xéngreffes), mais aussi au niveau microscopique : Rolf Zinkernagel et Peter Doherty ont reçu en 1996 le prix Nobel pour leur description de la réaction immunitaire comme associant deux éléments : la reconnaissance des antigènes portés dans l'organisme par des cellules spécialisées dans leur présentation, et celle des antigènes du soi, portés par ces cellules, condition *sine qua non* de l'identification d'une molécule toxique ou pathogène définie secondairement comme non-soi. Cette réaction, identifiée d'abord par Zinkernagel et Doherty dans le cas de la défense contre les virus et de la destruction des cellules infectées par eux, a été généralisée à la plupart des réactions immunitaires.

Signaux biologiques

Indépendamment du contenu moléculaire et des séquences intervenantes, les réactions cellulaires tendent donc à être décrites de plus en plus dans le langage des communications comme résultant de signaux entre cellules, constitués par la diffusion de molécules dans le milieu ambiant et la réception par des sites moléculaires appropriés, où les structures spatiales autant que le détail moléculaire du « design » jouent un rôle.

Si la plupart des descriptions des réactions immunitaires s'accordent sur ce langage de la signalisation, elles diffèrent dans leur compréhension de la nature précise de ces signaux. En particulier, plusieurs immunologistes désireraient se débarrasser de la référence jugée « métaphysique » au soi et au non-soi et se tenir plus près d'une description expérimentale et contextuelle des réactions. Le débat a cristallisé en 1997 autour d'une théorie, proposée par Ephraïm Fuchs et Polly Matzinger, de façon volontairement iconoclaste. L'essentiel de leur proposition, illustrée par la suite par différents modèles, consiste à remplacer la référence au soi et au non-soi par la caractérisation plus biologique de signaux suivant les cas qualifiés de « danger », émanant par exemple d'une paroi cellulaire lésée ou d'une cellule en voie de destruction, ou encore de menace de l'« intégrité ».

La différence avec les explications classiques vient moins du changement de terminologie que de l'insistance sur le fait que la période de formation du système immunitaire ne saurait être cantonnée à la période embryonnaire, et que l'organisme reste toute sa vie capable de modifier sa réactivité. Il suffit pour cela de jouer sur des phénomènes de seuil : quantité minimale ou massive d'antigène ; sur la qualité et la quantité des cellules concernées : caractérisation plus fine de cellules jouant un rôle crucial dans la réponse immunitaire comme certaines cellules dites dendritiques. Ces cellules, décrites dans la peau à la fin du XIX^e s. et appelées ainsi à cause de leur ressemblance avec des prolongements neuronaux, illustrent les analogies entre système nerveux et immunitaire et le rôle croissant accordé aux phénomènes dits cognitifs dans les réactions immunitaires. Beaucoup de protocoles expérimentaux auraient été à tort interprétés comme

fournissant une image miniature des phénomènes « du » système, quand ils n'en étaient au mieux qu'une image très particulière étroitement liée au contexte expérimental.

Certaines de ces réflexions prolongeaient la remarque des épistémologues, attirant l'attention sur le système immunitaire comme objet idéal ou même régulateur de l'activité immunologique plutôt que comme objet construit dans une quelconque intuition. Elles ont eu le mérite d'attirer l'attention sur la nécessité de formuler de façon plus précise des hypothèses secondaires et de mettre en œuvre des protocoles expérimentaux par lesquels ces hypothèses puissent être vérifiées ou au moins, pour reprendre la terminologie de Popper, falsifiées.

Contrairement à des sciences comme la physique par exemple, il n'existe pas vraiment, on l'a vu, de théorie d'ensemble englobant les phénomènes immunitaires, et il semble vain pour le moment d'attendre une grande synthèse comme celle qu'a proposée la théorie synthétique de l'évolution (Silverstein). En revanche, la disponibilité des faits pathologiques, en particulier des affections supposées liées à des phénomènes de dysrégulation du système immunitaire comme les tumeurs lymphocytaires ou les affections auto-immunes, pourrait fournir l'occasion d'observer la pertinence des hypothèses formulées.

Cette proximité de l'immunologie et de la médecine, souvent signalée par de nombreux auteurs, ce que Niels Jerne appelait un raccourci privé (« a private line to medicine ») nous ramène aux origines de l'immunologie. S'il n'est plus question de la limiter aux phénomènes d'immunisation, autonomisés sous le terme de « vaccinologie », il est clair que cette proximité permettant de tester de façon précise la portée des hypothèses équilibre le penchant spéculatif de l'immunologie, manifeste dans la créativité, tant conceptuelle que terminologique, dont son histoire offre maint exemple.

► BACHMANN M.F. & ZINKERNAGEL R.M., « The influence of virus structure on antibody responses and virus serotype formation », *Immunology Today*, 1996, 17, p. 553-558. — BIBEL D.J. éd., *Milestones in Immunology. A historical exploration*, Madison, Science Tech. Publ., 1988. — BLALOCK J.E., « The syntax of immune-neuroendocrine communication », *Immunology Today*, 1994, 15, p. 504-510. — BRENT L., *History of Transplantation Immunology*, Londres, Academic Press, 1997. — BURNET F.M., *The Integrity of the Body. A discussion of modern immunological ideas*, Cambridge, Harvard Univ. Press, 1962. — *Cellular Immunology. Self and Non-Self*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1969. — « Immunology as scholarly discipline », *Perspectives in Biology and Medicine*, aut. 1972, p. 1-10. — CAMBROSIO A. & KEATING P., *Exquisite Specificity. The Monoclonal Antibody Revolution*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1995. — CHARLESWORTH M., FARRELL L., STOKES T. & TURNBULL D., *Life among the scientists: an anthropological study of an Australian scientific community*, Melbourne, Oxford Univ. Press, 1989. — CLARKE A.E. & FUJIMURA J.H. éd., *The Right Tools for the Job: At work in Twentieth-Century Sciences*, Chicago Univ. Press, 1994. — COHEN I.R., « Microbial immunity and the immunological homunculus », *Immunology Today*, 1991, 12, p. 105-109. — COHN M., « On thinking

and wisdom », *Annual Review of Immunology*, 1994, 12, p. 3. — CORBELLINI G., éd., *L'evoluzione del pensiero immunologico*, Turin, Boringhieri, 1990. — DAERON M. éd., *Le système immunitaire ou l'immunité cent ans après Pasteur*, Paris, Nathan, 1996. — EHRLICH P., « On immunity with reference to cell life », *Proceedings of the Royal Society*, 1900, 66, p. 424-448. — FLECK L., *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache, Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*, Bâle, B. Schwabe, 1935 (trad. angl., *Genesis and development of a scientific fact*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1979). — FOX-KELLER E., *Secrets of Life. Essays on Language, Gender and Science*, New York, Routledge, 1992. — *Resfiguring Life: Metaphors of 20th Century Biology*, Washington, Columbia Univ. Press, 1995. — FRIDMAN H.W., *Le cerveau mobile*, Paris, Hermann, 1992. — GALLAGHER R., GILDER J., NOSSAL G.J.V. & SALVATORE G. éd., *Immunology. The Making of a Modern Science*, New York, Academic Press, 1995. — GOODFIELD J., « An Imaged World, 1970 », « Immunology as a historical object », *Journal of the History of Biology*, Dordrecht/Boston, Reidel, 27, 1994. — GOLUB E.S. & GREEN D.R., *Immunology. A Synthesis*, Sinauer, 1991. — HAMBURG A.A., & FAUCI A.S., « AIDS, the challenge to biomedical research », *Daedalus*, hiver 1989, p. 19-39. — HANNAWAY C. éd., *AIDS and the Public Debate*, Washington, IOS Press, 1975. — HIRSZFELD L., *Konstitutions- und Blutgruppenforschung*, Berlin, Springer, 1928. — JERNE N.K., « Waiting for the End », *Cold Spring Harbor Symposia for Quantitative Biology*, 1967, 32, p. 569-575. — « Towards a network theory of the immune system », *Annales d'Immunologie*, 1974, 125 C, p. 373-389. — KAY L., « Molecular biology and Pauling's immunochemistry: a neglected dimension », *History and Philosophy of Life Sciences*, 1989, 11, p. 29-43. — KLEIN J., *Immunology. The Science of Self and Non-Self Discrimination*, New York, Wiley, 1992. — LÖWY I., *The Polish School of Philosophy of Medicine: from Tytus Chalubinski (1896-1961) to Ludwik Fleck (1896-1961)*, Dordrecht, Kluwer, 1990. — MARTIN E., *Flexible Bodies, Tracking Immunity in American Culture*, Boston, Beacon Press, 1994. — MAZUMDAR P.H. éd., *Immunology 1930-1980*, Toronto, Wall & Thompson, 1989. — *Species and Specificity: an interpretation of the history of immunology*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1995. — MEDAWAR P.B., *The Uniqueness of the Individual*, Londres, Methuen, 1957. — MILLER J.F., « The thymus, maestro of the immune system », *BioEssays*, 1994, 16, p. 509. — MORSE S., « Factors in the emergence of infectious diseases », *Emerging Infectious Diseases*, 1995, 1, 7-15. — MOULIN A.M., « Text and Context in Biology », *Poetics Today*, 1988, 9, 145-161. — « Fleck's Style », in SCHNELLE T. & COHEN R.S. éd., *Cognition and Fact. Materials on Ludwik Fleck*, Dordrecht, Reidel, 1986, p. 407-419. — « The Immune System; a Key Concept for the History of Immunology », *History and Philosophy of Life Sciences*, 1989, 11, 13-28. — *Le dernier langage de la médecine. Histoire de l'immunologie de Pasteur au SIDA*, Paris, PUF, 1991. — *L'aventure de la vaccination*, Paris, Fayard 1996. — MOULIN A.M. & CHUVIN P., *L'Islam au péril des femmes (L'inoculation de la variole dans l'empire ottoman)*, Paris, Maspéro, 1981. — NAPIER A.D., *Foreign Bodies*, Berkeley, California Univ. Press, 1992. — SCHAFFNER K.F., « Theory changes in immunology », *Theoretical Medicine*, 1992, 13, p. 175-189. — SILVERSTEIN A.M., *A History of Immunology*, New York, Academic Press, 1990. — SILVERSTEIN A.M. & SODERQVIST T., « History of Immunology, the structure and dynamics of immunology, 1951-1972: a prosopographical study of international meetings », *Cellular Immunology*, 1994, 158, p. 1-28. — TAUBER A.I., *Metchnikoff and the Origins of Immunology*, New York, Oxford Univ. Press, 1991. (éd.) *Organism and the Origins of Self*, Boston, Kluwer, 1991. — *The Immune Self: Theory or Metaphor*, New York, Cambridge

Univ. Press, 1994. — TONEGAWA S., « Somatic generation of antibody diversity », *Nature*, 1983, 302, p. 5009-5015. — WILSON G.S., *The Hazards of Immunization*, Londres, Oxford Univ. Press, 1967. — ZOUALI M., « Development of human antibody variable genes in systemic autoimmunity », *Immunological Reviews*, 1992, 128, p. 73-99.

Anne Marie MOULIN

→ Bactériophage; Biotechnologies; Épidémie; Institut Rockefeller; Réseau; Rétrovirus; Sida; Spengler; Virus.

IMPETUS

On traduit parfois ce terme par « élan ». Mais on a plus fréquemment pris l'habitude de garder le mot latin *impetus*, qui désigne ainsi un concept, ou même une théorie, situés à une époque et dans un contexte précis. Les noms associés à ce concept sont peu nombreux mais des plus prestigieux : Jean Buridan, Albert de Saxe, Nicolas de Cues, Léonard de Vinci, Jean-Baptiste Benedetti et enfin Galilée.

L'histoire de l'*impetus* constitue en elle-même une certaine histoire de la mécanique, histoire limitée mais fondamentale pour comprendre le passage de la physique ancienne du mouvement à la physique moderne. C'est tout au moins une histoire du principe d'inertie, car il s'agit essentiellement d'admettre la persistance du mouvement par lui-même, non pas encore sans cause, mais sans cause extérieure. Cette histoire se situe entre le XIV^e et le XVII^e s., débute à Paris pour se terminer en Toscane, après être passée par l'Allemagne. Ce parcours est en lui-même intéressant en ce qu'il rend compte de la transmission des écrits de cette époque. Mais nous n'allons suivre ici que le parcours d'une idée, d'une réponse à un problème non résolu de la physique aristotélicienne.

Le plus simple, afin de présenter l'*impetus*, est de donner la parole à son inventeur, à savoir Jean Buridan, maître à la Faculté des arts de Paris vers 1330, lorsque après tant d'autres il commente les huit livres de la *Physique* d'Aristote.

Le problème du jet

« Si les projectiles continuent de se mouvoir après qu'ils ont subi le contact de ce qui les lance, c'est ou bien par "antiperistasis", comme certains le prétendent, ou bien parce que l'air pressé par le projectile pousse à son tour, d'un mouvement plus rapide, l'air qui se trouve devant lui. Aristote répète la même chose au 7^e livre du présent ouvrage et au 3^e livre du "De caelo". Cette question est, à mon avis fort difficile, car, à ce qu'il me semble, Aristote ne l'a pas bien résolue » (Jean Buridan, *Acutissimi philosophi...*). Quel était le problème ? Les mouvements violents, comme celui du jet d'un projectile, ne peuvent avoir lieu que par contact, dit Aristote. Seuls les mouvements naturels, vers le bas, vers le haut ou de rotation, se produisent d'eux-mêmes conformément à la nature du corps vers

le lieu naturel. L'*antiperistasis* est une théorie fondée sur l'impossibilité du vide. Lorsque le mobile commence à avancer, l'espace libéré à l'arrière doit se remplir instantanément. C'est cet « appel d'air » à l'arrière qui permet au projectile de continuer ainsi sa course. L'objection des atomistes, explicitée plus tard par Lucrèce dans son livre *De rerum naturae*, est que si le vide est impossible, l'air situé à l'arrière du mobile doit le suivre en bloc, tandis que celui qui se trouve à l'avant se déplace en bloc vers l'avant et pousse tout l'univers ! Le vide est donc nécessaire au mouvement. Aristote répondait alors en invoquant une condensation à l'avant du projectile et une raréfaction à l'arrière, sans vide. « Mais en dépit de cette explication, il me semble que la théorie proposée ne valait rien, et cela résulte de diverses expériences » (*ibid.*).

Certaines des expériences proposées par Buridan sont tout à fait traditionnelles, d'autres lui sont propres. Le batelier debout sur un navire ne sent pas le vent le pousser, mais plutôt le freiner, la paille située sur le pont est entraînée vers l'arrière, etc. Imaginons un javelot dont la partie postérieure est aussi aiguë que l'avant, pourquoi l'air pousserait-il d'avantage à l'arrière qu'il ne freine à l'avant ? Imaginons également une toupie ou une meule qui continue à tourner très longtemps. Un tel corps ne sort pourtant pas du lieu qu'il occupe et ne déplace donc pas d'air qui refluerait à l'arrière. Ces deux derniers arguments sont tout à fait remarquables car ils sont fondés sur une symétrie. Cela nous rappelle que si les scolastiques n'étaient pas géomètres, ils étaient en revanche de remarquables logiciens.

« La seconde opinion est celle qu'Aristote semble approuver. Selon cette opinion, celui qui lance le projectile meut, en même temps, l'air ambiant; cet air, violemment ébranlé, a puissance pour mouvoir à son tour ce projectile; il ne faut pas entendre par là que le même air se déplace du point où la projection a eu lieu jusqu'au point où cesse le mouvement du projectile, mais que l'air conjoint au projectile est mû par celui qui lance le mobile, que cet air en meut un autre, et ainsi de suite, ... aussi Aristote dit-il qu'il n'y a pas là un seul mobile, mais des mobiles successifs... » (*ibid.*). Cette successivité exprime déjà l'élasticité de l'air, mais pas assez clairement pour les lecteurs médiévaux. L'objection courante à cette explication est que l'on a déplaqué le problème du mobile à l'air, et que l'on ne voit pas pourquoi celui-ci aurait cette propriété de perpétuer le mouvement que l'on refuse au mobile lui-même. Averroès, le « commentateur » (d'Aristote), précise qu'il est dans la nature de l'air de retenir la force motrice lorsqu'il est ébranlé, et que c'est par cette propriété que le son, avec le temps, se propage au loin. Voilà donc qui devient clair car la compressibilité de l'air est invoquée ici pour permettre la transmission d'une onde.

Mais Buridan réfute encore cet argument à l'aide d'« expériences ». Celles-ci deviennent de plus en plus imaginaires : si on recouvrait une meule ou un bateau d'une toile, leurs mouvements n'en persisteraient pas

moins. Son argument le plus fort est que l'air reste trop facile à « diviser », trop facilement fendu par les projectiles, pour pouvoir les porter. Si l'air était le moteur, on devrait pouvoir projeter une plume plus loin qu'une pierre.

Après cet inventaire bien scolastique dans sa présentation mais très concret dans son contenu, Buridan énonce enfin sa solution.

Une nouvelle explication

« Voici donc, ce me semble, ce que l'on doit dire : tandis que le moteur meut le mobile, il lui imprime un certain impetus, une certaine puissance capable de mouvoir ce mobile dans la direction même où le moteur meut le mobile, que ce soit vers le haut, ou vers le bas, ou de côté, ou circulairement. Plus grande est la vitesse avec laquelle le moteur meut le mobile, plus puissant est l'impetus qu'il imprime en lui... mais par la résistance de l'air, et aussi par la pesanteur qui incline la pierre à se mouvoir en un sens contraire... cet impetus s'affaiblit continuellement [...] Toutes les formes et dispositions naturelles sont reçues en la matière et en proportion de la matière ; partant plus un corps contient de matière, plus il peut recevoir de cet impetus ; or dans un corps dense et grave, il y a, toutes choses égales d'ailleurs, plus de matière première qu'en un corps rare et léger. Une plume reçoit un impetus si faible que cet impetus se trouve détruit aussitôt par la résistance de l'air » (*ibid.*).

Le début du texte est décevant car on a réglé le problème avec un mot. Mais la suite montre que ce mot permet des rapports entre le mouvement et la force du moteur ou la densité du corps en tant que quantité de matière. Il ne sera plus nécessaire de recourir à des intelligences célestes pour rendre compte de la course perpétuelle des astres. L'impetus suffit en effet puisqu'il n'y a pas d'air ni de gravité pour le détruire dans les régions célestes.

Mais l'usage le plus extraordinaire fait par Buridan de son « concept » en est l'application à la gravité, à la chute libre. Il rend compte ainsi du fait que le mouvement naturel est plus rapide à la fin qu'au début, non plus en raison de la proximité du but, mais de l'éloignement du point de départ, de la façon suivante : « Je suppose que la gravité naturelle de cette pierre demeure toujours la même, avant le mouvement, après, et pendant... je suppose aussi que la résistance du milieu demeure toujours la même... car il ne me semble pas que l'air du dessous et plus proche de la Terre doive être moins résistant. Au contraire l'air supérieur peut être moins résistant parce qu'il est plus subtil. Troisièmement je suppose que si le mobile est le même, le moteur... et la résistance... le mouvement demeurera également rapide. De ces suppositions on doit conclure qu'une autre force mouvante concourt à ce mouvement en plus de la gravité naturelle... Je dis alors que cette autre force n'est pas le lieu qui attire le corps pesant comme l'aimant attire le fer..., car il s'ensuivrait que le corps commencerait à se mouvoir plus rapidement

depuis un lieu plus bas que depuis un lieu plus élevé, et l'expérience est contraire à cette conclusion... De cela vient que l'on doit imaginer que le corps pesant acquiert du mouvement, non seulement de son moteur principal, c'est-à-dire de la gravité, mais qu'il acquiert un certain impetus avec ce mouvement... Et comme cet impetus est acquis en commun avec le mouvement, alors plus rapide est le mouvement, plus grand est l'impetus. »

L'impetus acquis s'ajoutant à la gravité naturelle, le mouvement croît et donc l'impetus aussi, etc., explique longuement Buridan. L'impetus, à la fois cause et effet du mouvement, permet d'accumuler la vitesse acquise. Un raisonnement plus précis, s'il était possible, aboutirait à un accroissement constant de vitesse.

De nombreux commentaires ont qualifié la théorie de l'impetus de magique ou animiste. Nous avons cité de larges extraits du texte original pour montrer qu'il n'en était rien. Le texte sorti de son contexte est même trop moderne pour que l'on ne soit pas tenté par des interprétations anachroniques : on a en effet parlé de « quantité de mouvement » à propos de l'impetus. La tonalité concrète, de « bon sens », du texte vient peut-être du fait que Buridan n'est pas théologien mais seulement « artiste ». Mais la simplicité des arguments masque un contexte scolastique plus complexe.

Qu'est-ce que l'impetus ?

Bien avant Averroès, Jean Philopon, le commentateur grec le plus original d'Aristote, avait dit au v^e s. qu'« une certaine énergie motrice incorporelle était cédée au projectile par l'instrument du jet ». Guillaume d'Ockham affirmait, au tout début du xiv^e s., avant Buridan, qu'« un agent peut agir immédiatement sur un objet distant sans agir sur le milieu, lors même que le milieu est susceptible d'éprouver un effet de même nature ».

Le fait que « quelque chose » puisse se transmettre de l'agent au patient semble nécessaire à ces auteurs médiévaux, à distance ou au départ mais de façon durable, sans l'intervention d'un milieu possédant des propriétés particulières de condensation et de raréfaction. Guillaume d'Ockham imagine deux flèches lancées l'une vers l'autre et argumente sur le fait que l'air ne peut se mouvoir de deux mouvements contraires à la fois. Ce que disent les commentateurs, avant même de répondre au problème du jet, c'est que la transmission par le milieu ambiant ne résout pas le problème de la nature de ce qui est transmis. Alors autant transmettre ce quelque chose directement dans le mobile.

C'est ce qu'exprime clairement François de la Marche, dans un texte de 1323, légèrement antérieur à celui de Buridan : « Il semble préférable qu'une force de cette sorte réside dans le corps qui est mu plutôt que dans le milieu, quoique en aient dit le philosophe et le commentateur (Aristote et Averroès). Car il serait vain d'accomplir par beaucoup de causes ce qui peut être obtenu par peu (quia frustra fit per plura quod potest

fieri per pauciora)... en posant ceci, on rend compte de tous les phénomènes. » On reconnaît le principe d'économie de Guillaume d'Ockham, auteur qui a inspiré Buridan également. L'impetus est donc la réponse la plus simple, nominaliste plutôt qu'animiste, à une question ontologique qu'aucun mécanisme ne pouvait satisfaire.

L'impetus « corrompu »

Nicole Oresme compare plus tard l'impetus du mobile à la chaleur de l'eau, qui, étant de nature violente et non naturelle, se corrompt lentement. En fait l'« élan » peut concerner pour lui aussi bien une qualité autre que celle du mouvement. Oresme suppose de toute façon que celle-ci continue à croître après l'intervention du moteur, puis ne peut que décroître lorsqu'elle a cessé d'augmenter, comme le fait la gravité lorsque le jet est vers le haut. L'impetus n'a donc plus ce caractère de permanence que lui avait donné Buridan.

Que se passe-t-il entre l'agent et le patient, ou que passe-t-il ? Des analogies avec l'action des sacrements sur le croyant ont été utilisées. Ce sont sans doute de telles images qui ont dissuadé le lecteur moderne de s'intéresser à l'impetus comme théorie physique. Mais l'explication analogique ne fait que traduire la difficulté qu'il y a à rendre compte de la transmission du mouvement d'un corps à un autre. Cette question deviendra au xvii^e s. celle de la transmission du mouvement au cours du choc élastique, celle de l'élasticité.

La question est posée explicitement par Marsile d'Inghen vers la fin du xiv^e s. L'impetus est-il mouvement ou différent du mouvement ? S'il est différent est-il permanent ou successif ? C'est une qualité distincte du mouvement comme la cause de l'effet, permanente mais pas indéfiniment, d'une même espèce vers le haut et vers le bas. Seul l'impetus circulaire est d'une autre espèce, en raison de l'incommensurabilité entre le rectiligne et le circulaire. Marsile d'Inghen conclut en disant que l'impetus « sauve toutes les apparences ».

Albert de Saxe, autre successeur de Buridan, transmettra ses idées vers l'Est de l'Europe. L'impetus buridanien ne va pas être très utile dans l'immédiat. Certains vont supposer qu'il se « corrompt » de lui-même, plus ou moins selon la nature de l'objet, pour être relayé par l'air ambiant dans une théorie mixte qui n'est plus que descriptive. C'est alors le concept lui-même qui est corrompu. Lorsque Alexandre Koyré qualifie la théorie qui nous intéresse de « notion médiévale confuse », ce reproche s'adresse peut-être à cet impetus du xv^e s. Nicolas de Cues écrit un traité à propos du « Jeu du Globe » qui ressemble un peu à notre jeu actuel de bowling. La trajectoire incurvée de la boule est décrite en termes de plusieurs impetus, l'un rectiligne, l'autre circulaire, auxquels s'ajoute celui de la rotation sur elle-même de la boule. Léonard de Vinci, lecteur de Nicolas de Cues, compose également des impetus rectilignes et circulaires pour rendre compte du mouvement des projectiles.

Ces compositions d'impetus ne sont pas sans intérêt si l'on se souvient que la vitesse d'un mobile ne saurait être déterminée à un instant donné. Il n'y a en fait pas du tout de concept de vitesse au Moyen Âge, mais seulement une possibilité de comparer des mouvements par les proportions des grandeurs parcourues pendant le même temps ou des temps de parcours pour une même grandeur. L'impetus sert donc maintenant à désigner l'intensité du mouvement à un instant donné, plutôt qu'à rendre compte de l'inertie, effet plutôt que cause. Et c'est bien ainsi que l'utilisera Galilée.

Jean-Baptiste Benedetti, Galilée et l'impetus rénové

Benedetti, prédécesseur original de Galilée, affirme cependant que l'impetus ne peut être que rectiligne et non circulaire. Ayant observé des frondes plutôt que des meules, il constate que le mobile, une fois lâché, prend la tangente. La raison pour laquelle le mouvement se perpétue en cercle dans une meule ne peut être due qu'à la contrainte exercée par les parties de la roue les unes sur les autres.

Il s'agit donc bien cette fois d'inertie, au sens actuel du terme, celui qui permettra de fonder la dynamique newtonienne sur le fait que toute courbure de la trajectoire est due à une force. Le terme d'impetus n'était peut-être pas nécessaire à Benedetti, mais cette notion, devenue traditionnelle, d'une intensité qui persiste d'elle-même, sur son « élan », l'a sûrement aidé à poser une distinction d'un type nouveau entre le mouvement rectiligne et le circulaire, distinction qui n'a plus rien à voir avec l'incommensurabilité du cercle avec la droite.

Galilée emploie tellement souvent le mot impetus qu'il est impossible de choisir une citation caractéristique de cet usage. L'impetus acquis par le pendule ou par le projectile au cours de sa chute lui permet de remonter à sa hauteur de départ. Il est également difficile de lui choisir une traduction. Ce pourrait être vitesse, force ou énergie. L'usage qu'en fait Galilée, auquel il associe d'ailleurs souvent le mot momento, ne permet pas de distinguer entre les concepts modernes de quantité de mouvement ou d'énergie, ou même de vitesse puisque la masse du corps considéré est constante au cours du processus. Mais ce qui est certain, c'est que le mot permet à Galilée de désigner une intensité du mouvement à un instant donné alors que la notion de vitesse dont il a hérité ne le lui permettait pas. Ce terme n'est plus lié chez Galilée à une cause du mouvement ou d'inertie. Il en est simplement la manifestation. L'inertie du mobile sur le plan horizontal provient simplement de l'absence de cause d'accélération ou de retardement, et aucune cause n'est plus nécessaire à la persistance du mouvement.

L'histoire du concept d'impetus s'arrête donc ici et le mot lui-même ne sera plus employé de façon significative après Galilée, car Descartes a introduit la « quantité de mouvement », quantité dont la somme se conserve égale à elle-même dans l'Univers, immuable comme Dieu même. Le changement du mouvement

requiert seul une cause, extérieure à celui-ci mais de même nature.

► BENEDETTI J.B., *Io Baptistae Benedicti Diversarum Speculationum Mathematicarum et Physicarum Liber*. Taurini, Apud Haeredem Nicolai Beuilaqua, 1585. — BURIDAN J., *Acutissimi philosophi reverendi magistri Johannis Buridani subtilissime questionnes super octo Phisicorum libros Aristotelis*. Paris, Denis Roce, 1509. — CLAGETT M., *Mechanics in the Middle-Ages*. Madison, Univ. of the Wisconsin Press, 1961. — DRAKE S. & DRABKIN I.E., *Mechanics in sixteenth century Italy*. Madison/Milwaukee, London Univ./Wisconsin Press, 1969. — DUHEM P., *Études sur Léonard de Vinci*. Paris, F. de Nobels, 1955 ; *Les systèmes du Monde*. Paris, Hermann, 1950 (vol. VIII). — GALILÉE, *Discours concernant deux sciences nouvelles*. Paris, A. Colin, 1970. — LÉONARD DE VINCI, *Carnets*, introd. et classement des notes E. Maccurdy, trad. de l'ital. L. Servien, Paris, Gallimard, 1942. — MAIER A., *Zwei Grundprobleme der scolstischen Naturphilosophie*, 2^e éd., Rome, 1951. — NICOLAS DE CUES, *De ludo Globi, Opuscula varia*. Corte Maggiore, 1502.

Christiane VILAIN

→ Causalité classique ; Force ; Inertie (Principe d') ; Mouvement.

INDISCERNABILITÉ

PHYSIQUE

« Chaque substance individuelle de cet univers exprime dans sa notion l'univers dans lequel elle entre » écrit Leibniz (dans ses « Remarques sur la leçon d'Arnaud », le 13 mai 1686) enonçant ce qu'on peut appeler le principe de compossibilité, sur lequel repose la doctrine leibnizienne de l'harmonie. D'où il résulte, si l'on admet ce principe, qu'on ne saurait dire que deux individus sont identiques sans précaution : « Il nous paraît bien que ce carré de marbre apporté de Gènes aurait été tout à fait le même quand on l'y aurait laissé, parce que nos sens ne nous font juger que superficiellement, mais dans le fond, à cause de la connexion des choses, tout l'univers avec toutes ses parties serait tout autre. » Et quelques lignes plus loin : « Au reste, je suis si éloigné de la pluralité d'un même individu, que je suis même très persuadé [...] qu'il n'est pas possible qu'il y ait deux individus entièrement semblables. » Tel est le « principe des indiscernables », encore énoncé sous la forme : « Nulle part ne se trouve un ressemblance parfaite. » Qu'il faut entendre comme : ne sont réellement identiques que les objets totalement indiscernables (c'est-à-dire ceux dont la permutation laisse l'état du monde inchangé).

Ce principe repose entièrement sur la conception leibnizienne de la « connexion des choses » qui impose que l'ensemble des créatures soit relié, « adapté » à toutes les autres, et chacune à l'ensemble ; en d'autres mots, que l'univers ne soit pas une somme d'individua-lités, qu'il ne soit pas séparable en individus isolés. Le monde leibnizien est unitaire, et l'idée qu'un individu puisse exister, indépendamment de tous les autres, n'y a pas de sens. Cette conception du monde est

évidemment en contradiction avec celle sur laquelle s'est élevée la mécanique classique, pour laquelle les objets ont une existence séparée et entrent en tant qu'individus en interaction avec d'autres objets du même type, dont l'individualité ne dépend pas plus des premiers que celle des derniers ne dépend d'eux. Le concept central de la dynamique newtonienne est celui d'entités séparées, appelées corpuscules par Newton, et masses ponctuelles par ses successeurs.

Dans ces conditions deux particules peuvent être identiques bien que discernables : il suffit pour cela qu'elles aient la même constitution interne, donc la même masse. Peu importe que l'on puisse les discerner en les « suivant à la trace », le long de leurs trajectoires individuelles ; du moment qu'elles ont même masse (et éventuellement même charge électrique si l'on sort du strict cadre de la mécanique), elles sont considérées comme identiques. Identité et discernabilité ne sont pas incompatibles en physique newtonienne, alors que pour Leibniz on ne peut considérer des entités comme identiques que si elles sont indiscernables, autrement dit jamais, puisqu'elles sont liées au tout, de façon nécessairement différente.

La physique leibnizienne est également incompatible avec l'atomisme antique dont les corpuscules de Newton ne sont qu'un avatar. « Il est vrai qu'il n'en serait point ainsi s'il y avait des atomes de Démocrite », écrit Leibniz (*Essais*, III, III, 6). On sait que Leibniz s'est fortement opposé à Newton sur ce point (par Clarke interposé). Le fait qu'il soit impossible de « trouver deux feuilles entièrement semblables » est un argument contre les atomes supposés identiques au sein d'une même espèce (une « fiction impossible », écrit Leibniz).

Que les atomes de la physique actuelle ne soient pas les atomes de Démocrite, ni des corpuscules newtoniens, et qu'il ne faille en retenir que le caractère dénombrable, c'est ce dont les physiciens ont pris peu à peu conscience au fur et à mesure qu'ils développaient ce que l'on a commencé par appeler l'hypothèse atomique et qui est devenu la théorie quantique. Il apparaîtrait alors que les atomes de la physique quantique, contrairement à ceux de Démocrite et aux corpuscules de Newton, peuvent dans certaines conditions être indiscernables, nécessairement indiscernables ; ils sont alors identiques, au sens de Leibniz ; c'est-à-dire qu'ils ne forment qu'une seule et même entité au sein de laquelle on ne sait pas lequel est lequel. Avec toutes les conséquences qui en découlent.

On a vu que ce qui rend deux corpuscules de la physique classique nécessairement discernables est, en dernière analyse, le fait qu'on puisse les suivre à la trace, le long de leurs trajectoires respectives ; il est alors possible de les distinguer l'un de l'autre en leur attribuant soit un numéro, soit un nom, soit n'importe quel label, A et B par exemple ; si ces particules sont en interaction, il est encore possible à chaque instant de les distinguer, elles ne perdent pas leur individualité pour autant.

C'est cette possibilité de distinction qui fait défaut

dans le monde microscopique (qu'il n'est pas nécessaire ici de définir plus complètement, bien que ce soit possible). En effet, le principe fondamental de la théorie quantique, dit principe d'indétermination de Heisenberg, exclut qu'il soit possible de déterminer de façon rigoureusement exacte à la fois la position et la quantité de mouvement d'un objet quantique : il existe toujours une corrélation entre les indéterminations (intrinsèques, n'ayant rien à voir avec les incertitudes expérimentales) affectant ces deux grandeurs : le produit de ces deux indéterminations doit rester de l'ordre (du côté inférieur) d'une grandeur bien déterminée (le quantum d'action de Planck). En sorte que si l'indétermination sur l'une de ces grandeurs (la position par exemple) est nulle (la position est alors parfaitement déterminée comme en mécanique classique), l'indétermination sur l'autre (la quantité de mouvement) est nécessairement infinie. En physique classique, où il n'existe aucune corrélation entre les indéterminations sur la position et la quantité de mouvement, le fait que l'indétermination sur la position soit nulle n'empêche en aucune façon celle sur la quantité de mouvement de l'être aussi. Une « particule » dont la position est totalement déterminée et la quantité de mouvement totalement indéterminée n'a donc pas grand-chose à voir avec les vraies particules, celles de la physique classique ; en effet, que sa position soit déterminée à un instant donné implique qu'à un instant ultérieur elle ne le soit plus du tout ; la « particule », en effet, se dirige dans la direction de sa quantité de mouvement, direction qui est totalement indéterminée en vertu du principe de Heisenberg. La particule localisée à un instant « se répand » donc dans tout l'espace à un instant ultérieur — ce qui lui ôte toute possibilité d'être suivie à la trace. On est en présence d'un objet nouveau, ni particule ni onde, un quanton.

On conçoit que dans ces conditions il soit impossible, dans la situation envisagée plus haut d'une interaction entre deux entités de même constitution, de savoir ce qui se passe et en particulier, de savoir si ce qu'on recueille dans un détecteur placé le long d'une direction donnée est A ou B (ou les deux à la fois). Les quantons sont indiscernables (on ne sait plus ce qui est A et ce qui est B), et cette indiscernabilité est le fruit d'une nécessité, celle qu'impose le principe fondamental de la théorie quantique (principe de Heisenberg). Des quantons de même nature sont donc identiques, au sens plein, leibnizien du terme, à savoir qu'ils ne forment qu'une seule et même entité au sein de laquelle il est impossible d'effectuer une distinction. Ce que Leibniz pensait être impossible, l'indiscernabilité, se trouve réalisé lorsqu'il ne s'agit plus de feuille, de goutte d'eau, mais d'atomes : les atomes de la physique quantique sont dénombrables mais indiscernables, contrairement à ceux que combattait Leibniz qui étaient à la fois dénombrables et discernables (donc étiquetables en entités séparées).

De cette impossibilité de distinguer deux quantons de même nature la théorie doit rendre compte. Elle le fait en considérant le système des deux quantons

comme une seule et même entité, indissociable, inséparable en parties, a-tomique au sens étymologique du terme. Le formalisme de la théorie impose alors à la représentation de cette entité des conditions de symétrie par permutation des deux quantons constituants : cette représentation doit être ou symétrique ou antisymétrique (changée en son opposé) par une telle permutation. Il s'avère que les quantons se rangent dans deux classes distinctes : ceux pour lesquels la représentation de l'entité que forment deux d'entre eux est symétrique lors de la permutation, et ceux pour lesquels elle est antisymétrique.

Dans le premier cas, il est facile de montrer, en faisant fonctionner le formalisme de la théorie quantique, que l'indiscernabilité conduit à ce que Hermann Weyl n'hésite pas à appeler le principe de Leibniz-Pauli (mais qu'on désigne en général du nom de principe d'exclusion de Pauli) : deux quantons de ce type (les électrons appartenant à cette catégorie) ne peuvent être dans (ou occuper) le même état quantique. De ce principe découlent des conséquences immenses : il permet de comprendre (entre autres) pourquoi les atomes ont des tailles variées augmentant avec le nombre de leurs électrons, pourquoi on ne traverse pas le plancher sous l'effet de son propre poids, autrement dit la résistance et la solidité des... solides précisément ; pourquoi les métaux sont conducteurs de l'électricité, pourquoi la taille de toute une classe d'objets astronomiques diminue lorsque leur masse augmente, etc. Mais les effets de l'indiscernabilité des quantons ne se limitent pas au principe de Pauli. Dans le deuxième cas cité plus haut, celui où la représentation de l'entité que constituent deux quantons de même nature est antisymétrique par permutation des deux constituants, les quantons sont soumis à un principe, non pas d'exclusion, mais bien plutôt de grégarité : ils « ont tendance » à « vouloir » occuper tous le même état quantique. Ce principe de grégarité permet de comprendre des phénomènes longtemps restés obscurs, en particulier le fait que les quantons de lumière (les photons, qui appartiennent à cette deuxième catégorie) forment, quand ils sont nombreux, des ondes.

Les conséquences du principe d'exclusion de Pauli pour les fermions (première catégorie de quantons) et du principe de grégarité qui caractérise la deuxième catégorie (les bosons) se font surtout sentir lorsque ces quantons (indiscernables-identiques) sont en nombre élevé. Plus précisément, il existe une statistique des fermions qui est différente de celle des bosons et qui diffèrent toutes les deux de la statistique des particules ordinaires (classiques). Cela se comprend bien si l'on revient à l'idée d'individu ou d'entité. On a vu que pour Leibniz un individu ne pouvait être défini sans que soit inclus ses rapports au monde (aux autres monades), alors que pour Newton un individu existe par lui-même, indépendamment de l'existence et de l'influence d'autres individus du même type. On sait également que Leibniz s'est intéressé au calcul des probabilités et qu'il a soutenu une thèse intitulée *De arte combinatoria* où est exposée la conception du monde

qu'il développera par la suite en système. Or l'*ars combinatoria*, c'est-à-dire l'étude des possibilités de former des agrégats (combinaisons) d'éléments divers, est la base de la théorie mathématique des statistiques, et c'est sur des considérations statistiques que repose le passage du microscopique au macroscopique, encore appelé mécanique statistique. L'idée fondamentale est que la matière est faite d'atomes (« hypothèse atomique ») dont on connaît le comportement individuel (lois de Newton ou équation de Schrödinger) et qu'il « suffit » de faire fonctionner la théorie statistique pour obtenir les lois du comportement macroscopique de la matière (thermodynamique en particulier, mais pas seulement). On conçoit que dans ces calculs statistiques, où interviennent à chaque instant des combinaisons d'éléments, il soit crucial de définir correctement ce que l'on entend par élément. Il est clair qu'on n'obtiendra pas le même comportement macroscopique si l'on suppose que le système est composé de particules existant par elles-mêmes (des particules classiques ou des atomes à la Démocrite) ou d'entités plus globales, regroupant de façon indissociable deux (ou plusieurs) « particules ». D'un côté on a ce que l'on appelle la statistique de Boltzmann qui permet dans certaines conditions de retrouver les lois des gaz parfaits et qui sert de fondement à la théorie cinétique des gaz (dont l'élaboration fit beaucoup pour accréditer l'idée atomique) et de l'autre les statistiques quantiques (dites de Fermi-Dirac et Bose-Einstein), au nombre de deux puisque l'*ars combinatoria* ne donne pas le même résultat selon qu'on admet un principe d'exclusion ou un principe de grégarité.

Signalons que la théorie quantique est née en grande partie des difficultés rencontrées par les physiciens dans l'application de la statistique de Boltzmann (qui supposait des particules identiques mais discernables, autrement dit des atomes séparables). La statistique de Boltzmann n'étant qu'un cas limite des statistiques quantiques, il n'est pas étonnant que, dans des circonstances expérimentales extrêmes, les résultats expérimentaux n'aient pas correspondu à ce que l'on s'attendait à trouver sur la base de la statistique de Boltzmann, c'est-à-dire en supposant qu'identité et discernabilité sont compatibles (en contradiction avec le principe d'identité des indiscernables de Leibniz). Ce n'est que lorsqu'on eut pris conscience de ce que les atomes n'étaient pas les atomes de Démocrite, c'est-à-dire qu'ils n'étaient pas toujours séparables, qu'on a pu corriger la théorie de manière à la rendre compatible avec les faits expérimentaux — correction qui s'est révélée être une véritable révolution, la révolution quantique.

Pour conclure, il n'est pas inutile de signaler que la non-séparabilité apparaît aujourd'hui comme une caractéristique essentielle du monde et que ce n'est que parce qu'on effectuait des observations trop superficielles, comme disait Leibniz, qu'on a pu pendant des siècles s'imaginer que le monde est séparable, c'est-à-dire constitué d'individualités susceptibles d'interagir entre elles mais qui, avant et après cette interaction,

mènent leur existence indépendamment les unes des autres. L'article « EPR » (Einstein-Podolsky-Rosen) de 1933 a été le premier à montrer qu'il y avait incompatibilité entre le formalisme de la mécanique quantique et l'idée d'entités séparables. Ce formalisme oblige en effet à conclure que deux objets ayant interagi, mais séparés l'un de l'autre par une distance aussi grande que l'on veut, ne sont pas indépendants : une mesure effectuée sur l'un détermine le résultat d'une mesure de même type effectuée sur l'autre. Évidemment, pour Einstein, cette « absurdité » était un argument à l'encontre de la théorie quantique. On s'est aperçu depuis que si, au contraire, on prenait le formalisme de la théorie quantique au sérieux, le monde devait être non séparable — ce que des expériences qui sont en elles-mêmes des exploits techniques ont permis de confirmer.

► ASPECT A., et al., « Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment », *Physical Review Letters*, 49, 91-94, 1982. — BRUSH S.G., *Statistical Physics and the Atomic Theory of Matter*, from Boyle and Newton to Landau and Onsager, Princeton, Princeton Univ. Press, 1983. — LEIBNIZ G.W., *Lettres à Arnaud*, in PRENANT L., *Œuvres choisies*, Paris, Garnier, 1948 (rééd., 1972). — PAULI W., « Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektrongruppen in Atom mit der Komplexstruktur der Spektren », *Zeitschrift für Physik*, 31, 765-83, 1925.

Françoise BALIBAR

→ Atome ; Leibniz ; Quantique.

INDUCTION

LOGIQUE

Le problème

On appelle habituellement « induction » toute forme d'inférence par laquelle on passe d'un ensemble fini d'observations particulières à une conclusion générale, et qui n'est pas de nature démonstrative. Aristote admettait, sous le nom d'*epagôgè*, ce genre d'inférences, mais niait qu'elles aient la certitude propre aux syllogismes démonstratifs. Il y a différentes formes d'inférences inductives, mais la principale est l'induction énumérative (ou « baconienne »), qui part de la prémisse qu'un phénomène a toujours suivi un autre jusqu'à présent, et conclut que ces phénomènes seront toujours associés dans le futur. L'induction peut être aussi hypothétique, quand une hypothèse est inférée comme étant la meilleure explication des données, et on l'appelle en ce sens quelquefois « abduction » (Peirce) ou, dans la terminologie contemporaine « inférence à la meilleure explication ». Par exemple, si je vois le bout des chaussures d'un individu dépasser de derrière le rideau, j'infère qu'un homme se cache derrière le rideau ; cette inférence n'est pas certaine, mais seulement plausible, car les chaussures peuvent, en la circonstance, ne pas contenir leur propriétaire. Tous les

arguments dans lesquels la vérité des prémisses semblerait une bonne raison pour croire en la vérité de la conclusion, sans pour autant l'impliquer, sont quelquefois appelés (par Peirce aussi) « ampliatifs », parce que la conclusion peut présupposer l'existence d'individus dont l'existence n'est pas présupposée par les prémisses. C'est Hume qui, dans la philosophie moderne, a posé le problème du fondement de l'induction (bien qu'il l'ait posé comme un problème portant sur la notion de causalité ; pour une comparaison des deux questions, voir Russell, 1910) : comment un ensemble fini d'observations sur des événements passés peut-il garantir qu'une telle trame d'événements se produira toujours ? Car qu'est-ce qui exclut la possibilité que le cours de la nature puisse changer, et que le passé soit un mauvais guide pour le futur ? En ce sens, l'induction se distingue de la déduction, car les prémisses, dans celle-ci, garantissent toujours la conclusion. L'inférence déductive est considérée par les logiciens comme monotone, au sens où de nouvelles prémisses ajoutées à un raisonnement déductif valide ne changeront rien à sa validité, alors que l'ajout de nouvelles prémisses peut renforcer la fiabilité d'une inférence inductive. Le problème de l'induction menace aussi bien la connaissance commune que la connaissance scientifique. La majeure partie de nos croyances empiriques usuelles, comme l'a remarqué Hume, reposent sur des inductions : « Le pain nourrit toujours », « le soleil se lève tous les matins ». Les lois scientifiques, comme la loi galiléenne de la chute des corps ont la même forme universelle : « Tous les corps tombent avec une accélération constante. » Quel est le fondement de ces affirmations ?

Une réponse possible au problème de l'induction consiste à admettre un « principe d'induction », ou ce que Mill appelle « le principe d'uniformité du cours de la nature (UCN) », de la forme « Pour tout A et pour tout B, quand n A ont été observés être des B, alors tous les A sont B », que l'on pourrait ajouter aux prémisses d'une induction énumérative pour conclure valide-ment à la conclusion générale « Tous les A sont B ». À partir de cette idée, Mill développe diverses méthodes inductives pour déterminer les causes des événements, que l'on a appelées les « canons de l'induction » (méthode de l'accord, de la différence, leur conjonction, méthode des résidus, et méthode des variations concomitantes). Mais qu'est-ce qui justifie UCN, sinon nos observations passées ? UCN ne peut donc être qu'un principe synthétique, *a posteriori*, fondé lui-même sur des inductions, et en ce sens il ne peut fonder ces inductions. On peut cependant contrer cette objection selon laquelle toute justification de l'induction est circulaire si l'on admet que les inférences inductives peuvent néanmoins marcher même si elles ne reposent pas sur un principe universel comme UCN, c'est-à-dire si on ne cherche pas à leur appliquer des critères de validité propres aux déductions. C'est en un sens ce que soutenait Hume quand il proposait une « solution sceptique » aux doutes qu'il émettait sur nos inférences causales, en suggérant qu'elles ne reposent

que sur l'habitude, et sont en général fiables. Une autre réponse possible, suggérée aussi par Hume, et reprise par toute une tradition contemporaine, consiste à considérer que les conclusions des inférences inductives sont seulement probables, soit au sens où elles révèlent des tendances objectives, soit au sens où leur degré de certitude subjective est élevé. Mais quels que soient les critères d'évaluation de ces probabilités, aucune règle générale ne peut être fournie qui nous permette de conclure, de probabilités élevées dans le passé, à des probabilités élevées dans le futur, et en ce sens cette solution ne répond pas au problème de l'induction.

Hume et Mill fondent l'induction seulement dans la nature. Mais Kant soutient que si l'on adopte ce naturalisme, alors la connaissance est impossible. Il en infère que, puisque la connaissance est possible, le naturalisme doit être faux, c'est-à-dire que la connaissance doit être fondée dans des principes *a priori* qui transcendent l'expérience elle-même. Mais précisément, les principes sur lesquels reposent nos inférences inductives et causales peuvent-ils être nécessaires et *a priori* ?

L'option poppérienne

Une réponse plus radicale est celle de Popper, qui nie d'entrée de jeu que la science repose sur des inductions, et que les scientifiques partent d'observations pour inférer des théories générales. Il soutient qu'ils proposent d'abord une théorie, en tant que conjecture, puis qu'ils comparent les prédictions qu'elle implique avec des observations pour voir si elle résiste aux tests et se laisse corroborer (en ce sens Popper semble au moins admettre l'existence d'inductions hypothétiques ou d'abductions). Si ces tests se révèlent négatifs, la théorie est expérimentalement réfutée, et on cherchera une théorie rivale. Si au contraire ces tests sont positifs, la théorie sera maintenue, non pas comme vraie, mais comme conjecture résistante aux tentatives de réfutation. S'il en est ainsi, selon Popper, l'inférence scientifique n'est pas inductive, mais déductive, et par conséquent il ne peut pas y avoir de « logique inductive » au sens déductif du terme : on voit qu'il y a des A qui ne sont pas B (proposition existentielle négative), et on conclut qu'il n'est pas vrai que tous les A sont des B. Le principe sur lequel repose cette conception est qu'il est bien plus facile d'infirmer une théorie générale que de la confirmer : un seul contre-exemple suffit, alors que de nombreux exemples ne suffisent pas. Cela permet à Popper de formuler un critère de démarcation de la science par rapport à la non-science : les énoncés de la première sont réfutables (ou « falsifiables ») alors que ceux de la seconde ne le sont pas. En ce sens l'astrologie, le marxisme, ou la psychanalyse ne sont pas scientifiques, parce qu'un nombre approprié d'hypothèses *ad hoc* peuvent toujours être invoquées à leur appui, alors que la vraie science rejette de telles hypothèses.

La principale objection que l'on peut adresser à la conception poppérienne est qu'elle ne rend compte que

de la connaissance scientifique négative : un seul contre-exemple peut nous dire qu'une théorie est fautive, mais cela ne nous dit pas ce en quoi elle peut être correcte positivement. À quoi Popper répond que ces hypothèses ne sont pas pour nous des objets de croyance, mais de simples conjectures. Mais il semble bien que nous y croyions, et qu'elles nous fournissent des prédictions fiables. Comme Hume, Popper admet que la fiabilité pratique de nos théories n'implique en rien leur fiabilité théorique, qui n'est fondée sur aucun jugement rationnel. Et pourtant, il semble bien qu'il soit rationnel de croire, par exemple, que si l'on se jette par la fenêtre du trente-cinquième étage, on ne tombera pas au sol comme le ferait une plume d'oiseau. La question de l'induction est celle de savoir pourquoi cette croyance est justifiée, alors que Popper nie simplement que cette question se pose. Même si sa conception idéalisée de la science comme ensemble de conjectures est conforme à ce qu'on peut tenir comme la norme du jugement scientifique, la question demeure de savoir pourquoi certaines inférences nous paraissent plus fiables que d'autres, et pourquoi certaines théories dépassent le stade des conjectures pour devenir universellement admises.

On dit souvent aussi que le problème de l'induction ne peut pas se poser, parce que sa formulation sous la forme d'une question au sujet de l'inférence inductive par énumération présuppose que la science procède par accumulation de données d'observation dont on dérive des lois générales, selon une conception positiviste du progrès scientifique, alors que l'examen de la pratique des scientifiques montre au contraire que ceux-ci ne partent pas d'observations pour en inférer des théories générales, mais partent au contraire de ces théories, qu'ils cherchent ensuite à confirmer par l'expérience. On ajoute en général à cela que la notion même d'observations indépendantes des théories est un mythe, et que toutes les données expérimentales sont « chargées de théorie », en sorte que ce que « voit » un savant dans un contexte théorique donné n'est pas ce qu'il « voit » dans un autre, y compris parce que les systèmes d'instrumentations incorporent des théories. Mais même si ces thèses sont correctes, et ont été depuis longtemps bien établies par les historiens des sciences, il ne s'ensuit pas que le problème de l'induction ne se pose pas, car même si l'on admet la relativité de toutes les observations à des théories, la question demeure de savoir ce qui confirme ces théories, et de savoir comment elles peuvent être confrontées à l'expérience. Autrement dit, même si l'on souscrit à une version plus ou moins radicale de « holisme » ou de « cohérentisme » quant à la vérité des théories scientifiques, la question de savoir comment les théories sont confrontées au réel ne cesse pas de se poser. Sauf à souscrire à l'idée radicale et absurde selon laquelle il n'y aurait pas de différence entre les sciences expérimentales portant sur la nature et les sciences démonstratives, la question : « Comment des expériences peuvent-elles confirmer une théorie ? » demeure, et la question de savoir si ces confirmations

expérimentales nous donnent de bonnes raisons de croire en la vérité de cette théorie est celle que pose toute théorie de l'induction. Même la conception popperienne, qui nie que les scientifiques fassent des inductions, est une tentative pour répondre à ce problème. En d'autres termes, même si nous admettons que les sciences ne procèdent pas par de simples généralisations inductives, que la science n'est pas une simple collection de faits, qu'il n'y a pas de méthodes qui garantissent les avancées significatives de la science, ou que la science ne vise pas des théories certaines, aucune de ces concessions n'affecte le fait que nous acceptons les généralisations du sens commun et de la science et que nous nous appuyons sur elles en pratique. En ce sens, il est raisonnable de nous fier à nos inductions, et le problème est de savoir pourquoi.

La fiabilité des inductions

Si l'on admet qu'il est souvent rationnel de croire les conclusions de nos inférences inductives, à quoi tient cette rationalité ? Certains philosophes « du langage ordinaire », comme Strawson, ont soutenu que ces inférences sont rationnelles par définition, en vertu du sens même du mot « rationnel » : par définition un individu, qui, par exemple, refuserait systématiquement de manger du pain sous prétexte que les cas passés, aussi nombreux soient-ils, où il s'est nourri avec du pain ne lui ont pas prouvé que le pain était nourrissant, serait irrationnel. En ce sens, la question de la justification des inductions serait un pseudo-problème, parce que le sens même du mot « induction » impliquerait que l'on croit aux inférences correspondantes pour de bonnes raisons. Mais cet argument ne nous dit pas en quoi consistent ces « bonnes raisons » et en ce sens il ne peut résoudre le problème. Une réponse plus satisfaisante, qui a reçu la faveur d'un certain nombre de théoriciens récents (Papineau, Nozick, Kornblith) serait de dire que les inférences inductives sont garanties parce qu'elles sont fiables, c'est-à-dire parce que les processus causaux qui y conduisent produisent de manière fiable des conclusions vraies à partir de prémisses vraies. De tels processus peuvent être ceux que nos mécanismes cognitifs et notre nature biologique nous ont laissés en partage, en sorte que leur fiabilité serait fondée sur l'évolution et la sélection naturelle. Ce serait ainsi une question empirique, et non pas *a priori* que de savoir lesquels, parmi ces mécanismes, sont fiables. On ne manquera pas d'objecter que cette solution (et en général toute solution reposant sur une « épistémologie évolutionniste ») fait une pétition de principe, puisque l'investigation sur ce qui est « naturellement » fiable dans notre équipement cognitif doit reposer sur la science elle-même (la biologie ou les sciences cognitives), laquelle est supposée faire des inductions « fiables », alors que les théories scientifiques, y compris la théorie de l'évolution, peuvent être fausses, et que, précisément, toutes nos inférences « naturelles » ne sont pas fiables. Le défi auquel une conception « fiabiliste » de l'induction doit répondre

est donc celui selon lequel l'induction ne peut pas être fiable en général.

La « nouvelle énigme de l'induction »

Goodman a exposé ce défi sous la forme de ce qu'il appelle « la nouvelle énigme de l'induction ». Supposons que nous définissions « vleur » comme un prédicat qui s'applique à tous les objets qui ont été d'abord examinés avant l'an 2000 et découverts être verts ou qui n'ont pas été examinés avant 2000 et sont bleus. Et supposons que nous cherchions, par des moyens inductifs, à déterminer quelles propriétés ont les émeraudes. On peut noter que toutes celles observées jusqu'à présent sont vertes, mais rien ne nous interdit non plus de dire, inductivement, qu'elles sont « vleues ». Mais ces deux conclusions ne peuvent être vraies en même temps, car certaines émeraudes ne pourront être examinées qu'après 2000. La première implique que ces émeraudes seront vertes, alors que la seconde implique qu'elles seront bleues. L'une doit être fautive, et pourtant ces deux conclusions sont obtenues par induction. La morale de l'argument est qu'à moins d'imposer des restrictions aux objets qui figurent dans nos inductions, il y aura bien trop d'inductions sur ces objets pour obtenir des conclusions vraies. À partir de n'importe quel prédicat « normal » comme « vert » on peut inventer une infinité de prédicats « bizarres » comme « vleur » qui conduiront à des conclusions inductives fausses. Goodman appelle les prédicats du premier type « projectibles » (dans le futur) et les prédicats du second type « non projectibles » : la « nouvelle énigme » est celle de savoir comment les distinguer adéquatement, et Goodman soutient que ce n'est pas possible par principe. Mais il soutient néanmoins que les prédicats projectibles sont ceux qui ont été « renforcés » par nos pratiques inductives dans le passé. Cela ne répond pourtant pas à la question même, posée par Goodman, de savoir quel est le critère de la projectibilité. Dire, par exemple, que les prédicats projectibles sont ceux qui correspondent à des « espèces naturelles » nous renvoie à nouveau à la question de savoir comment l'induction nous permet de grouper des objets sous une même espèce naturelle. Ou encore dire que les prédicats projectibles sont ceux qui sont susceptibles de figurer dans des généralisations nomologiques ou des lois, ne résout pas le problème de Goodman non plus, puisque ce problème est précisément celui de savoir ce qui distingue une généralisation authentique d'une généralisation seulement accidentelle.

Confirmation et probabilité

Le fait que certaines inférences inductives semblent être plus justifiées que d'autres peut nous inciter à chercher selon quels critères les inductions peuvent être fiables. Une partie de cette entreprise a consisté à déterminer à quelles conditions un certain ensemble d'observations peuvent confirmer une hypothèse. Il est

naturel de supposer que si une hypothèse est hautement confirmée par les données, on pourra être raisonnablement sûr de sa vérité, et qu'inversement si elle a un faible degré de confirmation, on n'aura pas confiance en elle. Mais même cette notion intuitive de confirmation fait problème, comme le montre un autre paradoxe (dit « des corbeaux ») formulé par Nicod et repris par Hempel.

Ce paradoxe part de deux principes qui paraissent évidents. Le premier est qu'une hypothèse générale H est confirmée par ses instances observationnelles E (l'observation E que si a est F et a est G confirme l'hypothèse que tous les F sont G). Le second est que si E confirme H, et si H est équivalent à H', alors E confirme H. Or, puisque les deux hypothèses suivantes sont logiquement équivalentes :

(H 1) Tous les corbeaux sont noirs

(H 2) Toutes les choses non noires sont des non-corbeaux,

l'observation suivante, qui confirme (H 2) :

(E 1) Cette chose blanche est une chaussure doit confirmer aussi (H 1), puisque la chaussure blanche est un non-corbeau. Mais comment pourrait-on confirmer que tous les corbeaux sont noirs en observant qu'une chaussure est blanche ? Cela rejoint en partie le paradoxe « vleur » de Goodman, puisque celui-ci montre que a est F et B est G ne peuvent pas toujours confirmer que tous les F sont G, mais le paradoxe des corbeaux se poserait même si F et G étaient des prédicats projectibles. Il ne suffit pas de répondre qu'on doit restreindre d'une manière ou d'une autre le champ des données supposées confirmer une hypothèse, puisque le principe de cette restriction est, à nouveau, précisément celui que devrait nous fournir une théorie de l'induction.

Si la notion de confirmation employée en ce sens logique et qualitatif donne lieu à de telles difficultés, ne peut-on espérer les résoudre en usant d'une notion quantitative de confirmation ? C'est ce qu'ont tenté les théoriciens contemporains qui, de Keynes à Reichenbach, en passant par Carnap et ses successeurs, ont développé une théorie probabiliste de la confirmation des hypothèses, comme fondement pour une logique inductive spécifique. Mais la notion de probabilité peut être comprise en plusieurs sens. Elle peut être comprise, d'abord, au sens subjectiviste, comme la mesure du degré de croyance en une hypothèse, selon l'approche couramment appelée « bayésienne ». d'après le nom du révérend Thomas Bayes qui établit en 1763 une méthode pour calculer la probabilité subjective des hypothèses, et développée au XX^e s. par des théoriciens comme Ramsey, De Finetti et Savage. La probabilité peut être comprise, ensuite, au sens objectif comme la fréquence relative de certains résultats sur des ensembles répétés de tests (plus exactement comme la fréquence relative à la limite sur une suite infinie de tests), selon l'approche de Venn, von Mises, ou Reichenbach, ou comme la disposition objective ou la propension à produire des fréquences relatives fixes à la limite, selon la conception de Peirce, reprise par

Popper et Mellor. En outre, les théoriciens de la statistique du XX^e s., comme Neyman, Pearson et Fischer, ont développé des méthodes sophistiquées d'évaluation statistique des hypothèses. Sans entrer dans les conflits entre ces diverses analyses et leur évaluation, on peut prendre la conception bayésienne comme celle qui est la plus à même d'expliquer le degré quantitatif de confirmation.

Les bayésiens supposent que nos degrés de croyance subjective en la vérité d'une hypothèse sont compris sur une échelle de nombres réels entre 0 et 1, et qu'une donnée empirique E confirme une hypothèse H si le fait d'apprendre E augmente la confiance subjective de quelqu'un en H. La notion centrale de cette théorie est celle de probabilité conditionnelle d'une hypothèse H étant donné E (écrite « P(H/E) »). On dira que E confirme H si et seulement si P(H/E) est plus grande que la probabilité de H elle-même (P(H)). Le théorème de Bayes donne la formule générale de la probabilité conditionnelle d'une hypothèse :

$$P(H/E) = P(H) \times P(E/H) / P(E)$$

autrement dit E confirme H dans la mesure où E est probable (subjectivement) étant donné H, mais improbable autrement. En d'autres termes, si E est très surprenant (comme par exemple le fait que la lumière se courbe à proximité du soleil), mais est en même temps ce à quoi on peut s'attendre étant donné H (par exemple la théorie générale de la relativité), alors E devrait augmenter notre degré de croyance en H. Et si E n'est pas plus probable étant donné H qu'il ne le serait selon une autre hypothèse, alors observer E ne soutient pas plus H (par exemple le mouvement des marées ne confirme pas la théorie de la relativité, bien qu'elle le prédise, parce qu'il est aussi prédit par la théorie newtonienne de la gravitation).

Ce cadre théorique permet de résoudre le paradoxe des corbeaux. Supposons (par exemple) que nous pensions initialement que 1/5 des objets sont noirs, et 1/10 sont blancs. Alors nous estimerons la probabilité que le prochain objet observé sera un corbeau noir sera de 1/50, et la probabilité que ce sera une chose non noire non-corbeau de 36/50. Supposons alors que la probabilité conditionnelle d'un corbeau noir et d'un non-noir non-corbeau, étant donné l'hypothèse que tous les corbeaux sont noirs, soit de 2/50 et de 38/50 respectivement. Nous pouvons appliquer le théorème de Bayes. La probabilité initiale d'un corbeau noir est de 1/50, alors que la probabilité conditionnelle de la même hypothèse est de 2/50. Alors, quelle que soit l'estimation initiale de la probabilité que tous les corbeaux sont noirs, ce théorème nous dira que l'observation d'un corbeau noir doublera cette probabilité. Par opposition, si la probabilité initiale d'un non-noir non-corbeau est de 36/50, la probabilité conditionnelle de cette hypothèse, étant donné la probabilité que tous les corbeaux sont noirs sera seulement de 38/50. Il s'ensuit que l'observation d'une chaussure blanche n'augmentera notre probabilité subjective que de 2/36. Cela donne un sens clair à l'idée intuitive que l'observation

d'un corbeau noir confirmera bien plus l'hypothèse que tous les corbeaux sont noirs que l'observation d'une chaussure blanche. La même analyse s'applique au paradoxe de « vleu » de Goodman : notre degré de croyance subjective que toutes les émeraudes sont vertes doit excéder de loin notre degré de croyance qu'elles sont vleues.

Ainsi la conception bayésienne de la confirmation nous donne une analyse puissante du degré de confiance en une hypothèse. Pour autant, elle n'est pas sans problèmes, car si elle nous montre comment ajuster nos probabilités à la lumière de nouvelles données, elle ne dit pas comment nous déterminons nos probabilités initiales (ou *a priori*), et présuppose ainsi le degré de croyance *a priori* en une hypothèse à lui-même un certain degré de plausibilité. Mais comment évaluer cette plausibilité ? C'était justement encore le problème de l'induction.

Une justification pragmatique ?

Bien que la conception bayésienne permette de donner un sens précis à notre confiance envers certaines inductions plutôt que d'autres, on peut penser qu'elle ne nous fournit aucune prise objective sur les trames naturelles qui, dans la réalité, rendent nos inductions fiables. C'est pourquoi des auteurs comme Reichenbach ont préféré développer une solution en termes de probabilités objectives. Selon Reichenbach, l'induction n'est pas tant une forme d'inférence qu'une méthode permettant de parvenir à des hypothèses, concernant, par exemple la proportion de A qui sont des B. Ces hypothèses ne sont pas vraies, mais sont des sortes de paris, comme ceux que fait un joueur, sur l'état de la nature. L'information acquise après ces hypothèses sera ensuite continuellement corrigée au fur et à mesure qu'une nouvelle information surviendra. Ce sur quoi nous parions, quand nous faisons ce genre de paris, est la valeur d'une proportion dans le monde, que Reichenbach conçoit comme la limite de la proportion observée au fur et à mesure que les cas tendent vers l'infini. « A la longue » ces proportions devraient converger. Tout ce que cela montre est que nos inductions réussiront si les proportions convergent à la limite. Mais si nos méthodes inductives peuvent réussir « à la longue », rien ne garantit qu'elles réussiront pour les cas finis, dans le court terme. Des idées semblables avaient été proposées par Peirce, qui définissait la rationalité de l'induction par son caractère auto-correcteur. Le problème est que le long terme, ce que Peirce appelle « la limite de l'enquête », est un état parfaitement idéal, dont nous n'avons aucune idée.

Il n'en reste pas moins que l'idée sur laquelle repose cette « justification pragmatique » de l'induction, selon laquelle nos inférences inductives acquièrent progressivement une justification par une série d'auto-corrrections, est féconde. Elle ne fournit certes pas une solution au problème du fondement de l'induction, puisqu'elle rejette l'idée, aussi bien rationaliste qu'empiriste, selon laquelle la connaissance empirique

doit être fondée. Le caractère principal de cette connaissance, comme l'ont dit Peirce et Popper, est qu'elle est faillible, et indéfiniment corrigible. Pourtant comment peut-elle reposer sur la connaissance de régularités qui sont néanmoins stables ? Une manière de répondre à cette question peut être de dire que la nature, c'est-à-dire l'évolution, nous a dotés, en tant qu'espèce, de la capacité à acquérir en général, bien que pas nécessairement toujours, des croyances vraies, dont les théories scientifiques sont des élaborations sophistiquées. S'il en est ainsi, le fondement de nos inférences inductives est par définition contingent. Mais le fait que les méthodes que la science, comme le sens commun, emploie soient rationnelles peut ainsi apparaître comme l'effet d'une circularité nécessaire entre nos mécanismes cognitifs et la réalité sur laquelle ils portent. Kant avait en un sens évoqué cette solution, quand il envisageait l'idée d'une « harmonie prétable » ou d'un « système de préformation de la raison pure » comme intermédiaire entre l'empirisme et le transcendantalisme.

C'était aussi ce que disait Mill quand il formulait son principe d'uniformité de la nature. Mais on oublie souvent, quand on critique ce principe au nom d'une forme de scepticisme inductif comparable à celui de Hume, que Mill avançait aussi une pluralité de méthodes inductives. La voie qui reste ouverte, si l'on veut comprendre comment celles-ci sont justifiées, n'est sans doute pas celle qui consiste à rechercher une solution générale au problème de l'induction, mais celle qui consiste à envisager ces diverses méthodes au cas par cas, et selon les diverses disciplines scientifiques. En ce sens, peut-être n'y a-t-il pas une réponse unique à la question de la rationalité de l'induction, mais un ensemble de réponses, relatives aux différents types de justifications inductives et d'inférences causales que nous employons, aussi bien dans la connaissance naturelle que dans la connaissance scientifique.

► BOUDOT M., *Logique inductive et probabilité*, Paris, A. Colin, 1968. — CARNAP R., *Logical Foundations of Probability*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1956. — COHEN L.J., *An Introduction to the Philosophy of Induction and Probability*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1989. — GLYMOUR C., *Theory and Evidence*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1980. — GOODMAN N., *Fact, Fiction and Forecast*, Cambridge (Mass.), Harvard, 1954 (trad. fr. R. Houde & R. Larose, *Faits, fictions et prédictions*, Paris, Minuit, 1984). — HACKING I., *The Logic of Statistical Inference*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1965. — HEMPEL C.G., *Aspects of Scientific Explanation*, New York, Free Press, 1964. — HOLLAND J., HOLLYAK K., NISBETT R. & THAGARD P., *Induction*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1986. — HORWICH P., *Probability and Evidence*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1982. — HOWSO C. & URBACH P., *Scientific Reasoning*, La Salle (Ill.), 1989. — HUME D., *Enquête sur l'entendement humain*, éd. Beyssade, Paris, Garnier/Flammarion, 1986. — KEYNES J.N., *A Treatise on Probability*, Londres, 1921. — KORNBLITH H., *Inductive Inference and its Natural Ground*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1994. — LALANDE A., *Les théories de l'induction et de l'expérimentation*, Paris, Alcan, 1929. — MELLOR D.H., *The Matter of chance*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1972. — MILL J.S., *A System of Logic*, Londres, trad. fr. L. Peisse, *Système de*

logique, Paris, rééd., Bruxelles, Mardaga, 1991. — MILLER D., *Critical Rationalism*, La Salle (Ill.), Open Court, 1993. — NICOD J., *Le problème logique de l'induction*, Paris, PUF, 1924. — NOZICK R., *The Nature of Rationality*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1992. — PAPINEAU D., *Reality and Representation*, Oxford, Blackwell, 1987. — PEIRCE C.S., *Collected Papers*, éd. P. Weiss, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1932. — POPPER K., *La logique de la découverte scientifique* (1935), Paris, Payot, 1971. — RAMSEY F.P., *The Foundations of Mathematics and other Essays*, éd. Braithwaite, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1931. — RUSSELL B., *Problèmes de philosophie* (1910), trad. fr. F. Rivenc, Paris, Payot, 1988. — STOVE D.C., *The rationality of Induction*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1985. — STRAWSON P.F., *Introduction to Logical Theory*, Londres, Methuen, 1952. — WHEWELL W., *The Philosophy of the Inductive Sciences*, Londres, 1847.

Claudine TIERCELIN

→ Abduction ; Axiomatisme et formalisme ; Corroboration ; Dédution ; Induction complète ; Méthode ; Mill ; Probabilité (LOGIQUE) ; Rationalité ; Réurrence ; Réfutabilité ; Validation ; Whewell.

INDUCTION COMPLÈTE MATHÉMATIQUES

Le principe d'induction complète ou induction mathématique apparaît en premier lieu comme un procédé de démonstration en algèbre et en théorie des nombres, souvent appelé démonstration par récurrence. Si on veut démontrer une proposition P pour tous les entiers naturels, il est possible de le faire en deux étapes : 1) On montre P pour l'entier 0 – P(0) – ; 2) On suppose P pour un entier n. On démontre P pour l'entier suivant n + 1 – si P(n) alors P(n + 1).

Ce procédé est étendu à toute proposition mathématique indexée sur les entiers. L'induction incomplète joue un rôle historique et heuristique important. Elle montre une proposition pour un certain nombre d'entiers successifs, et généralise à l'ensemble des entiers sans autre forme de justification. L'induction complète est cette généralisation. Sans elle, l'arithmétique que l'on démontre est très pauvre, et ses résultats n'offrent que peu d'intérêt pour le mathématicien. Elle est ressentie comme un élément essentiel de nos mathématiques.

La procédure démonstrative est clairement énoncée et expliquée chez Blaise Pascal. Si le résultat est montré pour le rang 0, alors il sera montré pour le rang 1, donc pour le rang 2, etc. ; il sera montré pour tous les entiers. Giuseppe Peano transforme ce procédé en un axiome de la construction des entiers naturels, et par là-même en fait un des principes fondamentaux de la mathématique. Le rôle qu'il joue y est bien plus obscur que les axiomes du zéro et de la succession. Il permet de substituer à une infinité de syllogismes potentiels une unique démonstration. En ce sens, il transforme un unique résultat fondé sur l'héritage – ou la succession – d'une propriété pour un entier quelconque en un résultat sur tous les entiers. Ce passage du fini à l'infini est souvent considéré comme un

des moyens pour le mathématicien d'appréhender l'infini.

La procédure d'induction mathématique apparaît quand les mathématiciens considèrent un nombre expurgé de certaines enveloppes anciennes, lignes ou figures, et que les opérations sur les nombres, leurs puissances, et les séries deviennent un champ de recherche. Dans des démonstrations de mathématiciens médiévaux arabes – as-Samaw'al, al-Karaji –, la transmission d'une propriété d'un rang à son successeur intervient pour le développement des puissances successives d'une somme, pour le calcul des coefficients binomiaux, et la somme de séries finies. À l'époque classique, Pierre de Fermat utilise la célèbre méthode de démonstration nommée « descente infinie », fondée sur l'existence d'un plus petit élément dans une réunion d'entiers, dont on peut montrer qu'elle est équivalente à la méthode de récurrence. Aux interrogations que faisaient John Wallis sur la validité de sa propre méthode d'induction incomplète pour le calcul de la somme de séries finies, Jacques Bernoulli répond en y substituant celle consistant à montrer le passage d'un entier quelconque à son successeur, procédé dont il prétend qu'il est tout à fait général. L'induction incomplète est d'ailleurs très largement utilisée comme méthode de démonstration aussi bien en arithmétique qu'en analyse jusqu'au XIX^e s., en particulier dans les travaux où interviennent des séries : elle permet par induction sur les premiers rangs de donner le terme général d'une solution ou d'une série.

Ernst Zermelo ouvrait en 1909 un article par les mots suivants : « Le principe d'induction complète est-il démontrable ou non ? Voilà une question qui dans ces dernières années a préoccupé beaucoup d'esprits. » Les travaux sur les fondements des mathématiques du début du XX^e s. se télescopent sur le terrain de l'arithmétique, et ouvrent sur des extensions de l'induction complète, l'induction infinie et transfinitie. Une conséquence de la construction ensembliste des réels de Richard Dedekind est la nécessité de la faire suivre par une construction des entiers naturels, et de démontrer le principe d'induction complète. Les différentes théories des ensembles – et les différentes logiques –, tout en cherchant à remédier aux antinomies, se devront de déduire la discipline aussi fondamentale qu'est l'arithmétique, et de s'attaquer à l'induction mathématique. Henri Poincaré reste l'ardent défenseur d'un principe qu'il juge essentiel dans les mathématiques, et ses interventions – qui distribuent les bons points entre logiciens, méta-mathématiciens et formalistes –, se recentrent fréquemment sur l'induction mathématique. Est-elle l'un des derniers représentants d'un type de raisonnement mathématique synthétique *a priori*, que l'on a cru avoir éliminé des mathématiques à cette époque ? Poincaré le pensait et voyait en elle le prototype du principe créateur de nouveaux résultats, et le moyen d'éviter la tautologie axiomatique. Il reproche aussi dans sa critique du logicisme, en particulier à Bertrand Russell, de ne voir dans l'induction complète qu'une définition du nombre dans sa théorie des types. D'autant que Russell et Alfred

North Whitehead introduisaient un nouvel axiome, la réductibilité, permettant de pouvoir passer d'un type à l'autre. Pourquoi, demande Poincaré, faudrait-il préférer le deuxième au premier ? Les axiomatiques finitistes se heurtent par nature constamment au problème de l'infini, dans leur preuve de la consistance de l'arithmétique. Après les résultats marquants de Kurt Gödel, David Hilbert lui-même finit par admettre la nécessité de l'induction mathématique transfinitie – plus exactement dans une forme affaiblie –, que son élève Gerhard Gentzen utilise. Il faut accepter comme mode de raisonnement valable dans une méta-mathématique de type hilbertien, l'extension de l'induction complète aux nombres transfinitis de Georg Cantor. Cette extension semble à Gentzen nécessaire et naturelle pour la preuve de consistance de l'arithmétique. Les propositions qu'il considère sont liées les unes aux autres et indexées sur les nombres transfinitis. L'induction transfinitie lui permet de conclure à la non-contradiction de toutes ses propositions. Les raisons qu'il donne à cette intrusion sonnent comme une nécessité somme toute assez pragmatique, due au théorème de Gödel. Différentes suites à l'approche de Gentzen seront données dans la deuxième moitié du XX^e s., en particulier pour la consistance de l'analyse.

- BERNOULLI J., *Opera*, n° XXIV, Dn. Bernoulli Demonstratio, t. 1, Bâle, 1744. – DEDEKIND R., *Stetigkeit und irrationale Zahlen* (1872) et *Was sind und was sollen die Zahlen?* (1888), trad. J. Müller & H. Sinaceur, *Les nombres. Que sont-ils et à quoi servent-ils*, Paris, Omica, 1979. – FREUDENTHAL H., « Zur Geschichte der vollständigen Induktion », *Archives internationales d'histoire des sciences*, vol. 6, n° 22, 1953. – GENTZEN G., « Die Widerspruchsfreiheit der reinen Zahlentheorie », *Mathematische Zeitschrift*, 39, 1935, p. 176-210 et 405-431 (trad. angl. M. E. Szabo, *Collected Papers of Gerhard Gentzen*, Amsterdam, 1969). – HILBERT H. & BERNAYS P., *Grundlagen der Mathematik*, Berlin, Springer, 2 vol., 1934-1939. – PASCAL B., *Traité du triangle arithmétique* (1665), *Œuvres complètes*, texte établi, prés. et annoté J. Mesnard, Paris, Desclée de Brouwer, 1970, t. 2. – POINCARÉ H., *La Science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902 ; *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 1908. – RASHED R., « L'induction mathématique : al-Karaji, as-Samaw'al », *Archives for History of Exact Sciences*, vol. 9, n° 1, 1972. – RUSSELL B., *The Principles of Mathematics*, Cambridge, 1903 ; *Introduction to Mathematical Philosophy*, Londres, 1921. – ZERMELO E., « Sur les ensembles finis et le principe d'induction complète », *Acta mathematica*, n° 32, 1909, p. 185-193.

Jean-Pierre SUTTO

→ Axiomatisation et formalisation ; Dédution ; Méthode ; Preuve ; Récurrence ; Validation.

INERTIE (Principe d')

Aristote et la scholastique

Tout mouvement doit avoir un moteur. C'est ce qu'affirme Aristote (*Physique*, VII, 1) et le principe semble aller de soi dès qu'on tente de préciser

l'expérience commune de l'effort musculaire, de la traction ou de la poussée. Il faut que la force d'un homme, d'une bête, de l'air ou de l'eau, soit appliquée à l'objet pour le pousser ou le tirer, sinon il n'y aura pas de mouvement, et dès que la force cesse d'agir le mouvement doit cesser. Ou bien il faut admettre que le principe moteur est interne à l'objet en mouvement. Ce dernier cas est celui des mouvements naturels (l'opposé des mouvements forcés ou violents), comme la chute des corps lourds, l'ascension verticale du feu, ou la poussée des plantes. Un être naturel a en lui-même le principe de son mouvement (*Phys.* II, 1). L'expérience montre même, prétend Aristote, que le moteur et l'objet mû doivent être en contact (VII, 2).

Ce n'est chez Aristote qu'un aspect de la causalité, son aspect « moteur ». La nature et l'activité humaine offrent des exemples variés de causes motrices : le médecin pour la santé, le sculpteur pour la statue, le père pour l'enfant, l'auteur d'une loi (*Phys.* II, 3). Il existe d'autres sortes de causes : la matière, la forme ou structure, la fin (le but voulu par l'homme ou l'état achevé accompli par la nature). Mais la cause motrice est particulièrement utile et importante en ce qu'elle peut en général s'analyser selon la grandeur : le mouvement du mobile doit répondre, correspondre à l'action du moteur. Il doit y avoir une certaine proportionnalité qui relie le moteur, l'objet mû et les paramètres de son mouvement (grandeur du mouvement et temps écoulé, *Phys.* VII, 5). C'est vrai de tout mouvement ou changement, et pas seulement du mouvement spatial ; un mouvement peut être un parcours effectué, ce peut être aussi un changement de couleur ou de taille, et le résultat doit encore correspondre à l'action dépensée (voir F. De Gandt & P. Souffrin éd., *La Physique d'Aristote et les conditions d'une science de la nature*, Paris, Vrin, 1991).

Ces intuitions fondamentales se trouvent pourtant en défaut à certains moments de l'expérience courante. Comment justifier le phénomène de l'élan ? N'est-il pas absurde, inintelligible, qu'un caillou lancé en l'air continue « sur sa lancée » comme on dit, alors que la main du lanceur a quitté le caillou depuis longtemps et que la pesanteur interne et autonome agit manifestement dans l'autre sens ? Aristote avait conscience de ce problème et proposait, sans y insister, plusieurs explications possibles (*Phys.* IV, 8 et VIII, 10) : la rémanence de la poussée de l'air, ou le « retour en contre coup » (*antiperistasis*) ; l'air ou l'eau qui est devant le projectile pourrait de proche en proche, en une sorte de cercle, agir sur d'autres portions d'air qui finalement reviendraient pousser le projectile sur sa face arrière. Comme il n'y a pas de vide dans le monde d'Aristote, le milieu ambiant servirait ainsi à entretenir les mouvements.

Les commentateurs d'Aristote discutèrent de cette difficulté. Philopon en particulier, vers l'an 500 de notre ère, critiqua la solution d'Aristote. Pourquoi l'action du milieu vient-elle à s'épuiser finalement ? Si une masse d'air est capable de pousser la masse d'air qui la précède, pourquoi ce processus ne continuerait-il pas indéfiniment ? Si l'air revient pousser le mobile par

derrière, il faut que la poussée de l'air change deux fois de sens, ce qui paraît peu vraisemblable. On observe qu'une masse d'air mue avec une puissance considérable agit très faiblement sur les corps, sans comparaison avec l'effet d'une corde tendue sur une flèche ou de la main sur une pierre. N'y a-t-il pas dès lors quelque chose comme une « puissance de mouvement » (*dynamis kinetike*) conférée au javelot ou à l'air par le lanceur ? (*Commentaire sur la Physique d'Aristote*, in H. Diels, *Commentaria in Aristotelem Graeca*, vol. 16-17, éd. Vitelli, 1887-1888, p. 641, 16 ; 642, 4 ; trad. angl. R. Sorabji, à paraître). Cette *dynamis* incorporelle serait conférée ou impartie au mobile par le lanceur, et l'on sait que des énergies incorporelles peuvent se transmettre même dans le vide, comme c'est le cas dans la vision des couleurs (642, 16).

Le cheminement des idées de Philopon, à travers les philosophes arabes puis latins, est encore mal connu (voir les articles de M. Wolff et F. Zimmermann, in Sorabji R. éd., *Philopon and the rejection of aristotelian science*, Londres, Duckworth, 1987). Une notion semblable est proposée assez précisément par les philosophes du XIV^e s., sous le nom d'*impetus* (on pourrait traduire simplement par « élan »). Jean Buridan développe vers 1340 une critique particulièrement fine de la solution par « contre-coup » et définit ce qu'il appelle *impetus* (*Questions sur la Physique d'Aristote*). Il choisit des contre-exemples très convaincants : lorsqu'un bateau chargé de foin continue à se mouvoir après qu'on a cessé de le haler, le batelier qui est à l'arrière ne se sent pas violemment comprimé entre l'air et le chargement, et même les fétus d'herbe ne sont nullement ramenés par l'air dans le sens du mouvement. D'autre part si l'on considère le mouvement d'une toupie ou d'une meule circulaire qui peut tourner très longtemps sans moteur, il est clair que l'air ambiant ne joue aucun rôle, puisque la toupie ne se déplace pas et que l'air n'a pas à la suivre pour venir remplir la place.

Buridan avance en réponse un principe général : « Tandis que le moteur meut le mobile, il lui imprime [*imprimi*] un certain *impetus*, une certaine puissance capable de mouvoir ce mobile [*quandam vim motivam illius mobilis*] dans la direction même où le moteur meut le mobile, que ce soit vers le haut ou vers le bas, ou de côté ou circulairement. Plus grande est la vitesse avec laquelle le moteur meut le mobile, plus puissant est l'*impetus* qu'il imprime en lui. C'est cet *impetus* qui meut la pierre après que celui qui la lance a cessé de la mouvoir ; mais par la résistance de l'air, et aussi par la pesanteur [...] cet *impetus* s'affaiblit continuellement » (trad. et discussion P. Duhem, *Le système du monde*, vol. VIII, Paris, Hermann, 1958, p. 201-209 ; texte latin in A. Maier, *Zwei Grundprobleme der scholastischen Naturphilosophie*, Rome, 1958, p. 207-214). On notera deux traits qui distinguent cette idée de la notion actuelle d'inertie : l'*impetus* s'affaiblit peu à peu et d'autre part il existe des *impetus* circulaires. Dans cette théorie l'élan devient une sorte d'entité durable, acquise par le projectile.

Galilée

Avec Copernic les questions relatives au mouvement, à sa perpétuation, à ses effets, à sa définition même, sont posées d'une manière plus pressante : si la Terre tourne sur elle-même et autour du soleil, comment est-il possible que nous ne ressentions rien ? S'il n'y a plus de sphères cristallines pour entraîner les corps célestes dans leur rotation – les cieux solides se dissolvent vers 1600, après les observations et discussions de Tycho Brahé – quel moteur peut maintenir les planètes, y compris la Terre, sur leur trajectoire ?

Ce sont en réalité deux questions distinctes. La deuxième question, celle du moteur des planètes, sera abordée franchement et systématiquement par Kepler. Galilée s'en tient à la première et tente de construire un système physique nouveau et cohérent au sein duquel le mouvement de la Terre soit concevable et en accord avec l'expérience commune.

Dans le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* de 1632, après avoir consacré une première Journée à prouver que les cieux ne diffèrent pas du monde terrestre, et que donc la Terre peut être une planète comme les autres, Galilée répond longuement, en une deuxième Journée, aux objections traditionnelles contre le mouvement de la Terre. Il pose en principe que « le mouvement commun à plusieurs mobiles est sans effet et comme nul quant à la relation de ces mobiles entre eux, puisque entre eux rien ne change » (*Dialogue*, p. 142). Tant que l'on reste à l'intérieur d'un système de corps qui se meuvent tous ensemble, aucune expérience ne pourra donc jamais permettre de déceler le mouvement commun du système. Si par exemple à l'intérieur d'une cabine de bateau on regarde les mouches qui volent, les gouttes d'eau qui tombent, la fumée qui monte, si l'on se met à lancer une balle ou à sauter à pieds joints, aucun de ces actes ne peut servir à discerner si le bateau entier avance ou reste immobile – du moins si le mouvement est sans secousse et sans balancement (*Dialogue*, 204).

D'autre part il faut admettre que le mouvement reçu se conserve indéfiniment. Ainsi expliquera-t-on que nous soyons tous entraînés avec la terre qui nous porte, ou qu'une boule lâchée du haut du mât d'un navire en mouvement tombe au pied du mât et non en arrière. L'arme que lance un cavalier garde le mouvement qu'elle avait en commun avec le cheval et le lanceur, elle conserve la « vertu imprimée ». Il y a ainsi deux formes assez différentes de ce qui est pour nous le principe d'inertie : le mouvement d'un système de corps est indécélable de l'intérieur du système ; le mouvement acquis par un corps est conservé.

Le deuxième énoncé sert à Galilée de ressort essentiel dans l'analyse de la chute des corps, exposée dans les *Discours sur deux sciences nouvelles* de 1638 : on suppose que l'impulsion (le *momento*) acquis se conserve, et qu'un autre s'ajoute à chaque instant (*Discours sur deux sciences nouvelles*, 1638, Troisième Journée). En combinant ainsi le principe d'inertie avec la propriété fondamentale de la pesanteur – elle

imprime une nouvelle impulsion à chaque instant –, on obtient la proportionnalité entre vitesse acquise et temps écoulé, d'où Galilée tire la proportionnalité entre l'espace parcouru et le carré du temps.

L'étude du mouvement des projectiles fait intervenir le principe d'inertie sous un aspect encore différent : deux mouvements peuvent coexister et se composer dans un même mobile sans s'empêcher ni se gêner. Ils se superposent, pourrait-on dire, purement et simplement. Si une bille est lancée à l'horizontale, son mouvement rectiligne uniforme viendra s'ajouter au mouvement accéléré de chute, et la trajectoire résultante sera une parabole (*Discours sur deux sciences nouvelles*, Quatrième Journée).

Le principe d'inertie n'est jamais formulé par Galilée de manière aussi générale et abstraite que chez Descartes ou Newton (voir Koyré, *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1966). Il est plusieurs fois question d'un corps qui se mouvrait sans que rien ne le retarde ni ne l'accélère, et Galilée propose l'exemple d'une bille sur un plan où elle ne recevrait aucune incitation à monter ni descendre, c'est-à-dire qui suivrait en réalité le contour de la Terre (« le mouvement sur une horizontale qui ne descend ni ne monte est un mouvement circulaire autour du centre » *Dialogue sur les deux grands systèmes*, p. 64, etc.). Cette neutralisation de la pesanteur suffit généralement à la discussion que mène Galilée. Il y a même des passages où Galilée affirme qu'un mouvement rectiligne indéfini n'existe pas, parce qu'il n'aurait aucun sens : « Il est impossible qu'un mobile ait par nature un principe de mouvement en ligne droite, autrement dit vers là où il est impossible d'arriver, puisqu'il n'y a pas là alors de terme défini » (*Dialogue*, 55). « Le mouvement rectiligne ne peut être éternel et donc ne peut appartenir à un corps naturel » (*ibid.*, 159).

Dans un cas au moins, cependant, l'analyse est plus rigoureuse. Il s'agit de décider si la Terre tourne assez vite pour que les édifices soient démoisés et les rochers et les animaux « chassés vers les étoiles » (*Dialogue*, 205 sq.). Galilée montre alors très méthodiquement que le mobile entraîné dans une rotation, une pierre de fronde par exemple, a tendance à partir dans l'alignement de son mouvement précédent et donc à suivre la tangente du cercle (209). Comme heureusement la Terre est très vaste, cette tendance à l'« extrusion » est facilement contrariée par la pesanteur et reste sans effet.

Descartes et Newton

Chez Descartes le principe est énoncé en toute généralité, au sein d'une construction philosophique *a priori* : « De cela aussi que Dieu n'est point sujet à changer, et qu'il agit toujours en même sorte, nous pouvons parvenir à la connaissance de certaines règles, que je nomme les lois de la nature [...] dont la première est que chaque chose en particulier continue d'être en même état autant qu'il se peut, et que jamais elle ne le change que par la rencontre des autres. Ainsi

nous voyons tous les jours, lorsque quelque partie de cette matière est quarrée, qu'elle demeure toujours quarrée, s'il n'arrive rien d'ailleurs qui change sa figure ; de même que si elle est en repos, elle ne commence point à se mouvoir de soi-même. Mais lorsqu'elle a commencé une fois de se mouvoir, nous n'avons aucune raison de penser qu'elle doive jamais cesser de se mouvoir de même force, pendant qu'elle ne rencontre rien qui retarde ou qui arrête son mouvement » (*Principes de la philosophie*, 2^e partie, § 37). Le mouvement est désormais une qualité ou une propriété du corps, comme sa figure ronde ou carrée. Le mouvement n'est plus conçu comme un passage d'un état initial à un état final (chez Aristote le mouvement va « de ceci à cela », d'un terme à un autre), mais il est lui-même un état, et la constance de la volonté divine nous garantit que chaque chose tend à rester « en même état ». Descartes précise ensuite que chaque partie de matière tend à continuer son mouvement en ligne droite (§ 39), et il prétend que ce principe permettra de rendre compte de tous les phénomènes de la nature : « La force dont un corps agit contre un autre corps ou résiste à son action consiste en cela seul, que chaque chose persiste autant qu'elle peut à demeurer au même état où elle se trouve. » (§ 43).

Newton énonce le principe en des termes voisins de Descartes dans les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* de 1687 : « Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite, si ce n'est pour autant qu'il est forcé de changer son état par les forces qui lui sont imprimées » (Axiome I). La présence de forces imprimées, et en particulier l'existence d'une force centripète pour les planètes, se décelera précisément grâce à la déviation par rapport au mouvement rectiligne uniforme.

Pourtant Newton reste attaché sur un point aux anciennes conceptions, puisqu'il persiste à associer une force au mouvement rectiligne uniforme, la force qu'il appelle « force inhérente » ou « force d'inertie » (définition 3). Le vocable vient de Kepler. C'est dans le contexte des discussions sur les moteurs des planètes que Kepler, le premier, emploie le mot d'« inertie » : la matière est naturellement « inerte », c'est-à-dire paresseuse, opposée au mouvement (voir notamment l'*Astronomia Nova* de 1609, chap. 33-34 ; et Koyré *La révolution astronomique*, Paris, Hermann, 1961, p. 406). Le terme restera attaché au principe dont nous parlons, bien que le contenu soit assez différent. Newton à cet endroit prend d'ailleurs soin de préciser qu'il entend « inertie » en un sens différent de Kepler, et sans y joindre l'idée d'une tendance naturelle de la matière au repos. Ayant défini la « force inhérente (*insita*) à la matière » par laquelle un corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme (déf. 3 des *Principia*), il explique que cette force ne diffère pas de l'« inertie de la masse » ; mais, précise-t-il dans une addition manuscrite, « je n'entends pas ici la force d'inertie de Kepler, par laquelle les corps tendent au repos » (éd. Koyré & Cohen, p. 40). Il faut attendre le siècle suivant pour que

disparaisse la « force d'inertie » et que le mot de force soit réservé à la « force imprimée », à la cause externe qui fait dévier le mobile de son comportement inertiel (voir Euler, *Lettres à une Princesse d'Allemagne*, 1768-1772, 2^e partie, lettre 6).

► ARISTOTE, *Physique*, texte établi et trad. H. Carteron, Paris, Les Belles Lettres, 2 vol., 1983. – DE GANDT F. & SOUFFRIN P. éd., *La Physique d'Aristote et les conditions d'une science de la nature*, Paris, Vrin, 1991. – DESCARTES R., *Principes de la philosophie* (1647), éd. C. Adam & P. Tannery, vol. IX-2, Paris, Vrin, 1964. – DUHEM P., *Le système du monde*, Paris, Hermann, 10 vol., 1958. – EULER L., *Lettres à une Princesse d'Allemagne* (1768-1772), Paris, Charpentier, 1843. – GALILÉE, *Discours sur deux sciences nouvelles*, trad. M. Clavelin, Paris, A. Colin, 1970 ; *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, trad. R. Fréreau & F. De Gandt, Paris, Le Seuil, 1992. – KEPLER J., *Astronomia nova* (1609), in *Gesammelte Werke*, vol. 3, Munich, Beck, 1937. – KOYRÉ A., *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1966 ; *La révolution astronomique*, Paris, Hermann, 1966. – MAIER A., *Zwei Grundprobleme der scholastischen Naturphilosophie*, Rome, 1958. – NEWTON I., *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), éd. crit. A. Koyré & I.B. Cohen, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2 vol., 1972 ; *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (1756), trad. Madame du Châtelet, Paris, J. Gabay, 1989 ; *De la gravitation, Du mouvement*, trad. et comm. M.F. Biarnais et F. De Gandt, Paris, Gallimard « Tel », 1995. – PHILOPON J., *Commentaire sur la Physique d'Aristote*, in DIELS H., *Commentaria in Aristotelem Graeca*, vol. 16-17, éd. Vitelli, 1887-1888. – SORABJI R. éd., *Philoponus and the rejection of aristotelian science*, Londres, Duckworth, 1987.

François DE GANDT

→ Causalité classique ; Constantes physiques ; Force ; Galilée ; Gravitation ; Impetus ; Kepler ; Masse ; Mouvement ; Relativité.

INFINI

SCIENCE CLASSIQUE

On est frappé par la constance et par l'importance de l'idée d'infini tout au long de l'histoire de la pensée. Depuis l'Antiquité, elle est au centre des réflexions tant de ses défenseurs que de ses opposants : elle apparaît comme un enjeu décisif des recherches sur l'être, sur l'Un, sur l'Univers et sur la connaissance. Cet intérêt ne s'est pas amoindri avec le temps. En effet, même si au long de son histoire cette idée connue des fortunes diverses et des développements inattendus, son rôle devint de plus en plus déterminant pour la pensée tant en théologie qu'en métaphysique, en cosmologie et dans les sciences exactes.

a) *Deux attitudes ou options philosophiques opposées*. Deux attitudes générales, mais opposées, s'affrontèrent constamment dans toute la tradition à propos de l'idée d'infini. Il s'agit d'options philosophiques fondamentales, difficilement conciliables que l'on peut synthétiser comme suit : 1) D'une part, en se conformant aux enseignements du langage, l'infini serait un concept négatif. De ce point de vue, seul le fini existe pleinement et l'on ne peut comprendre que ce que l'on peut saisir comme un tout limité. De même

que nous ne pouvons saisir d'une chose avec nos mains que ses limites, sa surface limitatrice, de même notre esprit ne peut connaître que du limité. Dans ce cas, l'infini n'est qu'un résidu indéterminé, informe, insaisissable et inintelligible qui ne se laisse pas appréhender par une réduction au fini. Bref, l'infini n'est qu'une idée négative, finie (donc inadéquate à ce qu'elle désigne), fruit de notre capacité à réitérer une opération (par exemple dans l'acte mental qui permet de reculer ou de nier successivement toute limitation) sans être jamais arrêté par quelque terme ultime, bien que chaque étape de cette opération soit finie en elle-même. C'est donc une illusion qui érige en « pseudo-entité positive » un processus intellectuel fondé sur l'abstraction, sur la négation grammaticale, c'est-à-dire sur le langage. Bref, l'infini ne serait rien d'autre qu'un mirage de l'esprit produit par un simple abus de langage. 2) D'autre part, il faut se défier du langage lui-même parce qu'il est trompeur dans la mesure où il ne fait qu'exprimer la faiblesse de l'esprit humain face à une interrogation sur des entités (l'être, l'Un, Dieu, l'Univers, etc.) dont la portée lui échappe ou dont la grandeur le dépasse. Bref, le langage trahit notre propre finitude qui ne peut elle-même prendre son sens que de la négation de l'infini. Seul l'infini est réel, car il est la plénitude affirmative et positive de l'être, tandis que le fini n'est qu'une limitation particulière et imparfaite (donc illusoire et trompeuse) de l'être total illimité qu'il présuppose. Pour un esprit fini comme le nôtre, connaître c'est attribuer une détermination distincte à quelque élément du réel, c'est donc limiter et mutiler ce dernier, et, comme le dit Spinoza, « toute détermination est une négation » (Spinoza, lettre L, du 2 juin 1674, à Jarig Jelles, Paris, Gallimard « Pléiade », p. 1230-1231). À ce niveau, l'infini est un concept positif, et même le seul concept qui soit vraiment positif puisqu'il exprime l'absolu, le parfait, la pleine souveraineté de l'être total qui exclut toute limitation, toute négation et toute privation. Mises à part quelques exceptions notables, mais d'intérêt secondaire, ces deux conceptions opposées n'ont pas toujours coexisté et leur émergence ne fut pas simultanée. On sait que la conception négative (donc finitiste) s'est imposée dans l'Antiquité, tandis que la seconde n'a commencé à se développer et à s'imposer à son tour qu'à partir de la Renaissance ou, du moins, vers la fin du Moyen Âge.

b) *Les sédimentations sémantiques de l'idée d'infini.* Par-delà ces attitudes philosophiques, ce sont les différentes significations constitutives de l'idée d'infini qu'il convient de distinguer, d'analyser et d'envisager dans leurs relations dialectiques pour en comprendre toute la complexité.

Parmi les sédimentations sémantiques de l'infini, on peut repérer quatre formes de pensée bien distinctes et qui sont tout à fait caractéristiques : un infini privatif, un infini positif en soi (mais, qui n'est concevable que négativement, du fait de la finitude de l'esprit humain), un infini opératoire qui désigne la possibilité de réitérer une opération intellectuelle sans principe interne de limitation, et enfin un infini intuitif immédiatement

donné à notre pensée que rien ne saurait effacer. Bien que ces quatre formes de pensée relèvent de démarches intellectuelles totalement différentes (voire opposées) et dont le fonctionnement peut être décrit avec précision, elles ont interféré et interagissent constamment au cours d'une histoire assez complexe, générant ainsi une dialectique très riche en rebondissements et en inventions de toutes sortes à chaque fois qu'elles furent appliquées par l'esprit humain à certaines questions privilégiées comme : l'univers, Dieu, le temps et l'éternité, l'espace et le nombre, le mouvement, le continu et le discontinu, les séries causales, etc.

La quadruple racine de l'idée d'infini

L'infini privatif comme substrat informe, indéterminé et illimité. — Commençons tout d'abord par élucider le sens de cet infini privatif : pris comme support amorphe préexistant à toute détermination. On ne comprend bien que ce qu'on peut appréhender comme une totalité achevée, bien délimitée, car ce sont les délimitations des concepts et des objets empiriques qui constituent pour notre connaissance finie le support de toute espèce d'intelligibilité, c'est-à-dire leur forme.

De ce point de vue, l'infini privatif apparaissait comme quelque chose d'informe, d'insaisissable, revêtant une série de connotations extrêmement péjoratives. En effet, le terme grec *d'apeiron* présente un *a* privatif qui désigne ce qui est à la fois indéterminé et illimité. La racine $\sqrt{\text{Περ}}$ signifie en général percer, traverser, franchir et le mot *peras* désigne la borne, la limite et l'extrémité. Le calque latin *in-finitum* conserve ce même caractère privatif : ce qui est sans terme et sans but, ce qui ne saurait donc être ni franchi, ni parcouru, ni parachevé.

Cet infini amorphe était conçu en lui-même comme une entité infra-rationnelle, chaotique, ou un abîme sans fond. Toutefois, la pensée réussit à l'investir indirectement en lui assignant le statut de corrélat objectif de toute opération de mise en forme et de passage à la détermination. C'est ainsi que cet adjectif substantivé fut élevé à la dignité d'un principe métaphysique par certains philosophes anciens qui interprétaient l'ensemble des changements survenant dans le tout de l'univers à l'aide du couple d'opposés que sont la Limite et l'illimité. L'infini privatif est le principe indéterminé de toute morphogénèse : qu'il s'agisse de la formation du monde sous l'action du « démiurge », des transformations naturelles, ou même des productions artisanales ou artistiques. L'inachèvement de cet *apeiron* désigne l'être imparfait qui laisse toujours à désirer et ne parvient jamais à la souveraineté de la finition : il est ce qui n'en finit pas de finir, infiniment éloigné de son accomplissement définitif. Cette figure privative de l'infini trouvait son illustration symbolique dans la pensée mythique : telle la béance abyssale d'un gouffre sans fond dans le *Chaos* d'Hésiode, ou même le châtiment des Danaïdes condamnées à remplir un tonneau sans fond. C'est la forme même de la vie de plaisir (que Platon comparait à celle d'une

éponge, cf. *Philèbe*, 21c) en tant qu'elle est engagée dans un processus frénétique et illimité d'accroissement (ou de diminution) sans jamais pouvoir atteindre la satiété.

À cette infinité amorphe, les Anciens opposaient la finité de la forme parachevée, c'est-à-dire ce qui a atteint sa fin propre, la plénitude de l'être sans privation, et qui est souverainement enclose dans l'invariance de ses déterminations. Une dernière acception de cet infini privatif désigne également une pluralité innombrable, c'est-à-dire telle qu'aucun nombre, si grand soit-il, ne saurait la contenir parce qu'elle est inépuisable. C'est le cas des mondes innombrables dont Anaximandre disait qu'ils ne cessent de se former et de se désagréger au sein du Tout de l'univers (cf. M. Conche, *Anaximandre, Fragments et Témoignages*, Paris, PUF, 1991, p. 102).

L'infini positif existant en acte. — Une tout autre orientation s'est développée au sein de la métaphysique et de la théologie traditionnelles, sans pour autant supprimer totalement le premier niveau de signification : elle débouche sur un infini positif existant par soi et donc synonyme d'Absolu, même s'il reste négatif pour notre esprit fini. Cette fois, l'infini ne désigne plus un principe, mais l'attribut essentiel de l'Être suréminent ou de la substance par excellence. Cette lente refonte du concept ne fut opérée qu'au cours d'une longue série de modifications complexes dues essentiellement à des considérations théologiques depuis le stoïcisme et le néoplatonisme jusqu'à la fin de la Renaissance. Cette refonte, occasionnée par la confluence de la pensée grecque et de la tradition biblique, aboutit à l'idée d'un infini existant en acte, opérant ainsi un renversement des valeurs et une transformation décisive de l'idée de Dieu.

L'émergence de cet infini positif découle d'une nouvelle façon d'employer le schème linguistique du comparatif et du superlatif pour désigner l'Être suprême. Dans la plupart des langues indo-européennes, le comparatif et le superlatif représentent une structuration linguistique (adverbiale ou non) de la gradation des quantités et des qualités. L'estimation de la supériorité, de l'infériorité ou de l'égalité relève de concepts comparatifs. Or, c'est surtout le superlatif qui intéresse au premier chef le problème de l'infini positif. Deux cas peuvent se présenter : ou bien le superlatif établit une supériorité par comparaison avec d'autres êtres ou d'autres objets (superlatif relatif), ou bien la supériorité en question est portée à un degré si élevé qu'elle ne relève plus d'aucune comparaison possible (superlatif absolu). C'est dans ce dernier cas que l'on a affaire à l'idée d'un infini entendu comme Maximum-indépassable, situé au-delà de toute gradation possible. Bref, ce qui excède toute mesure et qui est proprement incommensurable (comme l'immensité divine), ce qui échappe à toute proportion possible, excluant toute limite assignable, peut être dit infini : c'est un concept-limite. En métaphysique, cet infini est synonyme d'absolu et ne s'applique traditionnellement

qu'à Dieu qui est visé comme le pôle suprême de l'être et de la pensée, comme l'Être souverainement parfait (saint Augustin écrit à propos de Dieu in *Tractatus in Iohannem*, I, 1, 8 : « Une certaine substance vivante, éternelle, toute-puissante, infinie, qui est partout présente »).

La démarche intellectuelle de la gradation superlative part du principe qu'il ne peut pas ne pas exister un Maximum insurpassable dans toute espèce de gradation. C'est chez saint Anselme que l'idée d'un Maximum-indépassable est affirmée avec la plus grande vigueur en un sens transcendant, bien que le terme d'infini soit totalement absent du texte, où il est question de « la grandeur suprême » (saint Anselme, *Monologion*, chap. I, Paris, Aubier, 1947, p. 75) et « seule supérieure à toutes les autres d'une supériorité absolue » (*op. cit.*, chap. IV, p. 78-79). Cette grandeur insurpassable de Dieu dépasse la pensée elle-même. Penser Dieu, c'est éprouver l'impossibilité d'atteindre l'être divin au terme d'un accroissement continu de la grandeur. Alors que je puis toujours concevoir une quantité plus grande que toute quantité donnée, dans le cas de l'idée de Dieu je ne puis rien concevoir qui le dépasse en grandeur, sous peine de sombrer dans une contradiction interne. Du reste, l'énoncé d'Anselme était de forme négative afin de souligner que Dieu est un absolu, qui relève d'un autre ordre et transcende ce qui pourrait être atteint par le mouvement continu de la pensée gradative : « [Seigneur] [...] nous croyons que tu es quelque chose dont on ne peut rien concevoir de plus grand » (saint Anselme, *Proslogion*, Paris, Vrin, 1967, chap. II, p. 12-13). Dieu n'est pas l'être le plus grand de tout ce que nous concevons, mais il est tel que rien de plus grand ne saurait être pensé.

Puisque l'infini est au-delà de l'être et de la forme, comme l'ont diversement reconnu les néoplatoniciens (cf. Plotin, *Ennéade*, V, 3, 13) et saint Augustin (*Contra Adimantum*, XI), il conduit la pensée au seuil de l'ineffable. Tel est le point de départ de la théologie négative qui s'élève vers la plénitude infinie et inépuisable de Dieu en niant toute forme particulière de détermination ou de négation (car « toute détermination est une négation »). Le langage nous dupe en nous laissant croire que l'infini est un concept négatif ou dérivé sous prétexte que le mot lui-même est formé à l'aide de la particule négative ou privative : *a-peiron* ; *in-finitum* ; *in-fini* ; *in-finite* ; *un-endlich*, etc. Seul l'infini est le positif en soi, car il exclut toute limitation ou négation, il est donc absolument premier ; tandis que le fini présuppose toujours quelque chose d'autre que lui-même qui l'englobe, le dépasse et, peut-être même, le fonde. En ce sens, le plus incompréhensible n'est pas l'infini, mais le fini.

L'infini opératoire. — Examinons enfin une dernière forme d'infini : l'infini mathématique (depuis l'Antiquité jusqu'à la fin de l'âge classique) que l'on pourrait appeler l'infini opératoire. L'infini mathématique traditionnel ne désigne pas un être substantiel, mais un processus opératoire dont la loi structurante ne

contient, en elle-même, aucun principe de limitation. Le nombre (entier naturel) avait été conçu par les Grecs comme « une multiplicité composée d'unités » (cf. Euclide, *Éléments*, VII, Déf. 2). Or, cette « collection » supérieure à l'unité ne connaît aucun Maximum, bien qu'elle parte d'un Minimum indivisible. Contrairement au schème linguistique du superlatif absolu, le schème opératoire qui réunit les unités pour composer tout nombre donné, n'est arrêté par aucun principe de limitation à quelque rang que ce soit : « Alors le nombre est infini en puissance et non en acte, mais le nombre considéré peut dépasser toute quantité déterminée » (Aristote, *Physique*, III, 7, 207b 2 – 13, t. 1, p. 107).

Puisque ce schème opératoire est un processus illimité, il ne saurait parvenir à une totalité achevée, et la suite des nombres entiers ne peut être prise pour un tout, bien que chaque nombre soit lui-même une totalité partielle. Donc, l'idée du nombre de tous les nombres était un non-sens pour les Anciens et les classiques : ce serait en effet la totalité achevée d'un processus illimité. C'est pour cette raison qu'Aristote affirme que l'infini mathématique n'existe qu'en puissance. Cette infinité potentielle introduit une nouvelle forme d'être : ce n'est donc plus le fond indéterminé qui précède toute détermination, mais l'être inachevé ou imparfait qui possède une tendance déterminée à être ce qu'il n'en finit pas de devenir. Cet infini potentiel garantit que « n'importe quelle quantité puisse toujours être dépassée », comme le veut l'axiome d'Archimède. La ruse du potentialisme aristotélicien c'est d'avoir permis aux mathématiciens de contourner les difficultés liées à la notion d'infini (Aristote, *ibid.* 207b 27 – 31, p. 108 : « En réalité, les mathématiciens n'ont pas besoin et ne font point usage de l'infini, mais seulement de grandeurs aussi grandes qu'ils voudront, mais limitées »). Or, c'est un fait que ce potentialisme a régné sur les mathématiques jusqu'au milieu du XIX^e s. ; on en retrouve même la trace dans la théorie cantorienne des ordinaux. De nos jours, l'intuitionnisme mathématique de Heyting considère que la pensée humaine finie construit pas à pas ses raisonnements et ne peut admettre un infini actuel dans une démonstration.

Toutefois, Aristote traitait différemment les grandeurs ou quantités continues. D'une part, il a très bien vu que la grandeur est divisible à l'infini et ne comporte pas un dernier terme indivisible, contrairement à la suite des entiers (Aristote, *op. cit.*, 7, 207b 10 – 11, p. 107 : « Les dichotomies de la grandeur sont en nombre infini »). Donc il existe un infini potentiel dans un segment de droite fini, ce qui lui permet d'éviter les apories de Zénon : on peut découper en pensée des intervalles dans le continu sans y introduire de rupture. Cependant, il n'admet pas à l'inverse que l'on puisse additionner à l'infini des grandeurs extensives, contrairement au cas des entiers naturels, non pas en vertu d'un principe mathématique de limitation, mais pour des raisons cosmologiques étroitement liées à son ontologie : « Ainsi, puisqu'il n'y a pas de

grandeur sensible qui soit infinie, il ne peut y avoir de grandeur qui dépasse toute grandeur déterminée, car ce serait une chose plus grande que le ciel » (Aristote, *ibid.*).

En revanche, les *Éléments* d'Euclide, contiennent des énoncés qui admettent, plus ou moins directement, l'infinité de l'espace géométrique. Tel est bien le cas de la définition des parallèles : « Des droites parallèles sont celles qui étant dans le même plan, et prolongées à l'infini de part et d'autre, ne se rencontrent ni d'un côté ni de l'autre » (Euclide, *Éléments*, I, Définition 23, trad. fr. Vitrac modifiée, Paris, PUF, 1990, t. 1, p. 166). Or, il se trouve que la conception potentialiste de l'infini convenait non seulement aux mathématiciens grecs, mais aussi à l'essor du calcul infinitésimal à l'âge classique. Ce schème opératoire désigne donc le dépassement incessant de tout résultat fini vers une totalisation à jamais ineffaçable (cf. Aristote, *Physique*, III, 6, 206b 33 – 35 : « L'infini est, [...] non pas ce en dehors de quoi il n'y a rien, mais ce en dehors de quoi il y a toujours quelque chose »).

L'infini comme donnée intuitive ineffaçable. – Si l'on met provisoirement à part l'infini opératoire, l'infini se situe tantôt en deçà de toute détermination (infini privatif), dont il constitue pour ainsi dire la limite inférieure, tantôt au-delà (infini positif) puisqu'il transcende toute détermination par son caractère suréminent. Autrement dit, l'infini se situe en dehors de toute schématisation possible. Tout se passe comme si les différents schèmes précédemment évoqués n'avaient qu'une fonction propédeutique destinée à nous reconduire régressivement ou progressivement au monde de l'intuition, c'est-à-dire à une « pure vision intérieure » de l'infini, totale et immédiate, libérée de toutes les contraintes de la représentation figurée ou même d'une quelconque mise en forme symbolique. Mieux, il semble même que cette saisie immédiate (où s'installe d'emblée l'intuition de l'infini) soit exempte, au moins au départ, des difficultés où s'embarrasse le discours. C'est, du moins, ce que tous les partisans de l'infinisme affirment d'une seule et même voix.

Pourtant, si l'on prête attention d'une manière « théorique » à ce qui constitue le « fond » de toute perception, il semble que l'on ait affaire à une sorte de milieu continu que rien ne peut circonscire parce qu'il est toujours « ce dans quoi » s'étend toute limitation et qui préexiste à tout morcellement. C'est l'intuition irrédécible et ineffaçable du continu illimité.

Sans entrer dans des distinctions subtiles entre l'espace perçu et l'espace pensé, et corrélativement entre l'intuition sensible et l'intuition intellectuelle, il semble que la spatialité sous-tende et accompagne toutes nos représentations. Dès lors, les figures se présentent comme des limitations de l'espace, mais puisque toute limite unit en même temps ce qu'elle sépare, alors l'idée d'une limite ultime de l'espace implique en elle-même contradiction. Par conséquent, si l'on revient à l'intuition pure de l'espace, on se trouve en présence d'une sorte de *continuum*

« pré-donné » et illimité sur le fond duquel les choses singulières se détachent comme autant de limitations ou de négations particulières. Ce qui est premier, c'est donc l'intuition de la continuité illimitée de l'espace, à l'intérieur duquel seule une activité morcelante pourrait découper ou isoler une multitude de parties, dont aucune synthèse ne permettrait de comprendre l'intégrité indivise. Ainsi, c'est dans cette intuition massive et ineffaçable du continu que s'était investie toute l'attention de Parménide, qui avait pourtant affirmé que l'être Un, Immuable et Continu « est de toutes parts borné et achevé » (Parménide, Fragment B VIII, in *Les Présocratiques*, trad. Dumont, Gallimard, « Pléiade », Paris, 1988, p. 262). Apparemment, Parménide n'éprouvait aucune gêne à affirmer à la fois l'étalement spatial de l'être et sa fermeture sur soi. Cependant, il semble que son disciple Zénon ait perçu les difficultés que soulevait cette double affirmation, puisque, comme Aristote nous le rapporte : « L'aporie de Zénon réclame une explication. Car, si tout étant est dans un lieu, il est évident qu'il devra exister un lieu du lieu, et ainsi de suite jusqu'à l'infini » (Aristote, *Physique*, IV, 1, 209a 23 – 26, Paris, Belles-Lettres, t. 1, p. 125).

Toutefois, pour échapper à cette aporie qu'est la régression à l'infini, Zénon préférait réduire l'extériorité spatiale, comme le mouvement, à une vaine illusion. En revanche, il semble que l'affirmation par Mélissos de l'infinité massive de l'être et du Tout lui ait permis d'éviter, d'une certaine manière, l'objection de Zénon (Aristote, *Physique*, I, ii, 185a 32 : Mélissos déclare que l'être est illimité).

À l'autre pôle de la pensée, l'idéalisme critique de Kant ne voit aucun inconvénient à admettre que l'espace et le temps soient donnés comme des grandeurs infinies dès l'instant que l'on a compris que ce sont des intuitions *a priori* et non pas des concepts. Mieux, c'est même l'infinité de l'espace et du temps qui permettent de prouver et de garantir leur caractère intuitif et entièrement *a priori*. La preuve de l'intuitivité consiste à montrer que le tout de l'espace ou du temps est quelque chose de plus et d'autre que la somme ou que la synthèse de ses parties : donc que le tout est antérieur à ses parties et ne saurait être donné qu'immédiatement ou pas du tout. C'est ainsi que Kant écrit : « L'infinité du temps ne signifie rien de plus, sinon que toute grandeur déterminée du temps n'est possible que par des limitations d'un temps unique qui lui sert de fondement. Il faut donc que la représentation originnaire du temps soit donnée comme illimitée. [...] il faut qu'une intuition immédiate leur serve de fondement » (Kant, *Critique de la raison pure*, AK III, 58 ; trad. fr. Pléiade, t. 1, p. 793).

Toutefois, il convient de distinguer entre l'infinité spatiale et l'infinité temporelle. En effet, tandis que les parties du temps sont successives, celles de l'espace sont *simultanées* : elles coexistent *tot et simul*, comme *partes extra partes*. Donc, dans le cas de la durée temporelle illimitée *a parte ante* et *a parte post*, on a néces-

sairement affaire à un infini potentiel. En revanche, si l'on envisage l'espace tridimensionnel, homogène, continu et illimité, on admet nécessairement un infini actuel.

La dialectique de l'infini

Enfin, il nous faut préciser ce que nous avons appelé plus haut la dialectique de l'infini, car c'est essentiellement l'interaction entre ces différentes formes d'infini qui produisit les idées les plus remarquables et les recherches les plus fécondes de la pensée classique en science et en philosophie.

1) Un premier entrelacs dialectique se produit chez les Pères de l'Église lorsqu'ils s'interrogèrent sur le statut ontologique de la suite non bornée des nombres entiers pour l'entendement divin. Dieu étant omniscient et son savoir étant illimité, il ne peut donc avoir une connaissance progressive, donc médiate et changeante, d'un infini qui avait été envisagé jusqu'alors sous une forme potentielle. Saint Augustin souleva le problème le plus vigoureusement en critiquant les philosophes qui prétendaient qu'aucune science ne pouvait embrasser l'infini, pas même la science de Dieu. Certes, chaque nombre entier est fini, mais tous ensemble sont infinis, bien que cette infinité ne constitue pas en elle-même un nombre. Or, il est impensable de refuser à Dieu la connaissance de l'infini, car cela lui interdirait la science des nombres qui est absolument indispensable à la formation du monde, comme l'enseignement Platon. Par conséquent, la science divine est à même de comprendre l'infini en le finissant sur un mode ineffable, puisque la compréhension saisit son objet comme un tout : « Il est certain que toute infinité est, d'une certaine manière ineffable, finie pour Dieu, car elle n'est pas incompréhensible à son savoir » (saint Augustin, *De Civitate Dei*, XII, 18).

Le point décisif ici c'est que les préoccupations théologiques d'Augustin l'ont conduit à admettre que la suite des entiers naturels puisse être conçue à la fois comme infinie et comme une totalité achevée. Tout se passe comme si l'infini ontologique visé par le schème linguistique du superlatif avait absorbé en lui l'infini opératoire. Le caractère discursif du schème opératoire ne peut en effet convenir à la science intuitive de Dieu.

2) Un deuxième chiasme dialectique apparaît au niveau de la représentation de l'espace. En effet, les conceptions finitistes de l'espace ne peuvent affirmer sa finité sans contredire sa continuité ni s'exposer à l'aporie qu'entraîne l'idée d'une limite ultime et absolue (étant donné qu'une limite sépare toujours quelque chose de quelque chose). En revanche, dans le cas des conceptions infinitistes, on ne saurait admettre que l'espace physique soit infini en puissance. Car la potentialité, que l'on conçoit aisément pour l'infinité du temps dont les parties n'existent que successivement, est impensable pour l'espace, du moins dans la pensée classique. Pour la cosmologie classique, les parties de l'espace ne peuvent être conçues que comme

coexistantes *tot et simul*, c'est-à-dire existant toutes ensemble simultanément puisqu'elles coappartiennent à un seul et même univers. Par conséquent, si l'on admet que l'espace cosmique est infini, son infinité ne peut être conçue autrement qu'existant en acte. Tout au plus, on peut considérer qu'à l'intérieur de cet infini actuel, il est possible d'opérer des synthèses ou des constructions successives pour la pensée, mais ces synthèses ne sont nullement constitutives de l'espace puisqu'il nous est donné immédiatement dans l'intuition pure. D'ailleurs, c'est ce que Kant lui-même a montré explicitement dans la *Critique de la raison pure* : « L'espace est représenté comme une grandeur infinie donnée. [...] (car toutes les parties de l'espace coexistent à l'infini) » (AK III, 53 ; trad. fr., Paris, Gallimard, « Pléiade », t. 1, p. 786).

3) Le troisième chiasme survient dès lors que l'on identifie Dieu et l'Univers, comme c'est le cas des traditions panthéistes ou panenthéistes. Dans ce cas, l'intuition de l'uni-totalité vient se confondre avec l'idée du Maximum-indépassable visée à l'aide du schéma linguistique du superlatif. Dieu ou l'Univers éprouve la totalité illimitée de l'être. Ainsi, le fini est pensé comme une négation ou une limitation de l'être infini, comme l'indique la célèbre formule chère à Spinoza : « Toute détermination est une négation » (Spinoza, lettre L, du 2 juin 1674, à Jarig Jelles, Paris, Gallimard, « Pléiade », p. 1230-1231).

Toutefois, il convient de remarquer que même au sein des conceptions immanentistes et infinitistes, les penseurs comme Bruno ou Spinoza se sont efforcés d'attribuer de façon différente l'infinité à Dieu et à l'Univers. La pensée de l'immanence n'est pas un confusionnisme généralisé. D'où des prouesses de subtilité, le plus souvent très fécondes, pour distinguer entre plusieurs formes d'infini et pour ordonner la série des degrés d'infinité différents. Ainsi Bruno précise : « [Dieu] est tout l'infini, complicativement et totalement ; alors que c'est explicativement et non totalement que l'univers est tout entier en tout » (*De l'Infinito*, 1584, trad. Cavaillé, Paris, Les Belles Lettres, 1995, Premier Dialogue, p. 84-85). C'est d'ailleurs le recours nécessaire à ces distinctions entre diverses formes d'infinis qui a totalement renouvelé la conceptualisation traditionnelle de l'infini.

4) Le chiasme suivant est dû au désir d'utiliser l'infini opératoire comme procédé intellectuel destiné à conduire l'esprit vers l'idée de Dieu. En effet, la mathématique fut en partie aussi, à une certaine époque, tout comme la philosophie, la servante de la théologie. C'est ainsi par exemple que Nicolas de Cues cherchait à illustrer sa conception de l'infinité divine et sa doctrine de la « coïncidence des opposés » à l'aide de procédés géométriques qui font appel à la technique de l'approximation infinie, telle qu'elle figure chez Boèce. Pour Nicolas de Cues, la vérité se situe à l'infini (un infini présumé tel), elle nous reste donc à jamais inaccessible en elle-même, mais il admet cependant que nous pouvons l'approcher par des con-

clusions successives (Nicolas de Cues écrit en ce sens in *De mathematica perfectione*, 1458, éd. Meiner, t. 11 : *Die mathematischen Schriften*, Hamburg, 1980, p. 161 : « Mon intention est de rechercher la perfection des mathématiques < perfectionem mathematicam venari > à partir de la coïncidence des opposés »). C'est bien en cela que consiste la doctrine de la « docte ignorance ». De même que dans l'infinité de Dieu toutes les oppositions sont abolies ou sont réconciliées, de même en mathématiques le minimum ou le maximum constituent des valeurs limites (qu'on ne peut qu'approcher par une « vision intellectuelle ») où les opposés coïncident et les oppositions se résolvent. Ici, on intuitionne que le cercle tend vers le droit à mesure qu'on l'agrandit, donc, à la limite, lorsque le cercle devient infini, il se confond avec la droite infinie (Nicolas de Cues, *De Idiota*, II, 1450, trad. M. de Gandillac, in *Œuvres Choisies*, Paris, Aubier-Montaigne, 1942, p. 243 : « Tu sais que plus un cercle est grand, plus est grand son diamètre. [...] Tu peux constater que l'arc du grand cercle est plus proche de la ligne droite que l'arc du petit cercle. À la limite, la circonférence du cercle infini serait donc une ligne droite. Ce qui prouve que la courbure, qui reçoit le plus et le moins, ne peut exister à l'infini, mais seulement la rectitude »). C'est de la même manière que le Cusain entend démontrer que le cercle contient d'une certaine manière tous les polygones possibles (Nicolas de Cues, *Compléments théologiques*, 1453, trad. M. de Gandillac, in *Œuvres Choisies*, Paris, Aubier-Montaigne, 1942, p. 452-453 : « Plus le polygone a de côtés égaux, plus il a d'angles égaux, et plus il est proche du cercle ; car, par rapport aux polygones, le cercle se définit comme contenant un nombre infini d'angles. Mais si on le considère en lui-même, on ne trouve dans le cercle aucun angle. Il est donc sans terme et sans angle enveloppe en soi toutes les déterminations angulaires, tous les polygones donnés, tous les polygones possibles »). Donc, la démarche du Cusain consiste d'abord à faire intuitionner mathématiquement l'approximation, puis à l'aide de la *visio intellectualis* la coïncidence des opposés, et enfin il transfère à la théologie la thématique de la coïncidence en considérant la droite infinie, le triangle infini, le cercle infini et la sphère infinie comme autant de symboles du divin. En dépit de l'ingéniosité de la doctrine de la coïncidence des opposés, il faudra des siècles pour élucider la question des quadratures et du passage à la limite en dénouant l'amalgame des spéculations théologico-mathématiques.

L'issue positive de la dialectique

Avec la progressive mise en place de la théologie infinitiste, de la cosmologie infinitiste (qui, comme on l'a vu, est en quelque manière liée à la théologie), et la naissance du calcul infinitésimal, l'infini est devenu un concept complexe et incontournable à la fin de la Renaissance et à l'âge classique. Cela veut dire qu'il

n'est désormais plus question de s'en passer. Or, les Anciens avaient préféré sauver la logique traditionnelle en se débarrassant de l'infini. Désormais, il devient nécessaire d'élaborer des règles logiques nouvelles pour penser l'infini et pour lui faire une place dans l'ontologie. C'est ainsi, par exemple, que Galilée découvrit de son côté que les prédicats d'égal, inégal, plus grand, plus petit, ne peuvent s'appliquer de façon pertinente qu'au fini, mais nullement à l'infini (sous peine de violer le 8^e axiome des *Éléments* d'Euclide selon lequel « Le tout est plus grand que la partie »). Cette idée sera l'un des points de départ des travaux de Bolzano et de Cantor sur la théorie des Ensembles infinis. Enfin, lorsque Leibniz admit son algorithme infinitésimal, il osa franchir le Rubicon ontologique qui séparait à jamais pour les Anciens l'Être du non-Être, en proposant un troisième terme. En effet, il donna un statut ontologique à ce « presque rien » qu'est la grandeur infinitésimale, à mi-chemin entre l'être et le non-être puisqu'elle est une grandeur évanouissante : « On entend par l'infiniment petit, dit Leibniz, l'état de l'évanouissement ou de commencement d'une grandeur, conçus à l'imitation des grandeurs déjà formées » (Leibniz, *Théodicée*, Discours, 70, Paris, GF, p. 91-92). Tout se passe comme si l'être de l'infinitésimale se réduisait en définitive à une sorte de devenir réglé par les lois du calcul. La logique de l'infini restait certes à constituer, mais l'existence de l'infini était devenue indispensable à la philosophie et à la science classiques.

► BOLZANO B., *Paradoxien des Unendlichen* (1851), Leipzig, rééd., Hamburg, Meiner, 1975 ; *Les paradoxes de l'infini*, trad., introd. et notes H. Sinaceur, Paris, Le Seuil, 1993. — COHN J., *Geschichte des Unendlichkeitsproblems*, Leipzig, Engelmann (1896), rééd. Olms, Hildesheim, 1960 ; *Histoire de l'infini*, trad. fr., introd. et notes J. Seidengart, Paris, Le Cerf, 1994. — COUTURAT L., *De l'Infini mathématique* (1896), rééd., Paris, Blanchard, 1973. — GARDIES J.-L., *Pascal entre Eudoxe et Cantor*, Paris, Vrin, 1984. — HOUZEL C. et al., *Philosophie et calcul de l'infini*, Paris, Maspero, 1976. — KOYRÉ A., *Du Monde clos à l'Univers infini* (1962), rééd., Paris, Gallimard, 1988 ; *Études galiléennes*, Paris, Hermann, 1996 ; *Études d'histoire de la pensée scientifique*, Paris, Gallimard, 1973 ; *Études d'histoire de la pensée philosophique*, Paris, Gallimard, 1971. — KRETZMANN N., *Infinity and continuity in Ancient and Medieval Thought*, New York, Cornell Univ. Press., 1982. — LÉVINAS E., *Totalité et Infini*, La Haye, Nijhoff, 1961. — LEVY T., *Figures de l'infini*, Paris, Le Seuil, 1987. — MAHNKE D., *Unendliche Sphäre und Allmittelpunkt*, Halle, Niemeyer, 1937. — MAOR E., *To Infinity and beyond : A cultural history of the infinity*, Birkhäuser, 1986. — MONDOLFO R., *L'infinito nel pensiero dei Greci*, Florence, 1934. — RENOUX X., *L'infini aux limites du calcul*, Paris, Maspero, 1978. — RUCKER R., *Infinity and the Mind, the science and philosophy of the infinite*, Boston/Bâle/Stuttgart, Birkhäuser, 1982. — ZEL-LINI P., *Breve storia dell'infinito*, Milan, Adelfi, 1988. — Coll. : *Infini des Mathématiciens, Infini des Philosophes*, Paris, Belin « Regards sur la Science », 1992. — *Infini des philosophes, infini des astronomes*, Paris, Belin « Regards sur la Science », 1995.

Jean SEIDENGART

→ A priori ; Bruno ; Criticisme.

INFINI MATHÉMATIQUE

La préhistoire

L'infini offre peu de prise à l'expérience immédiate. Des myriades de brins d'herbe dans un pré, c'est un nombre très grand, mais pas infini. On trouverait une image plus suggestive dans les figures en abyme ou deux miroirs face à face. Mais même dans ces cas on poursuit en imagination un processus dont on ne perçoit effectivement que les premières étapes. L'infini cependant est présent dès qu'il y a mathématique. Les Grecs déjà l'avaient rencontré. Par exemple, Zénon d'Elée (v^e s. av. J.-C.) avec ses paradoxes sur la divisibilité à l'infini d'un segment de droite, les Pythagoriciens (vi^e s. av. J.-C.) avec leur découverte de l'incommensurabilité de la diagonale du carré, Eudoxe (début du iv^e s. av. J.-C.) dont la théorie des proportions permet de traiter de tels incommensurables (livre V d'Euclide), Aristote (iv^e s. av. J.-C.) pour qui le continu est « divisible à l'infini en puissance » (livre III de la *Physique*), Archimède (iii^e av. J.-C.) dans ses techniques de rectification et de quadrature.

Les mathématiciens grecs butent donc sur l'infini en cherchant à mesurer des grandeurs ou en voulant définir le continu. Ce faisant, ils le conçoivent généralement de manière négative ou privative : *ἀπειρον* s'oppose à *πέρας* comme l'illimité au limité. On ne peut dénombrer l'infini. L'infini c'est, dit Aristote, « ce qui ne se laisse pas parcourir et n'a pas de limite ». N'ayant pas de limite, il ne peut être « déterminé » et n'existe pas en soi. Si quelque chose comme une substance, c'est-à-dire un être « entier et achevé », était infinie, ne devrait-on pas dire que ses parties aussi sont infinies ? Et ne serait-on pas alors conduit à reconnaître qu'un infini — celui du tout — est plus grand qu'un autre — celui d'une de ses parties ? On a là les deux principes qui empêchent de concevoir un infini en soi ou, comme dit Aristote, « en acte » : l'axiome, énoncé par Euclide au premier livre des *Éléments*, que le tout est plus grand que l'une quelconque de ses parties, et l'assomption qu'il ne saurait y avoir plusieurs infinis dont certains seraient plus grands que d'autres.

Aristote admet la nécessité de penser l'infini, puisqu'il se manifeste dans la divisibilité des grandeurs, dans l'augmentation indéfinie des « unités », dans le mouvement sans commencement ni fin des sphères célestes. Mais pour se garder des apories, il dénie toute existence physique à l'infini. Selon lui, le mathématicien a besoin d'envisager des grandeurs plus grandes ou plus petites que toute grandeur donnée, mais nullement de considérer des totalités infinies en acte, déterminées bien que non limitées. Déterminé ne va pas avec infini. Si le concept mathématique d'infini relève bien de la catégorie de la quantité, c'est seulement en tant qu'infini potentiel, c'est-à-dire quantité qui peut devenir toujours plus grande ou plus petite sans que jamais ce devenir se transforme en entité « actuellement infinie ». Cette victoire conceptuelle de l'infini potentiel sur l'infini actuel traversera les siècles

pour parvenir jusqu'à nous, malgré le recul décisif qu'elle subit au XIX^e s. avec la théorie cantorienne des ensembles infinis.

Pourtant, dès l'Antiquité se fait jour une conception moins négative de l'infini. Henri Lebesgue (1875-1941) observe avec un certain humour qu'« Archimède n'avait pas eu tort de consacrer un long travail au dénombrement des grains de sable puisque, comme il l'avait lui-même noté, il y a des collections infinies ». Plus tard, Pappus (~ 300 apr. J.-C.), Proclus (V^e s. apr. J.-C.), Al-Kindi (IX^e s.), Al-Nayrizi (IX^e-X^e s.), Thabit ibn Qurra (IX^e s.), Avicenne (X^e s.), et d'autres encore ont discuté ou modifié la conception d'Aristote. Les uns pensent que l'infini ne peut être objet d'intelligence ou de mesure, mais l'admettent malgré tout, non pour lui-même mais « en vue du fini », comme dit Proclus. D'autres, résolument infinitistes, acceptent qu'un infini puisse être plus grand qu'un autre ; ainsi l'ensemble des nombres entiers positifs, comparé à celui des entiers pairs. Thabit ibn Qurra soutient cela et ajoute que l'ensemble des entiers pairs et l'ensemble des entiers impairs constituent un cas d'égalité de deux infinis. Les questions débattues se ramènent, du point de vue mathématique, aux suivantes : y a-t-il un infini ou plusieurs ? S'il y en a plusieurs, comment les distinguer ? Comment les comparer ? Un infini peut-il être plus grand qu'un autre ? Quand peut-on dire égaux deux infinis ? Si on diminue un infini d'une quantité finie, le reste est-il encore infini ? Une partie d'un infini est-elle finie ou infinie ? Peut-on augmenter un infini ? Questions qui ne manquent pas de laisser fleurir les paradoxes.

Le calcul infinitésimal

Ces paradoxes vont grever longtemps la mathématisation de l'infini actuel, tandis que le thème de l'infinité divine va introduire, dès le Moyen Âge, la conception théologique d'un infini qualitatif comme mode d'être (en acte) d'un Dieu parfait et omnipotent. La perfection de l'Être suprême contrevient à l'idée aristotélicienne de l'infini indéterminé et en puissance, idée solidaire de la conception d'un monde fini. Mais le fait que cette perfection soit qualitative va doubler l'opposition qualité/quantité d'une disjonction exclusive dans le champ de la pensée entre onto-théologie et mathématique. Spinoza, dans une fameuse lettre à Louis Meyer (1663), opposera encore le « vrai infini », celui de la substance indivisible, au « faux infini », l'infini selon le nombre, objet d'imagination.

Du côté mathématique pourtant, la naissance de la physique galiléenne relance l'ouvrage. La nécessité de définir les concepts de vitesse instantanée et d'accélération, de formuler les lois du mouvement, de généraliser le concept de courbe débouchent sur l'élaboration des concepts de fonction et de différentielle ou fluxion. Le calcul infinitésimal, cette « science de l'infini », introduit la considération d'« éléments infinitésimaux » avec une notation spécifique, lettre pointée pour Newton, dx leibnizien que nous avons conservé.

On y distingue différents ordres d'infini et on détermine des règles pour comparer l'infini au fini et les ordres d'infini entre eux : un infiniment petit, ajouté ou enlevé à une quantité finie, est négligeable car « incomparablement plus petit » qu'elle ; on ne change pas l'ordre d'un infiniment grand en lui ajoutant une quantité finie : par exemple $x + 1\ 000$ est du même ordre que x , quand x tend vers l'infini ; un infiniment grand d'ordre inférieur est négligeable devant un infiniment grand d'ordre supérieur, par exemple x devant x^2 quand x tend vers l'infini ; un infiniment petit d'un certain ordre est négligeable devant un infiniment petit d'ordre inférieur, par exemple dx^2 ou dx^3 devant dx .

Une hiérarchie opératoire, fondée sur la rapidité de croissance ou de décroissance des fonctions représentant les infinis, permet ainsi de donner une réponse à quelques-unes des questions envisagées plus haut. Mais toutes les difficultés ne sont pas vaincues, et les paradoxes n'ont pas fini d'intriguer. Galilée avait ainsi considéré la collection des entiers positifs et celle de leurs carrés et constaté que chaque entier a un carré et que réciproquement chaque carré provient d'un entier positif ; il en avait conclu que les relations d'égalité et d'inégalité ne sont pas valides dans l'infini.

Les fictions de G.W. Leibniz (1646-1716)

Dans son *Analyse des infinis* Leibniz offre « un algorithme nouveau, c'est-à-dire une nouvelle façon d'ajouter, de soustraire, de multiplier, de diviser, d'extraire, propre aux quantités incomparables, c'est-à-dire à celles qui sont infiniment grandes, ou infiniment petites en comparaison des autres ». Mais Leibniz ne remet pas en question la validité de l'axiome euclidien du tout et de la partie, s'efforçant au contraire d'en donner une démonstration. Il se demande donc si le paradoxe de Galilée ne tient pas à ce que l'on considère ces collections comme des tous achevés.

Justement Leibniz conçoit l'infiniment petit ou grand comme des quantités n'ayant pas de consistance en soi et servant d'auxiliaire de calculs avec un résultat final exprimé en termes de quantités finies. Au fond, Leibniz se trouve encore dans l'optique, définie par Proclus à partir d'Aristote, de l'infini considéré seulement « en vue du fini ». Optique solidaire d'un certain substantialisme, qui ne savait comment définir la réalité d'un concept au référent « fluent », sans identité fixe. Un infiniment petit est une quantité « évanouissante », qui est tantôt rien (si on la compare à une quantité finie) et tantôt quelque chose (si on la compare à un infiniment petit d'ordre supérieur) ; un infiniment grand est une quantité asymptotique qui n'atteint jamais la limite infinie vers laquelle elle tend. Ces quantités évanouissantes ou asymptotiques sont, au XVII^e s., la nouvelle version, forgée grâce à l'idée de fonction conçue comme quantité variant relativement à une autre, de la doctrine aristotélicienne d'un infini mathématique en puissance et jamais en acte. Aussi les quantités infinies n'ont-elles pour Leibniz que le statut inférieur de « fictions » abrégant le raisonnement,

semblables aux racines imaginaires des équations. Ces fictions sont « bien fondées », car les symboles qui les dénotent n'introduisent aucune irrégularité dans les calculs. Une fois ceux-ci restreints aux quantités ordinaires. Mais elles ne sauraient être mathématiquement aussi « réelles » que celles-ci. « Le calcul infinitésimal est utile, quand il s'agit d'appliquer les mathématiques à la physique, cependant ce n'est point par là que je prétends rendre compte de la nature des choses », écrit Leibniz.

Or, Leibniz métaphysicien n'hésite pas à réformer la notion de substance de façon à ce qu'elle admette l'infini en acte. Ce qui est entier et achevé n'est pas forcément fini, ni même infini seulement en puissance ; il peut bien être, il est même toujours infini en acte. « Je suis tellement pour l'infini actuel, écrit Leibniz dans une lettre à Foucher, qu'au lieu d'admettre que la nature l'abhorre, comme on le dit vulgairement, je tiens qu'elle l'affecte partout, pour mieux marquer les perfections de son Auteur. Ainsi je crois qu'il n'y a aucune partie de la nature qui ne soit, je ne dis pas divisible, mais actuellement divisée, et par conséquent, la moindre parcelle doit être considérée comme un monde plein d'une infinité de créatures différentes. » La prudence mathématique, qui confine l'infini du calcul à un rôle purement instrumental et auxiliaire, est contrebalançée par un réalisme métaphysique. Une distinction conceptuelle vaut cependant aussi bien en mathématique qu'en métaphysique. Il y a d'une part l'infini formé de parties, qui n'est ni une unité ni un tout, et « on ne le conçoit comme quantité que par une pure fiction de l'esprit ». En ce sens, « les infinis ne sont pas des tous et les infiniment petits ne sont pas des grands ». Leibniz est très clair ! D'autre part, il y a l'infini sans parties, qui est un mais n'est pas un tout, c'est l'infini absolu ou Dieu, « puissance active ayant des quasi-parties, éminemment, mais ni formellement ni en acte » (Lettre à Des Bosses du 1^{er} septembre 1706, *Philosophische Schriften*, II, p. 315). Leibniz fait voir que même dans le monde physique les parties n'existent pas forcément à l'état d'éléments séparés, tels les fameux grains de sable évoqués par Archimède. La division du continu n'implique pas sa composition à partir d'éléments atomiques. Au fond, Leibniz cherche à concilier une divisibilité infinie en acte avec l'idée que ce processus, se continuant sans fin, ne conduit pas à des éléments minimaux. Ce qui est en acte c'est donc le processus lui-même, qui est infini. Par rapport à Aristote, on a seulement gagné de déclarer logiquement compatibles l'idée d'un processus sans fin et celle d'infini en acte. Mais dans un infini en acte il n'y a pas de parties en acte, ce qui signifie qu'on ne compose quantitativement des infinis que sur le mode de la fiction et non celui de la réalité. En dernière analyse, l'infini en acte existe, mais il n'est pas nombrable : « Il n'y a point de nombre infini, ni de ligne ou autre quantité infinie, si on les prend pour de véritables tous » (*Nouveaux Essais sur l'entendement humain*, livre II, chap. XVII). Les opérations arithmétiques ne s'appliquent donc qu'à l'infini potentiel. Face à une

métaphysique infinitiste, la mathématique leibnizienne se maintient dans la tradition définie par Aristote.

L'infini quantitatif en acte de Bernard Bolzano (1781-1848)

L'histoire moderne de l'infini mathématique commence avec Bernard Bolzano. Sous le titre *Les paradoxes de l'infini*, ce mathématicien, qui est aussi bien physicien, logicien, philosophe et théologien a écrit une défense et illustration de l'infini actuel, appuyée sur l'idée que les soi-disant paradoxes qui ont traversé les siècles depuis Zénon d'Élée ne résistent pas à une analyse conséquente. Son but principal est de situer le « véritable » infini dans le champ du calcul et de la quantité plutôt qu'en Dieu, et de faire du concept mathématique le fondement de ses homologues physique et métaphysique. Désormais la théologie est subordonnée à la mathématique de l'infini en acte. Et en celle-ci prévaut bien entendu le point de vue quantitatif. Pour Bolzano, Dieu lui-même n'est infini que parce que nous le concevons comme doué de capacités dont chacune a une grandeur infinie.

Bolzano n'est certainement pas le premier à affirmer l'existence positive de l'infini actuel : Thabit ibn Qurra l'avait fait dès le X^e s., Grégoire de Rimini au XIV^e s. et plus récemment Leibniz, auteur favori de Bolzano. Il n'est pas non plus le premier à apercevoir la possibilité de divers infinis inégaux les uns aux autres : Thabit ibn Qurra, Avicenne, Robert Grosseteste, théologien d'Oxford du début du XIII^e s., d'autres encore l'ont devancé. Il n'est pas davantage le premier à associer l'égalité de deux infinis à la possibilité d'établir une correspondance biunivoque entre leurs éléments : là encore on peut citer Thabit ibn Qurra et Avicenne. Mais il est le premier à tenter de construire un concept purement mathématique et un calcul systématique de l'infini actuel.

La construction du concept se fait selon un parallélisme assez strict entre fini et infini. Même statut logique : l'infini actuel est aussi peu contradictoire que les concepts familiers de nombre entier, ou de fraction. Même statut mathématique : il existe des ensembles infinis en acte, que rien logiquement n'empêche de concevoir comme des tous achevés. Ainsi l'ensemble des entiers, une droite infinie, et même un segment comportent une infinité d'éléments conceptuellement déterminés et saisissables. Car il n'est pas nécessaire d'énumérer tous ces éléments pour en concevoir la totalité ; il suffit de caractériser celle-ci par une ou plusieurs propriétés : une relation de récurrence simple définit la suite des entiers, la donnée de deux points détermine un segment ou une droite. Même statut ontologique enfin : l'infini actuel est bien réalisé partout, comme le proclamait Leibniz, dans le domaine des choses existantes.

Pour ce qui est du calcul, il repose sur les définitions suivantes : un infiniment grand est ce qui est « plus grand qu'un nombre quelconque d'unités », c'est-à-dire plus grand que n pour tout n appartenant à

l'ensemble des entiers positifs ; un infiniment petit est ce dont le multiple par un entier n quelconque est inférieur à l'unité. Ces définitions contreviennent à l'axiome d'Archimède qui veut que pour deux grandeurs inégales il existe toujours un multiple entier de la plus petite supérieur à la plus grande. Bolzano ne remet pas explicitement en question cet axiome. De même, il ne réfute pas expressément l'axiome bimillénaire du tout et de la partie lorsqu'il considère que les ensembles infinis sont précisément caractérisés par l'existence d'une bijection sur une de leurs parties propres. Aussi ne définit-il pas, comme le feront Richard Dedekind et Georg Cantor, l'égalité de deux infinis par l'existence d'une bijection de l'un sur l'autre. Il s'en tient à affirmer comme spécifique de l'infini une propriété tenue pour paradoxale par ses prédécesseurs. Du point de vue de l'ensemble de leurs éléments, le côté du carré et sa diagonale, la suite des entiers et celle de leurs carrés représentent le même infini. Comment préciser cette identité ?

Bolzano reprend la distinction traditionnelle entre nombre et grandeur, en donnant un sens arithmétique à ce dernier terme, généralement rapporté à la géométrie. Ce qu'il appelle l'ensemble des grandeurs comprend les nombres entiers, les fractions rationnelles, les irrationnelles (qui sont pour lui des grandeurs finies, même si leur expression symbolique comporte un nombre infini de parties comme il arrive pour les grandeurs qui sont limites de séries infinies convergentes), enfin, les grandeurs infinies, celles auxquelles on ne peut assigner ni un nombre entier, ni une fraction, ni une grandeur irrationnelle. En langage moderne on dirait que l'ensemble des grandeurs est une extension par les infiniment petits et les infiniment grands de notre ensemble des nombres réels. C'en est donc fait de l'idée restrictive que les infiniment petits ou grands ne sont que des grandeurs variables décroissant ou croissant à l'infini, et considérées pour cette raison comme des quantités données seulement de façon provisoire et fictive. Les grandeurs infinies sont des quantités véritables, mais elles ne sont pas toujours mesurables. Par exemple, la somme d'une série divergente n'est pas mesurable au sens de Bolzano, c'est-à-dire on ne peut en approcher la valeur ni par un nombre entier, ni par une fraction, ni par une grandeur irrationnelle. En revanche, un infiniment petit, disons du type $1/n$ avec n tendant vers l'infini, est mesurable, car il a une valeur infiniment voisine de zéro.

Ainsi, convenablement réactivée, l'antique distinction entre nombre et grandeur permet à Bolzano de neutraliser les arguments leibniziens contre l'infini comme quantité mathématique réelle et actuelle. Mais, pas plus que Leibniz, Bolzano ne conçoit l'extension au domaine de l'infini du concept de nombre proprement dit. L'idée de grandeur infinie est parfaitement recevable, mais celle de nombre infini est contradictoire (§ 16 des *Paradoxes de l'infini*). Si une série infinie convergente a une somme finie, l'ensemble de ses termes n'en est pas pour autant nombrable. Bolzano souligne la dualité de certains objets mathématiques

(série convergente, segment de droite, etc.) qui ont une mesure finie tout en étant composés d'un ensemble infini d'éléments. Et il distingue bien l'opération de mesure, qui présuppose le choix d'une unité de mesure et ressortit à la métrique, de l'opération, purement arithmétique, de compter les éléments d'un ensemble. Pour ce qui est de la première opération on se meut toujours au voisinage du fini, puisque est mesurable toute grandeur dont la valeur peut être exprimée, de manière exacte ou approchée, par une grandeur finie (nombre, fraction ou grandeur irrationnelle). Pour ce qui est de la seconde, l'effectuer implique d'établir une arithmétique infinie proprement dite, « un comptage de la pluralité infinie en elle-même » (*ibid.*, § 28). Pour cela, il faut définir préalablement l'égalité et l'inégalité de deux grandeurs infinies.

Lorsque Bolzano tente de le faire, il tombe dans le piège du fini : l'égalité est définie par l'identité et l'inégalité par l'inclusion stricte. Ainsi un ensemble E qui est une partie propre d'un ensemble F (ou qui est bijectivement applicable sur une partie propre de F) est « plus petit » que F . Bolzano donne l'exemple de l'ensemble des points du segment $[0, 5]$ de la droite réelle, qui est contenu dans le segment $[0, 12]$ et qu'il estime pour cette raison « plus petit » que lui. Mais E est bijectivement applicable sur F , par l'application $x \rightarrow \frac{12}{5}x$. Maintiendra-t-on que E et F représentent « le

même infini », comme Bolzano l'affirme en analysant, d'un point de vue ensembliste, l'exemple de Galilée ? Ou reviendra-t-on à l'axiome séculaire qui pose l'inégalité du tout et de la partie ? Et à quoi sert d'affirmer qu'il y a une infinité d'infinis, dans l'ordre de l'infiniment petit comme dans l'ordre de l'infiniment grand, si on ne donne pas le moyen de « parcourir » arithmétiquement cette infinité ? Si on refuse d'assigner des nombres à tous ces infinis ? L'œuvre de Bolzano laisse ouvertes ces questions.

Le transfini de Georg Cantor

Georg Cantor saute le pas. Le premier acte d'établissement arithmétique du transfini est en effet d'affirmer qu'« il y a, après le fini, un transfini... », c'est-à-dire une échelle illimitée de modes déterminés qui par nature ne sont pas finis, mais infinis, et qui cependant peuvent être précisés, tout comme le fini, par des nombres déterminés, bien définis et distinguables les uns des autres » (*Œuvres*, p. 176). C'est bien la première fois dans l'histoire des mathématiques que l'on parle de nombres infinis ! Du moins de nombres transfinis, c'est-à-dire infiniment grands, car pour ce qui est des nombres infiniment petits, Cantor n'en reconnaît pas l'existence, et il faudra attendre l'analyse non standard pour les voir enfin, en 1966, reconnus comme des entités bien définies.

Les nombres transfinis sont les nombres des ensembles infinis. Cantor est conduit à élaborer la théorie des ensembles infinis en étudiant les points de

discontinuité des fonctions représentables par des séries trigonométriques convergentes. Dans le cadre de ce travail, il définit les nombres réels par des suites de Cauchy de nombres rationnels et formule l'axiome de correspondance bijective entre nombres réels et droite du plan, représentations numérique et géométrique respectivement du « continu linéaire ». Définir arithmétiquement le continu géométrique demeurera le moteur permanent de la construction des nombres transfinis. Cantor commence par distinguer entre nombre cardinal, ce qu'il appelle « Zahl » ou « Mächtigkeit » (puissance), et plus tard « Kardinalzahl », et le nombre ordinal nommé « Anzahl », et plus tard « Ordnungszahl ». La première notion désigne l'opération de compter, indifférente à l'ordre dans lequel sont pris en compte les différents éléments, la deuxième celle de numéroter ou d'énumérer, qui établit un ordre entre les éléments. Ces deux notions sont confondues dans le fini. Quelle que soit, en effet, la façon d'énumérer les éléments d'une collection finie, le dernier élément énuméré, disons le n -ième, marque en même temps le nombre cardinal de la collection, soit n . Mais pour les collections infinies il n'en est pas de même. Prenons des exemples simples. Soient les trois ensembles : $E = \{1, 2, 3, 4, \dots\}$, $F = \{2, 3, 4, \dots, 1\}$ et $G = \{1, 3, 5, \dots, 2, 4, 6, \dots\}$. E , F et G ont le même nombre cardinal, qui est celui de l'ensemble dénombrable des entiers naturels, et des ordinaux différents, respectivement : ω , $\omega + 1$ et $\omega + \omega$. En revanche les ensembles $H_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots\}$ et $H_2 = \{2, 1, 4, 3, 6, 5, \dots\}$, qui n'ont pas le même ordre, ont le même ordinal, le même type d'ordre (et aussi, bien sûr, le même cardinal). Ce qui est identique en eux ce n'est pas l'ordre mais l'énumération : on énumère les éléments comme dans la suite des entiers positifs, peu importe quel élément on a mis à la première place, lequel à la seconde, lequel à la troisième et ainsi de suite. Ce qui compte, c'est la succession des places et non par quoi ces places sont occupées.

Les cardinaux transfinis

Précisons d'abord la notion de cardinal transfini, plus simple en ce qu'elle néglige la structure d'ordre des ensembles considérés. Cantor pose que deux ensembles infinis ont même puissance, ou même cardinal, s'il existe une bijection de l'un sur l'autre. Ainsi en est-il de l'ensemble des nombres entiers et de l'ensemble de leurs carrés, de l'ensemble des nombres pairs et de l'ensemble des entiers, des ensembles de points de deux segments de droite inégaux, etc. Dans chacun de ces couples, les ensembles sont « équivalents », c'est-à-dire ont entre eux une relation d'équivalence (relation réflexive, symétrique et transitive). Comme nous l'avons appris depuis, la relation d'équivalence généralise la relation d'égalité (qui est la plus fine des relations d'équivalence). La définition de l'égalité de deux cardinaux convient aussi bien aux ensembles finis, l'équipotence coïncidant alors avec l'égalité ordinaire. Pour la première fois sont vaincues

les difficultés qui entravaient l'établissement d'une arithmétique transfinitie, et dont la principale était que nul avant Cantor n'avait eu le projet de généraliser au transfini la notion de nombre entier fini.

L'échelle des cardinaux commence par \aleph_0 , cardinal de l'ensemble \mathbb{N} dénombrable des entiers naturels. L'ensemble \mathbb{Q}_+ des entiers rationnels positifs est équipotent à \mathbb{N} . On peut, en effet, ranger les rationnels positifs de façon à mettre en évidence l'existence d'une bijection de \mathbb{Q}_+ sur \mathbb{N} . En 1874, Cantor prouve que l'ensemble des nombres réels algébriques, c'est-à-dire des nombres réels racines d'un polynôme à coefficients entiers, est lui aussi équipotent à \mathbb{N} , mais que l'ensemble \mathbb{R} des nombres réels, qui, en plus des algébriques, comprend les nombres transcendants (comme la constante d'Euler ou le nombre π), n'est pas équipotent à \mathbb{N} . \mathbb{R} a la puissance du continu, notée \mathfrak{C} . La démonstration usuelle aujourd'hui se fait par l'absurde, en utilisant un procédé inventé par Cantor en 1891, le fameux procédé de la diagonale. Puis, Cantor découvre qu'il existe une bijection entre l'ensemble des points d'un carré construit sur l'intervalle réel $[0, 1]$ et cet intervalle lui-même. Autrement dit, la notion de dimension d'un continu n'intervient pas dans celle de cardinalité. Ce résultat le surprend au point qu'il écrit à Richard Dedekind (1831-1916), avec lequel il entretient à partir de 1873 une correspondance régulière : « Je le vois, mais je ne le crois pas. » Il attend l'approbation de Dedekind avant de publier son résultat. Puis Cantor démontre, par la méthode diagonale, que pour tout ensemble infini E l'ensemble des parties de E a une puissance strictement supérieure à celle de E . Ce résultat est absolument fondamental parce qu'il signifie qu'il n'y a pas seulement deux puissances, le dénombrable et le continu, mais une infinité, exactement comme dans le cas des nombres finis. Par exemple, pour être bien persuadé qu'il existe une troisième puissance, différente du dénombrable et différente du continu, il suffit de considérer l'ensemble F des fonctions réelles définies sur l'intervalle réel $[0, 1]$. F a un sous-ensemble propre qui est équipotent au continu, c'est l'ensemble des fonctions constantes ; donc F a une puissance au moins égale au continu ; elle est aussi strictement supérieure au continu (démonstration diagonale). Cantor peut donc affirmer que « les "puissances" constituent l'unique et nécessaire généralisation des "nombres cardinaux" finis ; elles ne sont rien d'autre que des nombres cardinaux infiniment grands actuels, et elles ont la même réalité et la même détermination que les cardinaux finis ; elles diffèrent de ceux-ci seulement par le fait que les règles de leur "arithmétique" s'écartent partiellement de celles qui ont cours dans le domaine du fini ».

En effet, l'addition étant définie pour des ensembles infinis disjoints E et F comme la somme des puissances de ces deux ensembles, égale par ailleurs à la puissance de la réunion de E et F , on a pour le cardinal du dénombrable : $\aleph_0 + n = \aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0 + \aleph_0 + \dots + \aleph_0 = \aleph_0 + \aleph_0 + \dots = \aleph_0$ et pour tout cardinal transfini c , $c + n = c + \aleph_0 = c$. La bijection

entre le carré de côté 1 et le segment réel $[0, 1]$ évoquée plus haut se traduit par l'opération $\mathbf{C} \cdot \mathbf{C} = \mathbf{C}$. L'associativité, la commutativité et la distributivité sont valables pour les cardinaux transfinites.

Un problème reste cependant ouvert, car on ne peut être assuré, à ce stade, de pouvoir toujours comparer deux cardinaux quelconques. Étant donnés deux ensembles E et F , *a priori* quatre cas sont possibles. Il se peut qu'on ait su montrer qu'il existe une bijection de E sur F , et on conclut alors $\text{Card}(E) = \text{Card}(F)$. Il se peut aussi qu'on ait pu montrer que E est équipotent à une partie propre de F et alors $\text{Card}(E) < \text{Card}(F)$, ou que F est équipotent à une partie propre de E et alors $\text{Card}(F) < \text{Card}(E)$. Mais que dire si on ne se trouve dans aucun de ces trois cas ? Pour que la comparaison soit toujours possible, il faudrait que l'éventualité d'un quatrième cas soit exclue. Il faut donc s'assurer de pouvoir ranger tous les cardinaux en une suite, c'est-à-dire en un ensemble totalement ordonné et bien ordonné par la relation « plus grand que ». Là intervient la notion de nombre ordinal.

Les ordinaux transfinites

Un ensemble ordonné est un ensemble muni d'une relation d'ordre, notée \leq , c'est-à-dire d'une relation réflexive, transitive et antisymétrique (soit \mathcal{R} une relation sur un ensemble E . Elle est réflexive si $x\mathcal{R}x$ pour tout élément x de E . Elle est transitive si $x\mathcal{R}y$ et $y\mathcal{R}z$ impliquent $x\mathcal{R}z$ pour tout triplet x, y, z d'éléments de E . Elle est antisymétrique si $x\mathcal{R}y$ et $y\mathcal{R}x$ impliquent $x = y$ pour tout couple x, y d'éléments de E). L'ordre est total si deux éléments quelconques de l'ensemble sont comparables par la relation. Deux ensembles totalement ordonnés sont dits semblables ou de même type s'il existe de l'un sur l'autre une bijection f préservant l'ordre, c'est-à-dire telle que $f(x) \leq f(y)$ pour $x \leq y$. Par exemple, les ensembles $E = \{1, 2, 3, \dots\}$ et $F = \{\dots, 3, 2, 1\}$ n'ont pas le même type d'ordre : on ne peut trouver de bijection f de E sur F telle que $f(1)$ soit le premier élément de F , F n'ayant pas de premier élément.

On distingue ainsi différents types d'ordre selon qu'il y a ou non un premier élément, un dernier élément, et selon que l'ensemble des éléments est discret ou continu. Cantor note ω l'ordre discret avec premier élément et sans dernier élément de l'ensemble des nombres naturels, η l'ordre dense (entre deux rationnels, on peut toujours en trouver un troisième) sans premier ni dernier élément des rationnels, λ l'ordre continu des nombres réels.

Pour pouvoir étendre au transfinites les propriétés de comparabilité et d'induction (on appelle induction la propriété suivante de \mathbb{N} : si une propriété P est vérifiée par le nombre 0 — ou le nombre 1 ou un autre nombre du début de la suite — et si, étant vérifiée par un nombre n , quelconque mais fixé, elle est aussi vérifiée par son successeur $n + 1$, alors elle est vérifiée par tout nombre entier. Ce principe est au fondement du raisonnement par récurrence) valables pour les nombres finis,

il nous faut recourir à la notion d'ensemble bien ordonné. Un ensemble bien ordonné est un ensemble totalement ordonné, dont toute partie propre non vide a un plus petit élément. Un ensemble fini est bien ordonné. La suite infinie des entiers naturels est un ensemble bien ordonné ; de même toute suite indexée par \mathbb{N} . Les types d'ordre des ensembles bien ordonnés constituent les ordinaux transfinites.

Les ordinaux finis : 1, 2, 3, ... forment la classe I des ordinaux, les ordinaux des ensembles de première classe (ensembles infinis dénombrables) forment la classe II des ordinaux, les ordinaux des ensembles infinis non dénombrables forment la classe III. On notera qu'à une seule puissance, par exemple, le dénombrable, correspondent différents ordinaux, toute une classe infinie d'ordinaux. Ainsi les ordinaux de la classe II représentent autant de manières d'ordonner par un bon ordre un ensemble infini dénombrable ; ceux de la classe III toutes les manières d'ordonner par un bon ordre un ensemble infini non dénombrable.

Esquissons la construction des ordinaux transfinites. Cantor note ω le nombre ordinal de la classe I. ω est donc le premier ordinal transfinites succédant à la suite 1, 2, 3, ... tout entière ; on dira que c'est un ordinal limite parce qu'il n'est le successeur immédiat d'aucun nombre de la première classe ; c'est le premier nombre de la seconde classe. Si, en partant de ω , on réitère le procédé de fabrication de la suite des entiers naturels (dit par Cantor « premier principe d'engendrement ») on obtiendra la suite sans dernier élément : $\omega + 1, \omega + 2, \dots, \omega + 1 \nu, \dots$. En passant à nouveau à la limite (« deuxième principe d'engendrement »), on obtient un nouvel ordinal limite : $\omega \cdot 2$. L'application, à partir de $\omega \cdot 2$, du premier principe donne : $\omega \cdot 2, \omega \cdot 2 + 1, \omega \cdot 2 + 2, \dots, \omega \cdot 2 + \nu, \dots$. En réitérant l'application alternée des deux principes d'engendrement, on obtient la seconde classe des ordinaux transfinites, pour laquelle Cantor formule un « principe de limitation », de manière à ouvrir la possibilité d'une troisième classe, etc.

L'addition et la multiplication des ordinaux sont associatives mais non commutatives. Par exemple : $1 + \omega = 1, 1, 2, 3, \dots \neq \omega + 1 = 1, 2, 3, \dots, 1$
 $\omega \cdot 2 = \omega + \omega = 1, 2, 3, \dots, 1, 2, 3, \dots \neq 2\omega = 1, 1, 2, 2, \dots, \nu, \nu, \dots = \omega$.

La distributivité de la multiplication par rapport à l'addition n'est valable qu'à droite, c'est-à-dire que les ordinaux transfinites vérifient seulement : $(\alpha + \beta) \gamma = \alpha \gamma + \beta \gamma$.

Cantor a pensé comme allant de soi le fait de considérer d'emblée des ensembles bien ordonnés parce qu'il cherchait à reproduire dans le transfinites la situation de la suite des entiers naturels. Encore faut-il montrer que tout ensemble (infini) peut être bien ordonné. Zermelo comble cette lacune en 1904. Moyennant son « théorème du bon ordre », il devient légitime de transférer aux ensembles infinis quelconques certaines propriétés des nombres finis. En particulier, on peut prolonger en une induction transfinites l'induction complète ordinaire, laquelle permet d'atteindre un

entier fini quelconque, mais ne permet pas d'atteindre ω , qui n'a pas d'antécédent immédiat.

Un ordinal caractérise donc la classe de tous les ensembles bien ordonnés isomorphes entre eux. Le cardinal d'un ensemble E est le plus petit ordinal équipotent à E . Cette définition explique que la comparabilité des cardinaux soit une conséquence de celle des ordinaux. On peut donc ranger les cardinaux transfinites, les « alephs » en une suite :

$$\aleph_0, \aleph_1, \dots, \aleph_\alpha, \dots, \aleph_\omega, \aleph_{\omega+1}, \dots, \aleph_{\omega \cdot 2}, \dots$$

Le cardinal de la classe II des ordinaux dénombrables est supérieur au cardinal de la classe I. C'est le cardinal du continu. Cantor a cherché toute sa vie à savoir si le cardinal de la classe II est le successeur immédiat du cardinal de la classe I, ou si on pourrait trouver d'autres cardinaux entre eux. En d'autres termes, y a-t-il un cardinal intermédiaire entre celui du dénombrable et celui du continu ? C'est la fameuse hypothèse du continu, inscrite par Hilbert à titre de problème ouvert en tête de sa fameuse liste, proposée au Congrès international des mathématiciens de 1900. La réponse sera donnée en deux temps. Kurt Gödel (1906-1978) démontre d'abord, en 1938, la compatibilité de cette hypothèse avec les axiomes habituels de la théorie des ensembles, dits de Zermelo-Fraenkel. Paul Cohen (né en 1934) démontre, en 1963, son indépendance par rapport à ces axiomes. La conjonction des deux résultats signifie que l'hypothèse du continu est indécidable dans l'axiomatique Zermelo-Fraenkel : on ne peut ni l'y démontrer ni l'y réfuter.

La fini et l'infini : nouvelles controverses

Avec les travaux de Cantor, la querelle de l'infini connaît une nouvelle actualité. Tandis que la théorie des ensembles s'impose comme langage commode pour toutes les nouvelles axiomatisations (topologie générale, théorie de la mesure et de l'intégration, théorie des probabilités), l'échelle du transfinites suscite méfiance ou rejet. Ceux-là mêmes qui adoptent rapidement la théorie des ensembles comme cadre d'exposé pour l'Analyse (Baire, Borel ou Lebesgue) rejoignent l'adversaire acharné de Cantor, Léopold Kronecker (1823-1891), dans son refus d'aller au-delà du dénombrable. Les paradoxes découverts par Burali-Forti (1861-1931) en 1897, par Russell (1872-1970) en 1903, ébranlent d'ailleurs sérieusement l'édifice. Les mathématiciens se partagent en deux camps. D'un côté, les cantoriciens refusent d'être « chassés du paradis » des transfinites et parmi eux, Hilbert, qui fait tant et si bien qu'il invente le programme finitiste où l'on cherche à justifier l'infini à partir du fini. De l'autre côté leurs adversaires : Kronecker, Poincaré, et plus tard, Brouwer et même Hermann Weyl s'en tiennent plus strictement, comme autrefois Aristote, à l'infini potentiel et dénombrable. Ils considèrent, en effet, que seuls les nombres entiers sont l'objet d'une intuition indiscutable, donnée sous forme d'une suite de longueur non bornée, et non comme un ensemble, un tout achevé.

D'après discussions ont lieu à propos d'un équivalent du théorème du bon ordre, l'axiome du choix non dénombrable. Énoncé par Zermelo en 1904, cet axiome stipule que pour toute famille, même infinie, d'ensembles non vides, il existe une fonction (qu'on ne spécifie pas davantage) qui, à chaque ensemble associe un de ses éléments, et permet de constituer ainsi un nouvel ensemble non vide. Comme l'hypothèse du continu, l'axiome du choix est à la fois compatible avec les autres axiomes de la théorie des ensembles et indépendant d'eux.

Ces résultats d'indécidabilité font cesser les controverses, en montrant l'égalité légitimité logique d'options contradictoires. Aussi n'est-on pas étonné de voir fleurir simultanément, depuis la fin du siècle dernier, des mathématiques ensemblistes de plus en plus abstraites : topologie générale, théorie de l'intégration, analyse fonctionnelle, analyse non standard, etc., qui n'hésitent pas à utiliser l'axiome du choix ou un de ses équivalents, et des mathématiques constructives, qui explorent le pouvoir d'expression des méthodes restreintes au fini et au dénombrable.

On doit reconnaître que l'utilisation, de plus en plus systématique, des ordinateurs pousse aujourd'hui le mathématicien à chercher des répliques algorithmiques des disciplines traditionnelles de l'infini et du continu : géométrie, analyse ou topologie. D'où le développement actuel des mathématiques « finitaires », c'est-à-dire fondées sur la base des entiers finis. D'un côté, on y considère que les seules entités effectivement données et les seuls processus effectivement exécutables sont finis. De l'autre, on y cherche à délimiter les moyens (constructions, règles, etc.) qui donnent accès, à partir de processus portant sur des entités finies, aux notions impliquant l'infini. Le « finitisme » de Hilbert n'a pas cessé de porter ses fruits.

Il est amusant de constater que l'Analyse non standard, qui avait, à ses débuts, une option franchement infinitiste et franchement actualiste pour faire accepter l'idée d'une extension non archimédienne de l'ensemble des nombres réels par des éléments infinis, se tourne elle aussi aujourd'hui vers des techniques finitaires. Des travaux récents introduisent en effet un modèle finitaire des nombres réels et du continu, en jouant sur deux échelles de grandeurs. Vu de près, un nombre réel est défini par un halo de nombres entiers. De loin, c'est-à-dire à une échelle macroscopique, le conglomerat de ces halos a toutes les caractéristiques du continu, indissociable de l'infini croyait-on d'Aristote à Cantor. On tend ainsi à arithmétiser, en un sens proche ou du moins hérité de celui de Kronecker, de nombreuses procédures classiques.

Le développement des mathématiques finitaires conduit à s'interroger sur la nécessité théorique d'assumer toute l'échelle des cardinaux transfinites de Cantor. Cette question, déjà posée par Emile Borel, est de nouveau à l'ordre du jour. Dans les mathématiques applicables au monde physique, on n'est pas contraint logiquement d'accepter l'infini actuel. Il est possible en effet de le contourner en se limitant à des espaces

\mathbb{R}^n ou \mathbb{C}^n pour n fini, et d'envisager dans ces espaces des suites d'éléments (par définition une suite est dénombrable) au lieu d'ensembles arbitraires. On peut, par exemple, forger une définition séquentielle de la mesure pour les ensembles mesurables, les seuls dont on se serve effectivement. Mais on ne peut pas traiter d'ensembles non mesurables selon cette stratégie. Par ailleurs, de nombreux résultats mathématiques font un usage essentiel du transfini. Sans axiome du choix non dénombrable on ne saurait démontrer, par exemple, que tout espace vectoriel à une base, que tout ensemble ordonné inductif a un élément maximal (lemme de Zorn), que tout corps a une extension algébriquement close, etc.

La dualité fini/infini continue de tracer dans le champ mathématique une ligne de partage, que les mathématiciens redéfinissent sans cesse sans jamais l'abolir. S'il est relativement aisé de reconnaître la validité d'un résultat à partir d'hypothèses admises, il l'est beaucoup moins de se mettre d'accord sur les hypothèses que l'on peut ou doit admettre. Comme l'écrivait Henri Lebesgue, « à aucune époque les mathématiciens n'ont été entièrement d'accord sur l'ensemble de leur science que l'on dit être celle des vérités évidentes, absolues, indiscutables, définitives ».

► BOLZANO B., *Die Paradoxien des Unendlichen*, Leipzig, 1851 (trad. fr. H. Sinaceur, Paris, Le Seuil, 1993). — BURBAGE F. & CHOUGHAN N., *Leibniz et l'infini*, Paris, PUF, 1993. — CANTOR G., *Abhandlungen mathematischen und philosophischen Inhalts*, Berlin, 1932 ; réimpr. Hildesheim, Olms, 1966. — CANTOR & DEDEKIND, *Correspondance*, in CAVAILLÉS J., *Œuvres complètes de philosophie des sciences*, Paris, Hermann, 1994, p. 374-449. — CHARRAUD N., *Infini et inconscient*, Paris, Anthropos, 1994. — DESANTI J.-T., « Infini », *Encyclopaedia Universalis*. — LEIBNIZ G.W., *Mathematische Schriften*, éd. Gerhardt, Berlin (1849-1863), réimpr. Hildesheim, Olms, 1962 ; *Philosophische Schriften*, éd. Gerhardt, Berlin, 1875-1890, réimpr., Hildesheim, Olms, 1965. — LÉVY T., *Figures de l'infini*, Paris, Le Seuil « Science ouverte », 1987. — RASHED R., *Les mathématiques infinitésimales du IX^e au XI^e siècle*, Londres, Al-Furqan, Islamic Heritage Foundation, vol. I, 1996, vol. II, 1994. — SINACEUR M.-A., « L'infini et les nombres », *Revue d'histoire des sciences*, t. XXVII, 1974, p. 251-278.

Hourya SINACEUR

→ Cantor ; Carnot L. ; Ensemble ; Méthodes infinitésimales.

INFORMATION

BIOLOGIE

Deux sciences auront dominé la deuxième moitié du XX^e s. et, par leurs avancées théoriques et pratiques, pris une part active à la transformation du monde : la science des ordinateurs ou informatique et la biologie moléculaire. Apparus simultanément pendant et après la Seconde Guerre mondiale, ces deux sciences partagent un certain nombre de termes : information, message, code, mémoire sont des notions que l'on rencontre aussi bien dans l'une que dans l'autre de ces

deux disciplines. L'objet de cet article est d'apprécier l'importance de ces termes informationnels dans la biologie contemporaine. L'essentiel du propos portera sur la biologie moléculaire, c'est-à-dire l'étude des mécanismes les plus fondamentaux du vivant. Nous mentionnerons cependant quelques usages des termes informationnels dans d'autres disciplines biologiques. Deux questions peuvent être distinguées. La première est celle du rôle présent des termes et des concepts informationnels dans les sciences biologiques. La deuxième est celle de l'importance que ces termes et ces concepts ont pu avoir dans la naissance et le développement de la vision moléculaire du vivant. La première question est épistémologique et philosophique, la deuxième historique. Bien que liées, elles peuvent être néanmoins traitées séparément.

La place des concepts informationnels dans la biologie contemporaine

Les concepts informationnels occupent une grande place en biologie moléculaire. Le code génétique est la règle qui permet de faire correspondre à l'enchaînement des nucléotides dans l'ADN ou l'ARN un enchaînement d'acides aminés dans les protéines. Entre l'ADN et les protéines, il y a donc transfert d'informations, relayé par une molécule d'ARN à laquelle on a donné le nom de messenger. L'ADN constitue, lui, la mémoire des êtres vivants, celle transmise de cellules en cellules et de générations en générations, mémoire que l'on a parfois assimilée à un texte ou un livre.

Mais il existe, à l'intérieur des cellules vivantes, d'autres voies de transfert d'information. Celles qui permettent aux protéines de réguler la lecture de l'ADN, les voies qui, parties de la membrane cellulaire, convoient les signaux venus de l'extérieur de la cellule vers le noyau pour y réguler la division cellulaire ou la lecture de l'information contenue dans les gènes. Il y a encore des voies et des signaux de régulation qui contrôlent l'activité des enzymes. Toutes ces voies de transfert d'information forment des réseaux à la structure très complexe. Enfin l'ensemble des gènes constitue le programme génétique qui permet à l'organisme de se construire au cours du développement embryonnaire.

L'usage des termes informationnels est donc très courant en biologie moléculaire. Ces termes ne sont cependant pas absents des autres disciplines biologiques : endocrinologie, neurobiologie, immunologie utilisent aussi les notions de rétrocontrôle, de réseaux régulateurs, d'information ou de messages.

Quelle valeur attribuer à ces concepts informationnels ? Dans quelle mesure contribuent-ils aux progrès des sciences biologiques contemporaines ? L'usage en est-il indispensable ou pourraient-ils se voir substituer par des termes autres ? Les réponses à ces questions ne sont pas univoques. Les concepts informationnels utilisés en biologie sont de nature et d'origine diverses et leur usage est plus ou moins métaphorique. Remarquons qu'aucun des concepts

informationnels n'est utilisé en biologie de manière quantitative, comme il le serait en théorie de l'information. Nulle trace, dans la biologie contemporaine, du formalisme de la théorie mathématique de l'information.

Il existe un seul usage dur, non métaphorique, des concepts de la théorie de l'information en biologie : c'est la notion de code génétique. Le code génétique est vraiment une règle parfaite, fixant une correspondance quasi universelle entre les composants de deux macromolécules de natures chimiques différentes. C'est un code chimiquement arbitraire : la connaissance du code n'est pas enrichie par celle des molécules dont il assure la correspondance.

Tous les autres usages des concepts informationnels sont métaphoriques, que ces concepts soient empruntés à la théorie de l'information elle-même (information génétique, message, messenger), à la théorie des systèmes régulés ou cybernétique (boucle de régulation, rétro-inhibition, réseau), à la linguistique (texte génétique) ou à l'informatique (programme, mémoire). Prenons l'exemple des nombreuses voies et réseaux de régulation intra-cellulaires caractérisés ces dernières années. Ces réseaux ne peuvent, d'aucune manière, être formalisés : la connaissance chimique précise des protéines et des enzymes qui les constituent est nécessaire à la compréhension de leur fonctionnement.

Deux notions méritent, par leur importance, une analyse particulière. La première est celle d'information génétique. L'ensemble des gènes d'un organisme vivant, le génome, contiendrait toute l'information nécessaire au développement et au fonctionnement de cet organisme. Certains ont pris au pied de la lettre cette notion d'information génétique, essayé de la déterminer quantitativement, de la comparer à la quantité d'information nécessaire à la création des différentes formes vivantes. Cette approche a une double faiblesse. La première est d'imaginer que les gènes, le génome, seraient par eux-mêmes capables de permettre la fabrication des organismes vivants : ils sont inertes et ont besoin des enzymes et des protéines pour pouvoir donner naissance aux composants fondamentaux du vivant. Le terme d'information génétique est donc très ambigu. Une autre métaphore, celle de mémoire, serait mieux à même de décrire le rôle de l'ADN et des gènes chez les organismes vivants : l'ADN constitue la mémoire, transmise de génération en génération, qui permet aux organismes vivants de produire, en temps et lieu voulus, les protéines dont ils ont besoin. La deuxième faiblesse de la notion d'information génétique est de mal décrire la relation fondamentale qui relie la séquence de nucléotides de l'ADN à la structure des protéines. La séquence de nucléotides d'un gène et l'application du code génétique permettent de fabriquer une longue chaîne protéique, sans structure et sans fonction. Cette chaîne se replie ensuite spontanément pour acquérir la forme tridimensionnelle lui permettant d'assurer sa fonction. On ne trouve donc pas dans l'ADN et les gènes l'information permettant la synthèse de la forme active des protéines. Par quel miracle les

protéines acquièrent-elles cette forme active ? La première réponse est que les protéines obéissent simplement aux lois de la thermodynamique chimique et que l'environnement de la protéine, le milieu dans lequel elle se trouve, joue un rôle fondamental dans le repliement de la protéine. Cette première réponse n'explique pas pourquoi le processus est si efficace, pourquoi les protéines se replient toujours en une forme active. Le deuxième élément de la réponse est, lui, historique. Si les protéines se replient toujours vers une forme active, c'est que la séquence de nucléotides qui a été finalement retenue par l'évolution permet l'acquisition d'une telle forme active. La séquence de nucléotides ne contient pas d'instructions permettant le repliement correct de la protéine correspondante. Simplement elle a été sélectionnée parmi un grand nombre de séquences qui, elles, ne permettraient pas la formation d'une protéine active. On voit ainsi combien le terme d'information est mal choisi pour désigner le rôle des gènes et de l'ADN et combien celui de mémoire est mieux adapté. Les gènes sont simplement les « pense-bêtes » des organismes vivants qui ont été retenus parce qu'ils permettaient, avec une grande efficacité, la fabrication de protéines actives.

Un deuxième terme informationnel utilisé en biologie mérite, lui aussi, analyse et critique : celui de programme. À la suite de François Jacob dans *La logique du vivant* beaucoup de biologistes ont utilisé le terme de programme pour désigner l'action des gènes dans le développement des organismes vivants. Cette notion de programme est née assez naturellement de l'observation qu'il existait, chez les organismes vivants, deux types de gènes, ceux qui codent pour les composants structuraux, et ceux, dits régulateurs, dont la fonction est simplement de contrôler la synthèse des premiers.

Cette notion de programme doit être précisée et critiquée. Si programme génétique il y a ce programme est ouvert. Les « instructions » qui le constituent ne s'enchaînent pas de manière aveugle, indépendamment de l'« environnement », mais elles s'exécutent en fonction des signaux venus de l'extérieur de la cellule et de l'organisme. L'idée d'un programme génétique a l'inconvénient d'engendrer un oubli et une erreur. L'oubli est celui de l'organisation hiérarchisée du vivant. La compréhension du développement embryonnaire ne peut se faire qu'au niveau des cellules, des tissus et des organes. Une description uniquement génétique, moléculaire, du développement embryonnaire est impossible. La notion de programme génétique occulte complètement le fait que la construction de l'organisme vivant se place à un autre niveau que celui des constituants macromoléculaires. En outre, même si l'on admet qu'un certain nombre de gènes jouent un rôle majeur dans le développement embryonnaire — ce que l'on appelle les gènes du développement et que l'on pourrait assimiler à des instructions essentielles pour la construction de l'organisme —, la détermination de la structure de ces gènes, la lecture de ces instructions ne révéleront pas pour autant de logique du développement. Lewis Wolpert proposait

que le programme de développement soit moins semblable à un programme d'ordinateur qu'à l'ensemble des instructions qu'un enfant doit suivre pour fabriquer une cocotte à partir d'une simple feuille de papier : rien, dans de telles instructions, qui ne nous révèle quoi que ce soit sur la nature profonde d'une cocotte.

Alors ? Si, à l'exception du terme de code génétique, l'usage des termes informationnels en biologie est toujours métaphorique et, en outre, souvent maladroit ou inadéquat, ne serait-il pas raisonnable, comme l'a suggéré Henri Atlan, de faire l'effort nécessaire pour supprimer ces termes informationnels de la langue des biologistes et revenir à leur vraie langue, qui est une langue chimique ? Car les métaphores informationnelles peuvent devenir dangereuses, utilisées hors de leur contexte expérimental. Comparer l'ensemble des gènes, le génome, à un texte donne un très grand intérêt à la détermination de la structure complète des génomes, mais confère à l'« information » ainsi acquise un poids considérable, dont la connaissance ou la divulgation peut constituer une menace pour les individus : le destin biologique semble être inscrit dans le livre du génome !

Il est bien peu probable cependant que les biologistes renonceraient totalement à l'usage métaphorique des termes informationnels. D'une part, comme nous venons de le voir, cet usage métaphorique leur permet de « vendre » leurs projets auprès d'un large public. Plus généralement, cet usage métaphorique leur permet de communiquer aisément les résultats qu'ils obtiennent. Enfin, et peut-être surtout, l'usage de métaphores et de concepts flous est très fréquent en science. L'usage de telles métaphores, ou de tels concepts, n'entrave pas le progrès scientifique ; il lui donne au contraire un espace de liberté dans lequel la connaissance scientifique peut, à tout instant, se transformer et se redéployer. L'abandon raisonné, de concert, de termes d'usage métaphorique nécessiterait beaucoup d'efforts qu'aucun bénéfice immédiat ne justifierait.

Le rôle des concepts informationnels dans la naissance de la biologie moléculaire

Comme nous l'avons déjà vu, les concepts dits informationnels viennent de disciplines distinctes, à l'histoire différente, même si ces disciplines ont convergé, assez tard d'ailleurs, pour constituer les sciences de l'information.

On peut distinguer trois intérêts qui, développés dans les années 1930 et au début des années 1940, vont amener les concepts informationnels sous les feux de la rampe. Le premier est le souci des documentalistes, aux États-Unis en particulier, d'entamer une réflexion générale sur les moyens de conserver et de transmettre les informations nouvelles dont la quantité augmente de manière exponentielle avec le développement des sciences et des technologies. Les sciences de l'information vont aussi se développer à cause des besoins croissants de communications sûres, liés en particulier à la

Seconde Guerre mondiale. La théorie de l'information de Shannon naîtra de ces recherches, ainsi que les travaux sur les codes et le décodage qui engendreront la fabrication de calculateurs de plus en plus puissants et la naissance des ordinateurs. Enfin la troisième racine sera la volonté de rassembler, dans une même discipline, les efforts visant à créer des machines – et en particulier des armes – plus intelligentes, autorégulées et ceux visant à décrypter le fonctionnement de ces mécanismes de régulation présents en grand nombre chez les animaux et l'homme. Empruntant aux travaux des physiologistes, tel Cannon, des neurobiologistes aussi bien que des ingénieurs de l'armement, Norbert Wiener créera la cybernétique.

L'existence d'une hétérogénéité dans les disciplines qui utilisent les concepts informationnels rend difficile l'appréciation exacte du rôle que ces disciplines ont pu jouer dans le développement de la biologie moléculaire. La première remarque est que la notion de code génétique, qui est le noyau dur des concepts informationnels en biologie, est apparue assez tard : elle fut développée après 1953 par Francis Crick, l'un des inventeurs de la double hélice, en collaboration avec le physicien George Gamow. Cette idée ne reçoit une confirmation et ne fut largement divulguée qu'à partir du début des années 1960, c'est-à-dire à une phase très tardive du développement de la biologie moléculaire. De manière intéressante d'ailleurs, Francis Crick et James Watson utilisèrent dans un de leurs articles de 1953 le terme de code, sans avoir mesuré toutes les conséquences de son usage. Ils n'étaient d'ailleurs pas les premiers puisque c'est à Erwin Schrödinger que revient le mérite d'avoir, dès 1944, dans *What is Life ?*, utilisé le terme de code pour désigner l'action des chromosomes dans la cellule.

Les termes informationnels pénétrèrent subrepticement en biologie moléculaire avant d'être pleinement utilisés. Cette pénétration fut à la fois consciente et inconsciente, volontaire et involontaire. Ces termes furent probablement utilisés par les biologistes en réponse à un effet de mode car leur usage était devenu très populaire. Pendant les mêmes années de l'après-guerre, les mêmes termes pénétrèrent aussi dans les sciences sociales, la linguistique ou l'économie. La cybernétique connut un grand succès. Le développement de l'informatique, bien que plus lent, fut suivi aussi avec intérêt par un large public. En utilisant ces termes, beaucoup de biologistes ne faisaient donc que refléter les intérêts de leur époque.

Mais certains scientifiques souhaitaient aussi clairement appliquer les nouveaux concepts informationnels à la biologie, pensant que ces concepts illumineraient les sciences du vivant. Ce fut en particulier le cas de John von Neumann, de Norbert Wiener et des cybernéticiens dans leur ensemble. Dès la fin des années 1940, une série de conférences, telles les conférences Macy, réunirent physiciens et biologistes. Ces conférences, dont le contenu a été récemment analysé par l'historienne américaine Lily Kay, eurent sans doute le mérite

de familiariser un certain nombre de biologistes éminents qui allaient, dans les années suivantes, participer à l'essor de la biologie moléculaire, tels Max Delbrück, Joshua Lederberg, George Beadle ou Sol Spiegelman, aux termes utilisés en cybernétique et en théorie de l'information.

La majorité des biologistes ne virent pas l'usage précis qu'ils pouvaient faire de ces termes, ni ce que l'élaboration de modèles, tels ceux proposés par John von Neumann, pouvait apporter à la compréhension des mécanismes réels opérant au sein du monde vivant. Certains cependant, tel William Quastler, tentèrent une approche informationnelle directe de l'organisation et du fonctionnement des organismes vivants ; ces efforts, initiés avant même que la biologie moléculaire n'ait défini le socle expérimental sur lequel elle se bâtirait, comme, par exemple, la mise en évidence du rôle de l'ADN dans les phénomènes héréditaires – la conception dominante était jusqu'alors la conception protéique, enzymatique, du monde vivant – ne furent pas, c'est le moins que l'on puisse dire, couronnés de succès. La double signification du concept d'information permet de comprendre les difficultés que ces biologistes rencontrèrent dans l'utilisation de ce terme : pour l'ingénieur des communications, l'information dont il étudie la transmission n'a pas de signification ; pour le biologiste, au contraire, l'information biologique est pleine de sens : c'est elle qui assure la spécificité du vivant.

Lorsqu'on voit le malentendu existant, dès le départ, sur l'usage des termes, il peut paraître étonnant que ces termes aient diffusés si vite en biologie. Outre le fait qu'ils « étaient à la mode », il faut remarquer qu'un des courants à l'origine de ce qu'on regroupe sous le terme de sciences de l'information, la cybernétique, avait lui-même été fortement influencé par les développements intervenus en physiologie au début du XX^e s., en particulier l'étude de l'homéostasie par Walter B. Cannon. L'étude des régulations avait aussi pris une place majeure dans les travaux des biochimistes et les concepts de la cybernétique ne venaient souvent qu'habiller des lignes de recherches qui les avaient largement anticipés.

Malgré ce rôle limité des concepts informationnels dans la naissance et le développement de la biologie moléculaire, il serait erroné de nier l'importance que ces termes et ces concepts ont pu avoir dans l'interprétation de résultats obtenus sans leur aide. Lorsque le code génétique fut décrypté au début des années 1960, il est clair que tous les biologistes étaient préparés à l'existence d'un tel code. Les termes et concepts informationnels constituèrent le moule dans lequel la jeune biologie moléculaire prit peu à peu forme. L'usage de ces termes rendit les résultats de cette discipline aisément compréhensibles par les autres biologistes et les spécialistes des autres disciplines, mais aussi les étudiants et le grand public. Il contribua à l'effet boule de neige qui donna à la biologie moléculaire une place de plus en plus importante dans l'ensemble des sciences du vivant.

► ASPRAY W., *John von Neumann and the origins of modern computing*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1990. – HEIMS S.J., *Constructing a social science for postwar America : The cybernetics group, 1946-1953*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1993. – JACOB F., *La logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970. – KAY L.E., « Who wrote the book of Life ? Information and the transformation of molecular biology », *Science in context*, vol. 8, 1995, p. 609-634 ; « Cybernetics, Information, Life : the emergence of scriptural representations of heredity », *Configurations*, vol. 5, 1997, p. 23-91 ; *Who wrote the book of Life ? A history of the genetic code*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1997. – KELLER E.F., *Refiguring Life : changing metaphors of twentieth-century biology*, New York, Columbia Univ. Press, 1995. – SCHRÖDINGER E., *What is Life ?*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1944. – Coll. : « Information Science », *The New Encyclopaedia Britannica*, 15^e éd., 1988, vol. 21, p. 559-568.

Michel MORANGE

→ ADN ; Crick ; Gène ; Génétique ; Régulation moléculaire ; Sciences cognitives.

INFORMATION ET CODAGE

Le mot information est employé dans des phrases et des contextes variés. On dit : « les informations contenues dans ce livre », « l'information dont il dispose sur le problème », « les informations codées dans le génome », « le peu d'informations qu'a apporté son long discours ». Lorsqu'on parle d'information on pense souvent « information ayant une certaine valeur », ou « information pouvant servir à ... », ou « contenu en information ». Peut-on faire une théorie générale de l'information ? La théorie de l'information de Shannon (Shannon & Weaver, 1949 ; Brillouin, 1959) a souvent été présentée comme cette théorie attendue. Lorsqu'on a voulu parler précisément de l'information génétique on a essayé d'établir des liens avec cette théorie mathématique ; les résultats n'ont pas été à la mesure des espoirs et des ambitions annoncées (Atlan, 1979 ; Tonnelat, 1978). De même, alors qu'à un moment on a pu penser que la théorie de l'information de Shannon allait être « la théorie de l'informatique », on a vite découvert qu'il n'en était rien. Une autre théorie de l'information, dite « théorie algorithmique de l'information » ou « théorie de l'information de Kolmogorov », est alors apparue (Kolmogorov, 1965 ; Li Vitanyi, 1993 ; Chaitin, 1987 ; Delahaye, 1995). Nous allons voir que ces deux théories sont liées l'une à l'autre.

Problème général des théories de l'information

Nous allons supposer que nous avons une suite de symboles s . Nous allons réfléchir à ce que nous entendons lorsque nous parlons de son contenu en information ou de sa valeur en information. Les exemples suivants seront utiles : la suite des caractères composant l'*Introduction à la psychanalyse* de Freud ; la liste dactylographiée des emplacements des lance-missiles américains dans le monde ; une table de

logarithmes ; le génome complet d'un virus HIV du Sida ; un disque compact avec les concertos pour piano de Chopin interprétés par Samson François ; le programme du traitement de texte que j'utilise pour taper ce texte tel qu'il est en ce moment dans la mémoire de mon ordinateur ; le programme de ce même traitement de texte avant qu'il n'ait été compilé, qu'on appelle « programme source » (l'éditeur du logiciel ne le diffuse pas). Ces exemples correspondent à des objets ayant, ou ayant eu à un moment donné, un contenu en information d'une certaine valeur : ils ont pu être vendus et achetés, on a dépensé de l'argent pour les produire, on continue d'en dépenser pour les conserver. Accordons qu'il y a un contenu brut d'information pour chacun de ces objets, qu'il est donné en digits (ou bits) et qu'on peut le définir comme le nombre de mémoires élémentaires que la chaîne s occupe dans la mémoire d'un ordinateur quand on ne lui fait subir aucun traitement particulier autre que la mise sous un format compatible avec le système de l'ordinateur. Le contenu brut d'information d'une chaîne de caractères s de longueur n est donné par n si s ne comporte que des 0 et des 1 et c'est $n \log(m)/\log(2)$ si la chaîne comporte des caractères pris parmi m , au lieu de pris parmi 2.

Dans nos exemples, l'objet ayant le contenu brut d'information le plus grand est le disque compact, celui ayant le plus petit contenu brut d'information est la liste des emplacements des lance-missiles. Celui ayant le plus de valeur marchande est le programme non compilé de traitement de texte. Celui ayant le moins de valeur aujourd'hui est la table de logarithme. Il est clair que le contenu brut en information ne détermine pas la valeur de l'information : la valeur d'une information est quelque chose de plus compliqué et de relatif. Et c'est bien parce que la valeur en information d'une chaîne de caractères est relative à un certain but et à une certaine situation qu'il y a plusieurs théories de l'information. Si un but B est donné nous noterons $\text{Val}(s, B)$ la valeur de l'information contenue dans s relativement à ce but B . Nous allons découvrir qu'en précisant le but B on obtient différentes théories, dont la théorie de l'information de Shannon, et la théorie algorithmique de l'information.

La théorie algorithmique de l'information

Si on se fixe le but de compresser la chaîne de caractères s et si on suppose qu'on dispose pour cela d'une machine M alors : la valeur de l'information de s est la longueur du plus petit programme (écrit en binaire) qui lorsqu'on le donne à M lui permet de reconstituer la chaîne s . La valeur en information c'est ce contenu incompressible de s .

Il se trouve que la puissance de calcul des machines n'est pas sans limites. Elles peuvent aller plus ou moins vite, mais dès qu'on a affaire à des machines d'une certaine puissance, ce qu'elles peuvent calculer est le maximum de ce que n'importe quelle machine puissante peut calculer. C'est là la découverte

fondamentale de Turing en 1936 : il y a des mécanismes universels de calcul et n'importe quel micro-ordinateur est un tel mécanisme universel. Pourvu donc qu'on se donne un mécanisme de calcul universel, la notion de plus petit programme pouvant engendrer s ne dépend pas de la machine universelle qu'on utilise ; ou plus précisément, ne dépend de cette machine que par une constante additive qu'on peut négliger en première approximation si on traite des suites suffisamment longues. La découverte de ce résultat d'indépendance fonde la théorie algorithmique de l'information. La notion de valeur en information qu'on obtient est particulièrement séduisante. C'est la notion de complexité de Kolmogorov ou de contenu en information de Kolmogorov. Elle correspond à notre définition générale lorsqu'on prend comme but B : $B = [\text{compresser pour la machine universelle } M]$.

Les complexités descriptives

On peut considérer des mécanismes de calcul plus limités, par exemple ne servant pas à coder toutes les suites finies possibles mais seulement une certaine famille d'entre elles, ou ne disposant que d'une quantité limitée de mémoires, ou devant travailler en temps proportionnel à la taille de s , etc.

Détaillons un exemple. Si je ne souhaite que compresser le contenu en information des 500 chaînes de caractères que constituent les 500 livres de ma bibliothèque je peux imaginer une machine spécialement adaptée à ce travail qui pour chaque nombre entier n entre 0 et 499 produise le livre numéro n de ma bibliothèque. Le contenu en information d'un livre de ma bibliothèque est alors simplement le nombre n (plus précisément $\log_2(n)$), et c'est effectivement le contenu brut de la chaîne de caractères que je dois transmettre à un ami présent dans ma bibliothèque, et à qui je parle au téléphone, pour qu'il accède à un certain livre que je veux lui conseiller. Bien sûr dans cet exemple la machine de compression est tout sauf universelle, et c'est bien pour cela que cette notion limitée de valeur d'une information est moins intéressante que la notion de valeur d'une information que donne la théorie de l'information de Kolmogorov.

Nous parlerons de complexité descriptive, ou de contenu descriptif en information d'une chaîne de caractères s , lorsque nous ne supposons pas que M est une machine universelle, et nous réserverons les termes de complexité de Kolmogorov ou de contenu en information de Kolmogorov lorsque M sera supposée universelle.

La notion d'information de Kolmogorov est sans doute la moins arbitraire de toutes les définitions générales de contenu en information (grâce au théorème d'invariance évoqué plus haut), et c'est à elle sans doute que toute théorie générale doit se référer de préférence. Il faut cependant garder à l'esprit qu'elle ne peut s'appliquer qu'à des situations où un grand nombre de chaînes de caractères (et si possible assez longues) est présent.

Une difficulté de la théorie de l'information de Kolmogorov est son lien avec les théorèmes d'indécidabilité de Gödel (Chaitin, 1987 ; Delahaye, 1995). Décompresser une suite de caractères s se fait sans problème (il suffit de faire fonctionner M). En revanche, compresser une suite de caractères s (c'est-à-dire trouver le plus court programme pour M qui redonne s) ne peut se faire qu'à la limite, c'est-à-dire comme résultat d'un calcul infini de M . On ne peut pas espérer mieux puisque la fonction qui donne la complexité de Kolmogorov d'une chaîne s en fonction de s n'est pas une fonction récursive, et que déterminer la complexité d'une chaîne de caractères s constitue dans tout système formel donné S , un problème indécidable sauf pour des chaînes s d'une complexité inférieure à une constante $c(S)$ dépendant de S . En tant que théorie optimale du contenu descriptif de l'information, la théorie de Kolmogorov joue un rôle théorique particulier qui commence à être reconnu par les biologistes et les physiciens (citons : Bennett, 1982 ; Zurek, 1989 ; Küppers, 1990 ; Yockey, 1992).

La théorie de l'information de Shannon

Si le but poursuivi est de transmettre une chaîne de caractère s à un récepteur disposant de certaines connaissances sur la fréquence des lettres (prises dans l'alphabet $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$) de la chaîne de caractères s que l'on souhaite transmettre, on définira la valeur en information de s par :

$$\text{But} = [\text{transmettre } s \text{ à un récepteur qui sait que la probabilité de } a, \text{ est } p(i) \text{ pour chaque } i \text{ de } 1 \text{ à } n]$$

$$\text{Val}(s, [\text{But}]) = E(s, \{p(i)\}) = \text{longueur}(s) \sum p(i) \log(p(i))$$

Cette formule donne le contenu moyen d'information de l'ensemble des chaînes de caractères s quand on tient compte des probabilités $p(i)$ des lettres utilisées. Le « théorème de la voie sans bruit » indique que l'on ne peut pas en moyenne compresser plus les chaînes de caractères s . Implicitement, dans cette conception de l'information, on suppose que le récepteur est susceptible de faire certains calculs pour reconstituer s à partir de ce qu'on lui transmet. Implicitement donc, on suppose un certain pouvoir de calcul du récepteur. En définitive, la machine M qui fait le décodage peut être prise comme référence et on découvre alors que la théorie de Shannon doit être vue comme une version probabiliste de la théorie algorithmique de l'information et compatible avec elle dans le sens suivant : le contenu algorithmique moyen d'information de Kolmogorov des chaînes de caractères s de longueur n (pondérées par les probabilités résultant des fréquences supposées $p(i)$ pour les lettres a_i) $K(s, \{p(i)\})$ vérifie la relation :

$$E(s, \{p(i)\}) = K(s, \{p(i)\}) + O(1)$$

La théorie de l'information de Shannon est donc aussi une théorie de l'information par compression, qui au lieu de considérer des suites quelconques suppose que les suites qu'on transmet vérifient certaines

propriétés statistiques. Finalement, la théorie de Shannon est une théorie du contenu en information relativement à un but de compression et à une certaine distribution statistique des suites. Ce n'est donc pas une théorie de l'information limitée à cause du fait qu'elle ne s'occupe que du problème de la transmission, comme on le dit parfois, c'est une théorie de l'information probabiliste compatible avec la théorie algorithmique de l'information et limitée simplement parce qu'elle est relative à des distributions probabilistes particulières.

Parler de l'information de Shannon à propos du génome de tel être vivant précis n'a pas de sens, car ce génome est une chaîne unique : l'approcher par le contenu incompressible moyen de l'ensemble des chaînes auxquelles elle appartient peut conduire à une erreur grossière. Par exemple, si une chaîne de dix millions de 0 est vue comme un élément particulier de l'ensemble de toutes les chaînes de dix millions de 0 et de 1 (0 et 1 munis de poids égaux) on lui attribuera un contenu d'information de dix millions de bits, ce qui est absurde car une telle suite peut être décrite avec quelques bits (c'est d'ailleurs ce que je viens de faire). Une telle suite n'est pas un élément « typique » de l'ensemble de toutes les suites de dix millions de 0 et de 1.

La théorie de l'information de Shannon est compatible avec celle de Kolmogorov. Chacune a son rôle à jouer et par exemple dans une théorie de la mesure ou de la prise d'information. C'est le jeu complémentaire des deux théories qui doit être considéré : une situation sur laquelle on dispose de peu d'éléments ne peut être qu'assimilée à la situation typique de l'ensemble des situations compatibles avec ce que l'on sait (utilisation de la théorie de Shannon), et au fur et à mesure des précisions qu'on acquiert c'est la théorie de Kolmogorov qui doit devenir prépondérante. Cette idée est très précisément celle qui a servi de base à Zurek 1989 pour reformuler la théorie de la mesure et de l'entropie physique.

Toutes les théories que nous venons de présenter sont des théories « compressionnelles » (ou « descriptives ») de l'information. Compresser des données est certes important mais il est bien clair que ce n'est pas cela uniquement qui constitue la valeur d'une information. On sait par exemple qu'une suite tirée au hasard de 0 et de 1 est le plus souvent incompressible, mais cela ne signifie pas bien sûr que chaque suite de 0 et de 1 a de la valeur, ni que chaque suite de 0 ou de 1 est incompressible.

La notion de profondeur logique de Bennett

Une autre insuffisance frappante des théories descriptives de l'information apparaît quand on considère la suite des cent premiers millions de chiffres binaires de π qui a une complexité de Kolmogorov assez petite (car il y a des algorithmes courts qui la génère). Ce qui fait la valeur de cette suite — et on a dépensé beaucoup d'argent pour la calculer (Delahaye,

1997) – comme ce qui faisait la valeur des tables de logarithmes d'autrefois c'est qu'une telle suite représente une quantité importante de calculs. La notion de profondeur logique proposée par Bennett (Bennett, 1988 ; Delahaye, 1995) prend en compte cet aspect du contenu en information. Si on poursuit l'objectif de limiter au maximum le nombre de pas de calculs qu'on doit faire pour retrouver s , alors la « valeur en information de la suite s » sera le nombre minimum de pas de calculs qu'il faut pour produire s . La théorie de Bennett définit la profondeur logique d'une suite s par le temps de calcul qu'il faut à une machine universelle M pour produire s à partir de sa description minimale. Bennett montre que cette notion est robuste, c'est-à-dire qu'elle dépend relativement peu de la machine universelle qu'on se donne. Là encore on a une définition très séduisante de la valeur en information d'une chaîne de caractères. Cette théorie est appelée à jouer un rôle important en physique, en biologie et dans d'autres disciplines.

Théories pragmatiques de l'information

Dans nos exemples nous avons considéré un programme de traitement de texte. Il est clair que la compilation d'un programme-source en un programme exécutable créée de l'information de valeur. Là le but est mixte : avoir une forme compacte d'un algorithme assez rapide réalisant une famille de calculs. Notons que : plus le code est rapide plus la compilation a de la valeur ; plus le code compilé est compact plus il a de la valeur (aujourd'hui, contrairement à ce qui se passait il y a 30 ans, on préfère favoriser la rapidité aux dépens de l'espace, car le prix des mémoires a baissé) ; plus nombreux sont les problèmes traités par le programme compilé, plus sa valeur est grande.

La valeur de l'information contenue dans un programme compilé est un mélange de ces trois qualités (rapidité, compacité, champ des problèmes traités), et d'autres encore comme l'originalité, la portabilité, etc. La valeur de l'information d'un programme compilé (et de bien des chaînes de caractères) ne se laisse pas réduire à un seul aspect : le contenu en information d'un programme compilé ce n'est ni l'information algorithmique de Kolmogorov ni l'information donnée par la théorie de Shannon, ni l'information-profondeur de Bennett.

Si on considère que le but poursuivi est de nature pratique, par exemple survivre dans un milieu donné, ou gagner le plus possible d'argent tel jour à la bourse de Paris, alors la valeur de l'information d'une chaîne de caractères s se mesurera en fonction du but. Une information de grande valeur ce sera l'endroit où aller chercher tel aliment, ou ce sera le nom de l'action boursière qui va monter. Aucune théorie générale de l'information n'est possible qui prenne en compte tous les aspects pragmatiques qui déterminent la valeur d'une chaîne de caractères. Une fois le problème reconnu, c'est une évidence. Que les théories générales puissent jouer un rôle particulier en physique ou en biologie est

certain mais il faut garder à l'esprit qu'aucune ne constitue « la théorie de l'information ».

► ATLAN H., *L'organisation biologique et la théorie de l'information*, Paris, Hermann, 1972. – BENNETT C.H., « The Thermodynamics of Computation, a Review », *International Journal of Theoretical Physics*, 1982, vol. 21, n° 12, 905-940 ; « Logical Depth and Physical Complexity », in HERKEN R. éd., *The Universal Turing Machine : A Half-Century Survey*, Oxford Univ. Press, 1988, 227-257. – BRILLOUIN L., *La science et la théorie de l'information*, Paris, Masson, 1959. – CHAITIN G.J., *Information, Randomness and Incompleteness : Papers on Algorithmic Information Theory*, Singapore, World Scientific, 1987. – DELAHAYE J.-P., *Information, complexité et hasard*, Paris, Hermès, 1995 ; *Le fascinant nombre Pi*, Paris, Belin, 1997. – KOLMOGOROV A.N., « Three Approaches for Defining the Concept of Information Quantity », *Information Transmission*, vol. 1, 1965, 3-11. – KOPERS B.-O., *Information and the Origin of Life*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1990. – LI M. & VITANYI P.M.B., *Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications*, Springer-Verlag, 1997. – SHANNON C.E. & WEAVER W., *The Mathematical Theory of Communication*, Urbana, Univ. of Illinois Press, 1949. – TONNELAT J., *Thermodynamique et biologie*, t. I, *Entropie, désordre et complexité*, t. II, *L'ordre issu du hasard*, Paris, Maloine-Dion, 1978. – TURING A.M., « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », *Proceeding of the London Mathematical Society*, 2, 42, 1936-1937, p. 230-265 (corrections, 43, 1937, p. 544-546, 1936). – YOCKEY H.P., *Information Theory and molecular biology*, Cambridge Univ. Press, 1992. – ZUREK W.H., « Algorithmic Randomness and the Physical Entropy », *Physical Rev. A.*, vol. 40, 1989, 4731-4751.

Jean-Paul DELAHAYE

→ Complexité ; Complexité algorithmique ; Computation ; Informatique ; Machine de Turing.

INFORMATIQUE

L'informatique semblait initialement destinée au calcul numérique et aux calculatrices (*computer* en anglais). Mais, comme nous le verrons, l'objet du calcul dépassant les nombres, elle est mieux définie comme la science du traitement automatique de l'information, ce que les termes français d'ordinateur (1952), remplaçant calculatrice, et d'informatique (1962) ont eu le mérite de pressentir. Les idées principales de cet article sont les suivantes : les traitements automatiques sur des symboles peuvent se ramener au calcul sur les nombres binaires, la notion de calcul a été bien cernée avant la construction des premiers ordinateurs et, enfin, sur quelles bases se fera le futur partenariat de l'homme et la machine.

Des nombres et des symboles

Cette section montre comment les traitements automatiques sur des symboles et le mécanisme de déduction peuvent se ramener au calcul sur les nombres.

Le besoin de calcul dans les activités des sociétés primitives, comme le décompte des troupeaux et les transactions marchandes, a conduit au concept de

nombre. La façon de le représenter – la numération – est présente dans les premières sociétés utilisant l'écriture, comme à Sumer. De la même façon que les langues se sont développées avant l'écriture, il est probable que les nombres et le calcul ont précédé la numération. Ainsi certains peuples sans écriture, ne connaissant pas d'autres nombres que 1 et 2, arrivaient à gérer des nombres plus grands, dans des situations concrètes.

Les façons d'effectuer des opérations sur les nombres, addition, soustraction, multiplication et division, ont longtemps occupé les mathématiciens. Mais la diffusion de leur savoir-faire s'est étalée sur plusieurs siècles. Ainsi, la multiplication telle qu'on l'apprend de nos jours à l'école primaire a été décrite par Brahmagupta, vers 628 après J.-C., dans un traité d'astronomie qui reprenait toutes les connaissances mathématiques connues en Inde (dont le zéro, l'infini et les nombres négatifs). Ce traité fut traduit en arabe par Al-Khwarizmi (origine du mot *algorithme*) vers 820, et ses règles opératoires, dites « à la plume », furent imposées par la Révolution française pour les activités marchandes, les écoles et les administrations. L'épopée de ces opérations se confond avec celle du zéro, symbole essentiel dans l'écriture actuelle des nombres.

Cette lenteur de diffusion n'est pas due à un désaccord sur les concepts eux-mêmes, mais à la façon de les représenter : nombre « à la romaine », avec des jetons dont les valeurs s'ajoutent, ou nombre avec chiffres dont la position compte. C'est l'illustration de la dialectique entre l'outil et la théorie : un bon outil contribue à l'avancée de la théorie, qui, à son tour, fournit de nouveaux outils.

Ainsi, Viète invente une notation algébrique concise, l'outil, qui permet à Pascal de ramener la numération aux polynômes, et à Descartes, en 1637, d'introduire la géométrie analytique. Avec cette théorie, Descartes unifie la géométrie et l'arithmétique au sein de l'algèbre. Après les chiffres et le zéro, la notation algébrique introduit de nouveaux symboles : les variables, les opérations de base et les fonctions. L'idée suivante, qui prendra encore deux siècles, sera de considérer que la signification des symboles n'est rien d'autre que leurs propriétés dans des systèmes logiques de transformations de formules.

Depuis Pascal, on sait que les nombres peuvent se représenter sans peine dans n'importe quelle base, donc dans la base 2 ou binaire. De même, tout élément d'un ensemble dénombrable peut être associé à un nombre entier, et pourra être codé par un nombre binaire. Boole, en 1854, a montré que les règles de la logique, qu'il a appelées lois de la pensée, ne sont autres que des propriétés des fonctions sur un ensemble à deux éléments (faux et vrai). Par exemple, il était connu que pour démontrer que $A \llbracket \text{entraîne} \rrbracket B$, on pouvait démontrer que non $B \llbracket \text{entraîne} \rrbracket$ non A . Dans l'algèbre de Boole, cela découle du fait que ces deux expressions, en tant que fonctions booléennes des deux valeurs A et B , sont identiques. Toutes les opérations

sur un ensemble à 2 éléments, que ce soit {faux, vrai} ou $\{0, 1\}$, sont décrites dans l'algèbre de Boole. Shannon complètera ce travail, en 1937, en s'intéressant à la synthèse des fonctions booléennes. La base 2, la plus simple, permet donc à la fois de décrire les nombres ou les symboles et toutes les fonctions, logiques ou numériques, sur ces nombres ou symboles.

Du calcul à l'algorithme

Les premières formes d'écriture sumérienne témoignent de la volonté de transmettre les procédures de résolution de problèmes pratiques : détermination de l'aire de certains polygones ou calcul de la hauteur d'un édifice ou d'une montagne, par un calcul arithmétique.

Avec l'invention du langage algébrique (Viète, Descartes), ces recettes allaient se réduire à des formules. Il devint inutile de les retenir toutes, grâce aux règles d'algèbre, permettant, à partir d'une formule, d'en réécrire d'autres équivalentes ou de combiner plusieurs formules pour en donner de nouvelles. Calculer une formule algébrique, c'est effectuer la combinaison ordonnée des opérations qu'elle décrit. Ce type de calcul utilise la notion de répétition de façon trop restrictive pour mériter le nom d'algorithme, comme nous le verrons dans la section suivante.

Un algorithme est la description d'un enchaînement d'opérations élémentaires à effectuer en nombre fini. Usuellement, la description est courte, mais le nombre d'opérations peut être très grand suivant la valeur des données d'entrée. Babbage, vers 1850, eut l'idée de construire une machine capable d'exécuter un algorithme quelconque. La technologie mécanique de l'époque ne lui permit pas, malgré un acharnement de 20 ans, de mener à bien la réalisation de sa « machine analytique ». L'informatique a eu la chance que d'importants résultats théoriques sur la notion d'algorithme aient vu le jour avant que la barrière technologique ne soit franchie. Ces résultats ont pu ainsi influencer de façon durable sur l'organisation des premiers ordinateurs.

La notion de fonction calculable

Vers la fin du XIX^e s., une série de travaux a établi les fondements des mathématiques. Cantor, à la fin du XIX^e s., a montré qu'il y avait plusieurs « infinis » et que celui des fonctions sur les entiers était strictement supérieur à celui des entiers eux-mêmes. Rappelons, ici, sa démonstration par l'absurde : supposons qu'on puisse numéroter toutes les fonctions, même s'il y en a une infinité. On peut alors les présenter sous forme tabulée avec en colonne i la i ème fonction, f_i : en colonne i et ligne j , nous aurons la valeur $f_i(j)$. Mais alors, il est facile de construire une nouvelle fonction F qui diffère de toutes celles de ce tableau, sur les valeurs de la diagonale par exemple, en posant $F(i) = f_i(i) + 1$. Donc, ce tableau ne représente pas toutes les fonctions sur les entiers.

L'axiomatisation des mathématiques a contribué à réduire la notion de signification aux propriétés qui découlaient de définitions, et non d'une interprétation humaine, porteuse de paradoxes.

Hilbert qui avait clarifié les notions de système logique (1899), pensait qu'on pouvait automatiser toutes les démonstrations. Whitehead et Russell (1913) dans leurs *Principia mathematica* ont essayé de suivre ce principe. Mais, à la surprise générale, Gödel (en 1931) a démontré qu'il y avait des vérités indémonstrables dans tout système formel non contradictoire qui incluait les entiers. Pour ce faire, il a construit une formule qui disait, en substance, « je ne suis pas démontrable », à l'aide d'un codage numérique. S'il était possible de la démontrer, alors on avait une contradiction flagrante ou sinon, on avait donc obtenu une vérité non démontrable. Le codage permettait à cette formule d'être autoréférente, c'est-à-dire de porter sur elle-même.

En 1932, Church, motivé par l'usage d'un système plus simple, inventait le lambda calcul qui représentait l'essence du fonctionnement des fonctions, à savoir leur usage emboîté, à un niveau quelconque. Son mécanisme principal est la substitution qui permet d'appliquer une fonction à un argument, qui est lui-même le résultat de l'application de fonctions plus élémentaires.

Dans le lambda calcul, on a pu définir l'équivalent des nombres entiers et de certaines fonctions de base. Church énonça l'hypothèse (appelée thèse de Church), par nature invérifiable, que le lambda calcul pouvait représenter toutes les fonctions calculables. Néanmoins, le défi était lancé de proposer des définitions alternatives. S'appuyant sur des idées de Herbrand, Gödel (en 1934) définit la récursivité générale, comme celle de fonctions définies par des équations récursives. Turing (en 1936), définit une machine conceptuelle munie d'un état, qui, à partir d'un symbole lu sur un ruban infini, changeait d'état et effectuait une action. Alors qu'*a priori* une telle machine ne résout qu'un problème, il est facile de faire une machine de Turing universelle qui simule une machine quelconque, à l'aide de sa description. Turing a eu l'intuition qu'une telle machine représentait la quintessence des machines à calculer.

On démontra rapidement que ces deux tentatives indépendantes étaient équivalentes à celle de Church, ce qui renforça sa thèse. Avec ces 3 moyens d'aborder la notion de calcul, des progrès se firent rapidement en transposant les résultats obtenus, d'un formalisme aux deux autres. Mais quelles étaient les limites de cette notion de fonction calculable ? Le problème de l'arrêt des machines de Turing allait fournir l'exemple d'un problème insoluble : existe-t-il un algorithme (sous forme de machine de Turing) qui peut décider, par oui ou non, si une machine de Turing quelconque, en présence d'une donnée quelconque, va s'arrêter ? Par l'absurde, on peut montrer que ce problème ne peut être résolu par aucune machine de Turing (il est indécidable) : si une telle machine de Turing existait, on

pourrait la transformer aisément en une autre qui « bouclerait » quand la première s'arrête. Mais alors, en soumettant cette seconde machine à elle-même, nous obtiendrions la contradiction suivante : si elle s'arrête, alors elle ne s'arrête pas, et, inversement, si elle ne s'arrête pas, alors elle s'arrête !

Ces travaux ont révélé l'importance de la notion de récursivité. La définition récursive d'un concept fait intervenir le concept lui-même dans la définition, mais pour une « dimension » plus petite. Par exemple, un nom (de variable) est, par définition, soit une lettre, soit un nom suivi d'une lettre ou d'un chiffre. Une définition récursive permet de définir une infinité d'objets concisément. La récursivité, souvent considérée comme une notion difficile, est pourtant familière. Par exemple, prenons le concept d'arbre. Un arbre est un graphe dont un sommet, la racine, a un nombre quelconque (éventuellement zéro) de sommets successeurs qui sont aussi des racines d'arbre. C'est un objet familier : par exemple, un livre peut être considéré comme une racine d'arbre dont les successeurs sont les chapitres qui ont comme successeurs des sous-chapitres, et ainsi de suite.

Ces travaux ont aussi révélé que la répétition était équivalente à la récursivité. Il ne s'agit pas de la forme simple où l'on répète n fois une opération, n étant fixe ou variable, mais celle, plus générale, où l'on répète une opération jusqu'à la réalisation d'une condition quelconque. Prenons, par exemple, l'algorithme d'Euclide, qui trouve le PGCD (plus grand commun diviseur) de 2 nombres a et b . Il procède en remplaçant le plus grand nombre, disons a , par $a-b$, et répète l'opération jusqu'à ce que l'un des nombres soit zéro : l'autre est alors la solution.

On peut aussi considérer que cette forme de répétition permet d'approcher de la solution, pas toujours au sens d'une approximation, qui fait tendre une valeur numérique vers une limite, mais plutôt au sens d'une réduction d'un espace de recherche de la solution. Ainsi, dans l'algorithme d'Euclide, on remplace le couple initial par des couples plus « petits », ayant même PGCD. Cette idée de parcours d'un espace de recherche et de sa réduction sera fructueuse dans les problèmes de décidabilité ou de complexité.

La récursivité a conduit naturellement aux langages formels qui sont définis par un ensemble de règles de grammaire (1940). C'est dans ce contexte qu'ont été conçus et réalisés les premiers ordinateurs que nous évoquerons plus loin. Ensuite, la théorie a progressé dans le domaine des langages formels, initialement stimulée par la traduction automatique des langues naturelles. Chomsky a étudié le cadre des grammaires formelles (1956) puis a défini une hiérarchie des langages (1956) encore en vigueur de nos jours. En particulier le type de grammaire hors-contexte (*context-free* en anglais), trop simple pour les langues naturelles, a fourni un bon cadre pour les langages de programmation. De nombreux résultats ont pu être démontrés sur ces langages par des automates, objets mathématiques proches de la machine de Turing.

Une autre notion, celle de complexité (en temps) d'un problème, qui est le nombre maximum d'opérations pour le résoudre par le meilleur algorithme, a pris une grande importance. Certains problèmes sont de complexité linéaire (en n pour des données de taille n), comme la recherche d'une sous-chaîne dans une chaîne de caractères, d'autres sont en $n \cdot \log(n)$, comme le tri d'un ensemble de valeurs, et d'autres problèmes encore sont de complexité plus grande, en e^n , par exemple. Même pour n petit, une centaine, le comportement de tels algorithmes est très différent : alors qu'une solution de complexité polynomiale ne prendra que quelques secondes ou quelques heures, une solution exponentielle prendrait plusieurs siècles, sur les ordinateurs actuels. Une classe de problèmes « difficiles » équivalents a été trouvée et enrichie depuis les années 1970. Une question ouverte d'importance est de savoir si cette classe, NP, est réductible à celle des problèmes polynomiaux, P.

De la pascaline à l'ordinateur

Trois technologies principales, la mécanique, l'électromécanique et l'électronique, ont marqué les inventions de machines à calculer. Citons quelques exemples significatifs.

Les machines mécaniques à faire des additions et soustractions ont été inventées indépendamment par Schickhard (1623) et Pascal (1643). L'addition consiste à faire tourner des roues dentées et la retenue se fait par un ergot qui, à chaque tour d'une roue, fait tourner d'un cran la roue voisine. Une vingtaine de pascalines furent en circulation. Leibniz (1673) a conçu une machine faisant les quatre opérations. Au cours du XIX^e s., des machines dérivées furent conçues et réalisées « en série », comme l'arithmomètre de Thomas (1 500 exemplaires). Jacquard (1804) a inventé le métier à tisser, qui ne calcule pas, mais guide le tissage par un modèle du motif représenté sous forme de perforations dans des cartons pliants. Babbage (1820-1840) a entrepris la construction de son *analytical engine*, capable de résoudre une grande gamme de problèmes. Les exigences de Babbage et les difficultés technologiques ont empêché sa réalisation. Hollerith a inventé une trieuse électrique à cartes perforées (1884) pour effectuer le recensement des États-Unis. La société qu'il créa deviendra IBM.

L'apparition des relais électromécaniques, pour le téléphone, stimulent les inventions entre 1935 et 1940. Plusieurs prototypes, proches de l'ordinateur moderne, sont construits par des inventeurs isolés : Stibitz (1937), Atanasoff (1939), Zuse (1939). L'électronique, les tubes à vide, sont à la base d'un projet important de la Moore School de Philadelphie : la construction de l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) par Eckert et Mauchly. Avec l'électronique, le temps de base passe du dixième de seconde à la milliseconde.

Mais ces inventeurs sont plutôt physiciens ou électrotechniciens. L'ordinateur va être orienté vers l'universa-

lité du calcul par les mathématiciens von Neumann et Turing. Par hasard, von Neumann, très au fait des résultats sur la décidabilité, est mis au courant du projet militaire, et secret, de l'ENIAC. Dans la perspective de faire une machine plus générale, l'EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer), il publie un rapport (1945) qui décrit une architecture comportant un mécanisme général d'enchaînement des instructions qui résident en mémoire, comme les données. Ce rapport, qui pose les concepts de base de l'ordinateur universel, va directement inspirer la conception d'une dizaine de machines, dans différents pays, de 1945 à 1950. De son côté, Turing participe activement au décryptage des messages allemands de l'ENIGMA, pendant la guerre, et inspire les premiers ordinateurs britanniques de 1945 à 1950.

Les premiers ordinateurs sont des monstres : l'ENIAC pèse 30 tonnes, comprend 18 000 tubes, consomme 150 kwatts et fait une addition en 200 microsecondes ! Leur durée de vie est assez courte à cause des pannes, d'une part, et des améliorations de conception qu'on souhaite leur apporter, d'autre part. Mais leur architecture générale va rester quasiment inchangée dans les 50 ans qui suivront. Elle comporte deux ingrédients complémentaires : le matériel et les programmes, appelés encore logiciel (rappelant le jeu de mots *hardware* et *software* en anglais). Le matériel a une vocation généraliste, sinon universelle, et le logiciel est orienté vers une application. Typiquement, on peut considérer que le logiciel enrobe le matériel par une ou plusieurs couches facilitant l'usage de l'ensemble. Le logiciel est pure information matérialisée.

Les premiers acquis de l'informatique

De nombreuses inventions vont contribuer à l'utilisation de l'ordinateur par un plus grand nombre : les langages de programmation et les systèmes d'exploitation dans le domaine du logiciel, les micro-ordinateurs dans le domaine du matériel, les interfaces graphiques et les réseaux dans les deux domaines.

Un langage de programmation permet de dissocier la conception des programmes de leur exécution sur une machine, qui nécessite de connaître l'adresse exacte de toutes les données et instructions, ainsi que le codage des opérations. La première génération de langages (1945-1955) se contente de remplacer ces diverses informations par des chaînes de caractères. Un traducteur, appelé assembleur, les convertit dans les valeurs voulues, avant que le programme ne soit exécuté. Backus conçoit et dirige le projet ambitieux de remplacer les instructions par un langage de formules mathématiques avec des tableaux, plus proche de celui de l'homme : FORTRAN (1955-1957). Le traducteur, compilateur, a nécessité environ 200 hommes-années (homme-année : unité utilisée en informatique pour estimer la quantité de travail que demande le développement d'un logiciel ; la quantité 200 hommes-années correspond autant au travail de 200 personnes pendant

un an qu'à celui de 50 personnes pendant 4 ans). Ce langage, maintes fois rajeuni, est encore en usage.

À la suite de FORTRAN, la traduction des langages s'inspire de la théorie des langages formels et fait des progrès fulgurants : les premiers compilateurs ALGOL n'ont nécessité qu'un homme-année (1960). En utilisant la hiérarchie de langages formels que propose Chomsky (1956, 1959), Knuth caractérise de bonnes formes de grammaire ayant des algorithmes de reconnaissance efficaces, toujours utilisés. Vers 1960, naissent 3 langages de programmation avec des orientations distinctes : ALGOL, qui généralise FORTRAN et introduit la récursivité, COBOL qui traite des domaines de gestion avec des verbes plutôt que des signes mathématiques et LISP qui traite récursivement de listes imbriquées, c'est-à-dire d'arbres. Ce dernier, inspiré par le lambda calcul, peut aussi bien traiter des valeurs que des programmes car ceux-ci se présentent sous forme de listes : on peut ainsi engendrer, à la volée, un programme dont on va se servir.

Ces langages vont être suivis de milliers de dialectes ayant chacun leurs adeptes. Parmi les autres langages importants, notons SIMULA qui unifie données et traitements au sein d'une classe d'objets, et PROLOG dont les programmes sont un ensemble de règles, qui ouvre la voie de la programmation logique : la réponse à une requête est faite par un mécanisme de déduction et par des substitutions. La programmation tend ainsi vers la déclarativité, où l'on décrit ce que l'on veut faire, plutôt que comment on veut le faire. Un système d'exploitation est une couche de logiciel qui encapsule le matériel pour rendre des services aux programmes d'application. Au début, les systèmes fournis par les constructeurs avaient pour principaux objectifs de faciliter la programmation des périphériques, d'enchaîner automatiquement les programmes puis de partager l'ordinateur en confinant les erreurs aux seuls programmes responsables. La notion de fichier a permis l'indépendance du programme par rapport au périphérique. Dijkstra (vers 1965) invente la notion de processus, qui permet d'avoir plusieurs programmes en cours d'exécution sur le même ordinateur.

Vers 1972, naît un nouveau procédé de fabrication des circuits miniaturisés. L'unité centrale peut tenir sur un seul composant ou puce : c'est le microprocesseur. Vers 1975, des micro-ordinateurs complets sont fabriqués, et depuis, le rapport performance/prix croît de façon vertigineuse. Un simple micro-ordinateur domestique d'aujourd'hui est plus puissant que l'ordinateur d'un grand centre de calcul de 1980. Ainsi, l'ordinateur est passé des militaires aux grandes sociétés et administrations vers les années 1960, puis au grand public vers 1980. On estime qu'un foyer américain sur deux, un foyer français sur dix, seront informatisés en l'an 2000. Tous ces ordinateurs seront, de plus, reliés entre eux par le réseau Internet. Les réseaux et les interfaces sont détaillés dans les deux sections suivantes consacrées à la communication et à la présentation de l'information.

Communiquer l'information

Les méthodes de diffusion de l'information à grande échelle sont apparues dès que l'homme a lié la parole au geste. Les premiers écrits expriment des actes de propriété et de commerce. La reproduction industrielle d'une information apparaît en 1453 avec l'invention de l'imprimerie. Le premier journal européen, *La gazette de Venise*, date de 1536. La vitesse de transmission des messages s'est accrue en 1793, avec le sémaphore. En 1844, le télégraphe de Chappe met en réseau 29 villes françaises. En 1858, le câble transatlantique est posé. 1879 voit l'installation du téléphone à Londres. Le premier central téléphonique automatique date de 1892. En 1913, il y a 92 000 téléphones à Paris. Après cette mise en réseau des personnes, la mise en réseau des ordinateurs a commencé avec le projet américain Arpanet en 1969. Il y avait en 1984, 1 000 sites sur Arpanet et, dix ans plus tard, plus d'un million de sites sur Internet. À l'interconnexion des machines et des personnes, s'ajoute l'élargissement du spectre de ce qui est transmis. Les premières transmissions d'images ont eu lieu en 1904. À partir de 1946, les téléviseurs entrent dans les foyers. Les communications à haut débit par le réseau Numéris datent de 1992.

Beaucoup de systèmes ne se contentent pas simplement de transmettre de l'information. Ils utilisent les machines pour stocker, transformer, ordonner, rechercher et raisonner sur des informations, et leur associent les capacités humaines pour traiter l'information. Dans ces systèmes, la collaboration s'effectue aussi bien de machine à machine, de personne à personne ou entre personne et machine. Un système collaboratif doit être conceptuellement simple pour être utilisé par des personnes se trouvant dans des situations fort différentes. L'interface doit permettre aux personnes d'accomplir leur tâche avec le minimum d'effort, dans leur interaction avec les machines.

Présenter l'information

C'est à l'occasion des projets du centre de recherche de Xerox, vers 1970, essayant de concevoir l'ordinateur du futur, que les organes d'interaction comme la souris, l'écran graphique et l'imprimante laser ont été inventés. Mais on ne peut réduire une interface à ces outils physiques, pas plus qu'aux concepts métaphoriques de fenêtres, menus et boutons. Dans l'interaction, l'utilisateur doit exprimer sa tâche à l'aide des outils présentés, en planifier l'usage et effectuer les actions. L'interface doit rendre ce processus le plus simple et le plus naturel possible. Par exemple, les logiciels de traitement de textes présentent le texte tel qu'il sera imprimé (principe WYSIWYG ou *what you see is what you get*). Mais cette simplicité peut amener l'interface à changer les pratiques et les habitudes, dans le souci d'une plus grande efficacité. Ainsi les concepts de fichiers ou de feuilles de style des traitements de texte qui n'existaient pas avec les machines à écrire mécaniques.

Certains principes d'interface ont pu ainsi émerger, au sein de la communication personnes/machines. Par exemple, l'effort de mémoire doit être allégé au maximum pour que l'utilisateur se concentre sur sa tâche. Seuls les objets et les opérations d'intérêt doivent lui être présentés et il doit pouvoir les organiser à sa guise. Des caractéristiques non pertinentes dans la tâche, comme le fait d'être distant, doivent être gommées. Les actions proposées doivent être semblables dans les situations semblables. Une bonne interface doit favoriser l'exploration de nouvelles actions par l'utilisateur qui doit rester confiant dans leur réversibilité. Dans certains cas, il faut concilier des principes contradictoires : lorsqu'une action d'un menu n'est pas utilisable, on la met en gris plutôt que de la supprimer du menu pour rassurer l'utilisateur sur l'emplacement de l'action et l'informer de sa non-pertinence. Chaque interface utilise des modèles simples qui doivent être assimilés pour que l'interaction soit efficace, comme désigner d'abord l'objet et ensuite lui appliquer une action. Leur méconnaissance peut engendrer un stress chez l'utilisateur qui ne peut prédire le résultat de ses actions. Les interfaces prennent en compte de nouveaux faits sur les capacités cognitives de l'homme. C'est une gageure importante de vouloir traiter de nombreuses applications nouvelles en ne gardant qu'un petit nombre de concepts pour les interfaces.

Les réalisations informatiques

L'informatique affiche de nombreuses réussites. Tout d'abord, l'évolution du matériel par la miniaturisation des composants, l'accroissement des performances en vitesse et capacité et la diminution des prix ont rendu économiquement possibles de nombreuses applications. Ensuite, une panoplie d'outils logiciels généraux a permis la maîtrise de tâches d'une très grande complexité. Outils pour informaticiens comme les systèmes d'exploitation, les compilateurs et les systèmes de gestion de bases de données. Outils pour le travail de bureau comme les traitements de textes et les tableurs.

Mais il y a aussi les espoirs déçus. La reconnaissance de la parole et la reconnaissance de formes n'ont pas atteint les performances humaines. Ces activités qui semblaient plutôt instinctives, liées à de simples capteurs, se sont révélées au contraire comme nécessitant beaucoup de travail d'analyse du cerveau. De même, la traduction automatique ne donne pas encore de résultat probant. Tout se passe comme si on découvrait la fantastique capacité humaine à traiter l'information. L'informatique ne doit pas viser à imiter l'homme, mais à lui fournir un partenaire assurant des tâches complexes.

Dans le domaine plus limité du jeu d'échecs, qui symbolise l'intelligence, la situation est plus mitigée. « Deep Blue », ordinateur d'IBM, a battu Kasparov, champion du monde, en 1997. Mais de façon décevante, grâce à la force brute de calcul de ses

256 processeurs. D'abord, la concertation des 256 processeurs n'est effective que pour ce problème. Le programme n'apprend pas, au sens humain du terme. En effet, pour un bon joueur d'échecs, les règles seules ne suffisent pas. Il doit apprendre des concepts comme la valeur des pièces, le centre, un roi mal défendu, des pions passés, fruits d'une expérience pluri-centenaire. Pour devenir champion du monde, il doit aussi savoir trouver des exceptions aux règles, de nouveaux concepts et faire des plans. Ces dernières caractéristiques sont hors de portée des programmes actuels.

Les prochains défis

Peut-on écrire un logiciel dont la correction est prouvée ? Ce n'est que vers 1975, à la suite des travaux de Hoare et Dijkstra, que la liaison entre une intention de programme et une réalisation a pu être fermement établie. La phase ultime de la déclarativité qui consiste à spécifier la tâche à faire, et laisser engendrer automatiquement le programme est déjà en marche pour des logiciels critiques dont la vie de personnes dépend. Aujourd'hui, un ordinateur personnel héberge une grande quantité d'informations car un disque de 2 giga octets pourrait contenir un million de pages imprimées. Et un réseau, comme Internet, peut connecter des millions d'ordinateurs. Il devient donc très important de disposer de méthodes capables d'analyser très rapidement de très grands volumes d'informations. Ces analyses doivent donner des réponses adaptées aux facultés d'attention de son utilisateur. L'intelligence artificielle cherche à concevoir des machines qui soient des partenaires de l'homme dans la communication et qui assistent sa mémoire et son raisonnement.

À la suite de Herbert Simon, de nombreux chercheurs ont tenté de déterminer les principes permettant d'attribuer ou de récuser un comportement rationnel pour une machine. Ces principes sont les suivants. La rationalité parfaite d'une machine se mesure relativement à la manière dont elle se comporte pour résoudre des problèmes sur lesquels elle dispose d'une information parfaite. Supposons que cette information parfaite lui soit donnée sous la forme d'un ensemble infini d'exemples, la rationalité d'une machine capable d'apprendre sera estimée selon son comportement d'apprenti. On la jugera sur deux facultés duales : sa capacité à induire des lois à partir de faits, et son aptitude à abduire des faits admissibles en pratique. Aux échecs, ce serait trouver la loi qu'un fou vaut 3 pions environ. Une machine aura une rationalité calculée dans la mesure où elle saura donner des buts à ses opérations de calculs. Ces buts existeront alors indépendamment des mécanismes qui les mettront en œuvre. Une telle machine saura alors développer une architecture adaptée à ses calculs. Une machine aura une rationalité délibérée si elle est capable de communiquer ses intentions à une autre machine et si elle sait intégrer les résultats qui lui sont renvoyés dans sa propre démarche de résolution de problèmes. Sa rationalité délibérée

sera mesurée selon sa manière d'intégrer, dans sa résolution de problèmes, des informations provenant de dialogues qui engagent une succession d'actes de langage. En ce sens, l'enfant utilise une rationalité délibérée lors de son apprentissage avec des adultes. Enfin, comme le temps imparti à un calcul est fini, une machine aura une rationalité limitée dans la mesure où elle préférera des comportements lui permettant d'agir en dépit de ressources limitées. C'est l'attitude des joueurs d'échecs gérant leur temps de réflexion limité par une pendule. C'est dans ce contexte qu'il faut comprendre comment une machine pourra faire équipe avec une personne dans une activité de résolution de problèmes : elle interviendra pour l'aider à résumer, recevoir, organiser et assimiler de grands volumes d'informations. Faire équipe implique de nombreuses fonctionnalités comme celles de communiquer selon des actes de langage, de s'attribuer des rôles, de réagir à la critique, d'apprendre à ne pas reproduire des erreurs. Si l'humanité a su dominer les lois du déplacement et construire des machines qui lui ont permis de se déplacer plus vite et avec moins d'effort, demeure la question de savoir si elle saura trouver les lois de la pensée et ainsi construire des machines lui permettant de penser plus vite et avec moins d'effort. L'idée que la rationalité des machines s'appuie aussi bien sur des calculs qui s'apparentent au raisonnement, que sur une organisation en agents, permet de situer l'informatique dans les sciences. Elle serait placée auprès de l'épistémologie, lui donnant une coloration plus calculatoire que l'on pourrait désigner sous le nom d'épistémométrie ou encore de calcul philosophique car elle instrumente la communication personne/machine, la représentation et le traitement raisonné de l'information dont on dispose sur soi-même, sur les autres ou sur le monde.

► BRETON P., *Histoire de l'informatique*, Paris, La Découverte, 1987. — HOFSTADTER D., *Gödel Escher Bach*, New York, Basic Books, 1979 (trad. fr. J. Henry & R. French, Paris, InterÉditions, 1985). — HUGUES K., *From Webspaceto Cyberspace*, Enterprise Integration Technologies, 1994. — IFRAH G., *Histoire universelle des chiffres*, Paris, Laffont, 1994.

Claude BOKSENBAUM et Jean SALLANTIN

→ Automate ; Complexité algorithmique ; Computation ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Monisme ; Réurrence ; Sciences cognitives ; Turing.

INSTITUT PASTEUR

Pasteur, qui vient de mettre au point un vaccin contre la rage et l'a administré avec succès à Joseph Meister le 6 juillet 1885, présente le 1^{er} mars 1886 ses résultats devant l'Académie des sciences. Il conclut : « Une institution dont la vocation sera la vaccination contre la rage doit être créée. » Peu après est officiellement ouverte la souscription pour la création d'un « institut vaccinal contre la rage ».

Le laboratoire qu'occupait jusqu'alors Pasteur, situé

à l'École normale supérieure, rue d'Ulm, voit affluer à cette époque de nombreuses personnes désireuses de se faire vacciner. Le docteur Yersin, assistant de Pasteur, décrit la scène : « On voit là un défilé extraordinaire : des Belges, des Hollandais, des Américains, un Arabe en costume national avec ses jambes nues couleur chocolat, des Turcs en fez et culottes courtes, des Russes qui, en passant devant M. Pasteur, se baissent pour lui baiser la main. C'est très curieux à voir. » Cet afflux massif, c'est aussi la gloire de Pasteur. Elle va assurer le succès de la souscription. En mai 1887 sont déposés les statuts de l'Institut Pasteur. Le bâtiment, situé rue Dutot (dans une partie de la rue qui portera plus tard le nom de « rue du docteur Roux »), est inauguré le 14 novembre 1888 en présence du président de la République, Sadi Carnot. Cet Institut sera un centre de traitement de la rage, mais aussi un centre d'études des maladies contagieuses et un lieu d'enseignement.

Une série de découvertes va forger très vite la réputation de l'Institut : en 1894, Roux, Martin et Chaillou développent une nouvelle thérapie qui permet de combattre la diphtérie, cause à l'époque de forte mortalité chez l'enfant (4 % en Europe). Une seconde souscription est lancée : elle sera employée essentiellement à la création d'écuries nécessaires à l'élevage des chevaux utilisés pour la production des sérums. Dans les premières années du XX^e s., une donation permettra la construction d'un hôpital d'un genre nouveau (les malades y sont logés dans des chambres individuelles, le personnel soignant entre par un couloir et sort par un balcon : dispositions architecturales simples mais efficaces contre les contagions hospitalières si fréquentes à l'époque).

À la demande de la ville de Lille, est créé, en 1894, l'Institut Pasteur de Lille. C'est là que sera mis au point (par Albert Calmette et Camille Guérin) un vaccin contre la tuberculose, le BCG. Après la mort de Pasteur (à Marnes-la-Coquette - lieu dit Villeneuve l'étang - dans le parc de Saint-Cloud en 1895), l'Institut Pasteur continue de se développer. À cette époque et pendant tout le premier quart du XX^e s., de nombreux scientifiques, formés à l'Institut Pasteur, entreprennent l'étude des maladies infectieuses « exotiques » (en 1908 sont créés la Société de pathologie exotique et le *Bulletin de pathologie exotique*), maladies qui sévissent dans les pays tropicaux et en particulier dans les territoires de l'Empire colonial français. Un Institut Pasteur est créé par Albert Calmette à Saïgon en 1891, l'Institut Pasteur de Tunis est créé en 1893 par Charles Nicolle, Alexandre Yersin crée l'Institut Pasteur de Nha Trang en 1895. En 1912, Calmette écrit : « En Extrême-Orient et en Afrique française, il n'est donc plus aucune de nos colonies qui ne possède, depuis plusieurs années déjà, des laboratoires convenablement outillés pour les recherches bactériologiques et pour l'application immédiate de méthodes pastoriennes... » Yersin, Nicolle, Calmette et quelques autres vont disséminer de par le monde le nom de l'Institut Pasteur et son ambition particulière (on exporte le concept, mais aussi la légende, la réputation). C'est ainsi que le nom

d'« Institut Pasteur » est aujourd'hui celui de vingt-deux centres de recherche à travers le monde - leurs statuts sont variés, ils ont souvent changé avec la décolonisation, mais le nom est généralement demeuré. Certains sont directement associés à l'Institut Pasteur de Paris, d'autres sont liés par des accords de coopération variés. Ils sont établis au Vietnam (Ho Chi Minh-Ville, Nha Trang et Hanoi), à Tahiti, en Bolivie, en Russie, en Guadeloupe, en Guyane, en Nouvelle-Calédonie, en Roumanie, en Iran, au Cambodge, en Italie, en Grèce. En Afrique, les Instituts Pasteur de Tunis et d'Alger ont été fondés en 1894, celui de Dakar en 1923, celui de Tananarive en 1927, celui de Casablanca en 1931, celui de Bangui en 1961. Des établissements associés existent aussi à Yaoundé depuis 1959 et à Brazzaville. En 1975, Jacques Monod, alors directeur de l'Institut Pasteur de Paris, créa le Réseau international des Instituts Pasteur et des Instituts associés qui regroupe l'ensemble de ces établissements.

À Paris, la diversification des activités de l'Institut a conduit à l'agrandissement du campus. De nouveaux terrains ont été acquis autour du site initial, de nouveaux bâtiments ont été construits. L'Institut Pasteur est une fondation privée reconnue d'utilité publique. Son financement est assuré environ pour moitié par l'État, et pour une autre moitié, par des ressources privées (exploitations des procédés, brevets, dons et legs, mécénat d'entreprise). Y travaillent près de trois mille personnes dont plus d'un millier de chercheurs.

Le centre d'enseignement dispense des cours dans les disciplines fondamentales de la biologie d'intérêt médical (biochimie des protéines, biologie moléculaire, génétique, immunologie, virologie, bactériologie, etc.). Le centre de recherche poursuit son activité dans le domaine des maladies infectieuses humaines : Sida (dont le virus a été identifié à l'Institut Pasteur en 1983), hépatite B, paludisme (trois cent millions de personnes atteintes actuellement dans le monde, deux millions de personnes en meurent chaque année), tuberculose (responsable de la mort de trois millions de personnes par an, essentiellement dans les pays en voie de développement), etc., mais également en recherche fondamentale : biologie du développement, génétique, neurobiologie, immunologie, etc.

► DAGOGNET F., *Pasteur sans la légende*, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1994. — DAVIDSON REYNOLDS M., *How Pasteur changed history : the story of Louis Pasteur and the Pasteur Institute*, Bradenton (Floride), McGuinn & McGuire Publ., 1994. — DEBRÉ P., *Louis Pasteur*, Paris, Flammarion, 1994. — DELAUNAY A., *L'Institut Pasteur, des origines à aujourd'hui*, Paris, Science Empire, 1962. — LATOUR B., *Les microbes, guerre et paix*, Paris, Métailié, 1984 ; *Pasteur, une science, un style, un siècle*, Paris, Perrin/Institut Pasteur, 1995. — LEGROUX R., *Institut Pasteur, cinquantenaire de la Fondation 1888-1938*, Paris, Dumoulin, 1939. — MORANGE M. dir., *L'Institut Pasteur, contribution à son histoire*, Paris, La Découverte, 1991. — RAICHWARG D., *Louis Pasteur, l'empire des microbes*, Paris, Gallimard, 1995. — SALOMON-BAYET C., *Pasteur et la révolution pastoriennne*, Paris, Payot, 1986. — VALLERY-RADOT M., *Pasteur*, Paris, Perrin, 1994.

— VINCENT P., *Pasteur, un homme, un Institut*, Paris, Hachette, 1995. — Coll. : *L'Institut Pasteur*, Institut Pasteur, Paris, 1982.

Pascal NOUVEL

→ Épidémie ; Immunologie ; Micro-organisme ; Monod ; Nicolle ; Pasteur contre Pouchet ; Sida.

INSTITUT ROCKEFELLER

En novembre 1906, le Rockefeller Institute for Medical Research ouvre ses portes à New York. Après l'université de Chicago (1890), c'est la seconde réalisation philanthropique de John Davison Rockefeller, le fondateur de la Standard Oil, la troisième sera la Fondation Rockefeller quelques années plus tard (1913). L'idée de créer un institut consacré à la recherche médicale revient à l'un de ses conseillers, le révérend Frederick T. Gates, ainsi qu'à son fils John D. Rockefeller Junior, inspirés par certaines réalisations du vieux continent, notamment l'Institut Pasteur de Paris ou l'Institut Koch de Berlin. L'Europe du XIX^e s. a vu naître la médecine scientifique sous la poussée de nouvelles disciplines que sont la physiologie, la bactériologie ou la biochimie, et c'est l'université allemande qui a formé une génération de médecins américains. De 1870 à 1914, on estime à quinze mille le nombre de jeunes Américains qui sont allés parfaire leurs études médicales en Allemagne. Parmi ces médecins, William Osler et William H. Welch ont créé la Johns Hopkins Medical School de Baltimore (1884), la seconde faculté de médecine des États-Unis après celle de Harvard. Ils sont les inspireurs de l'Institut Rockefeller, dont le premier président, W. Welch, qui est passé par le laboratoire de Virchow, a formé ses élèves (les Welch Rabbits) dans la conviction qu'il n'y a qu'une seule médecine et qu'elle ne saurait être que scientifique. Geste significatif, Welch installe à l'Institut Rockefeller le comité éditorial du *Journal of Experimental Medicine*, la première publication scientifique médicale des États-Unis. L'Institut Rockefeller, qui ne comptait que six scientifiques à ses débuts, voit ses effectifs croître rapidement. Il dispose d'une quarantaine de chercheurs en 1914 et en abritera plus de cent en 1926, avec 400 aides techniques, alors qu'il est devenu financièrement autonome, doté par Rockefeller d'un capital d'une soixantaine de millions de dollars. L'Institut se dote d'un hôpital en 1910, comme ses homologues parisien ou berlinois, un établissement de petite taille, mais qui abrite des cliniciens-chercheurs de qualité.

Le premier directeur de l'Institut Rockefeller est l'un des plus distingués « Welch Rabbits », le bactériologiste Simon Flexner. Flexner est tout aussi convaincu que son maître que l'avenir de la médecine passe par le laboratoire. « Après deux cents ans de métaphysique et de philosophie, nous pouvons dire que la médecine est en passe de devenir une vraie science », dira-t-il un jour à son confrère Peyton Rous. Flexner est aussi responsable du premier, et du plus important, département de

L'Institut Rockefeller, celui de bactériologie. Lors de sa formation en Europe, il a noué des liens avec le pasteurien Calmette (l'inventeur du bcc), et les relations entre les deux organismes resteront étroites. Mais à New York, sa première tâche est de lutter contre la méningite cérébro-spinale dont une épidémie a fait trois mille morts en 1903. Il met au point un sérum qui sauvera de nombreuses vies humaines, jusqu'à l'avènement des sulfamides quelques décennies plus tard. Ce premier succès attire l'attention du monde savant et médical sur les réalisations de l'institut new-yorkais. Cependant, le révérend Gates, soucieux de la gloire des Rockefeller, médiatise l'affaire à outrance et l'Institut se trouve embarqué dans des polémiques avec les services d'hygiène de l'État de New York, au grand dam du docteur Flexner, pour lequel la recherche ne saurait se départir d'un minimum d'humilité.

Par la suite, Simon Flexner et son collaborateur japonais Hideyo Noguchi s'attaquent à d'autres maladies infectieuses, la syphilis par exemple. Ils isolent l'agent pathogène après Schaudinn, le tréponème, et ils mettent au point un traitement (Tryparsamide) plus efficace et moins onéreux, disent-ils, que son concurrent allemand (Salvarsan). En relations avec la Fondation Rockefeller, l'Institut s'intéresse aussi aux grandes maladies tropicales, comme la fièvre jaune. Un vaccin sera réalisé par un chercheur de l'Institut, Max Theiler, à la veille de la Seconde Guerre mondiale. Flexner a aussi étudié la poliomyélite. En 1908, il isole le virus responsable grâce à un filtre en porcelaine, d'où le terme de « virus filtrant », mais il faudra encore de très nombreuses années pour la mise au point d'un vaccin. Celui-ci ne sera obtenu qu'au cours des années 1950, entre autres grâce à un chercheur entré à l'Institut en 1935, Albert B. Sabin.

L'autre grand département de l'Institut Rockefeller est celui de physiologie générale, il est dirigé par Samuel J. Meltzer. C'est d'ailleurs un neuro-physiologiste, Herbert Gasser, qui succédera à Flexner à la tête de l'Institut en 1933. Un point à souligner est que, d'emblée, Meltzer a refusé que l'Institut s'intéresse au problème du cancer « [...] qui ne sera pas résolu dans un institut, car les mécanismes de la cancérisation relèvent de la recherche fondamentale ». Cette singulière prescience n'empêche pas les premiers linéaments d'une théorie virale du cancer d'être posés à l'Institut. En 1910, Peyton Rous, un clinicien formé à Johns Hopkins, est recruté par Flexner afin d'étudier les sarcomes induits chez les animaux, et il met en évidence le rôle d'un virus dans la tumeur de la patte du poulet. On parlera plus tard de rétrovirus, une découverte récompensée par un Nobel tardif, en 1966. Mais à la survenue de la Grande Guerre, Rous a abandonné ses poulets pour se consacrer aux techniques de conservation des sérums de la transfusion sanguine ainsi qu'à l'immunologie fondamentale.

À la création de l'Institut, Simon Flexner a aussi recruté un chirurgien français, le docteur Alexis Carrel, l'inventeur d'une technique de suture des vaisseaux sanguins. Carrel s'est ensuite intéressé aux cultures

cellulaires, et il réussit à cultiver *in vitro* des cellules de cœur de poulet, ce qui lui vaut le Nobel de médecine en 1912, première récompense revendiquée par l'Institut new-yorkais. Les cultures cellulaires de Carrel ont ouvert la voie de la médecine de greffe (il inventera une pompe cardiaque avec Charles Lindbergh en 1935) et à la compréhension des mécanismes de l'immunologie. On connaît moins son travail sur le cancer. À la fin des années 1920, Carrel se fait installer par un Flexner indulgent mais sceptique un gigantesque élevage de souris (5 000 animaux), mais dont il ne réussira pas à maîtriser les données expérimentales. Cet échec l'oriente vers des spéculations plus théoriques, notamment en eugénisme, dont il tirera un best-seller, *L'Homme cet inconnu*, avant de quitter les États-Unis en 1941 pour créer en France une fort contestée Fondation pour l'étude des problèmes humains.

L'Institut a accordé une place majeure à l'immunologie, une discipline située aux frontières de la recherche clinique et de la biologie fondamentale. En 1923, Flexner recrute Karl Landsteiner, un médecin autrichien qui a identifié les groupes sanguins humains (1900). Pour user d'une terminologie actuelle, Landsteiner a découvert l'existence d'antigènes dans les hématies (globules rouges) qui déterminent des groupes sanguins, ce faisant le médecin autrichien avait montré que le sang est le seul tissu où existe à l'état naturel un système antigènes-anticorps. À l'Institut Rockefeller, Landsteiner produit des antigènes artificiels, des haptènes (un terme de son invention) capables d'engendrer des anticorps et de réagir avec d'autres protéines. Pour relier la spécificité chimique des anticorps à leurs structures moléculaires, Landsteiner suggère à un chimiste du Caltech, Linus Pauling, de s'intéresser à l'hémoglobine, dont ce dernier tirera la représentation « Hélice Alpha » de la structure des protéines. À la fin de sa carrière, Landsteiner complète son système de groupes sanguins en découvrant le facteur Rhésus (1940).

Dès ses débuts, l'Institut Rockefeller a magnifié le rôle de la recherche fondamentale de pointe, en amont de la recherche clinique. Cependant, l'introduction de la biochimie en ses murs ne s'est pas opérée sans quelques réticences. Jacques Loeb, un biochimiste d'origine allemande, pensait que la biologie repose sur l'étude des échanges intercellulaires, et il se proposait d'utiliser des sels de sodium ionisés pour tenter de comprendre l'embryogenèse des oursins. En 1910, lorsqu'il est recruté par Flexner pour ouvrir le département de biologie à l'Institut, certains administrateurs s'interrogent sur l'intérêt de son programme de recherche, la perméabilité du protoplasme cellulaire, dans un organisme en principe voué à la recherche médicale. « Si vous me demandez pourquoi l'Institut Rockefeller doit s'adjoindre un nouveau département de biologie expérimentale, leur rétorque Loeb, je dirais qu'à l'avenir la biologie cellulaire répondra non seulement aux questions posées par la physiologie, mais aussi par la pathologie générale et par la thérapeutique. »

L'essentiel des recherches biochimiques menées à l'Institut concerne les protéines, ces macromolécules d'acides aminés qui constituent l'un des éléments de base de la matière vivante. Wendell M. Stanley, recruté en 1931, montre dans son laboratoire de Princeton que la mosaïque du tabac est un virus constitué d'une protéine cristallisée. En 1946, il partagera le Nobel de chimie avec John H. Northrop, un autre chercheur de l'Institut qui a isolé le premier enzyme de la digestion, la pepsine, et qui a prouvé que les enzymes sont des protéines. Plus récemment, Robert B. Merrifield (entré en 1949) sera récompensé pour la synthèse des chaînes polypeptidiques ou Stanford Moore (recruté en 1952) pour avoir déterminé la structure de l'enzyme ribonucléase (ARN, ou acide ribonucléique) grâce à l'analyse chromatographique.

Une autre grande découverte de l'Institut Rockefeller est due à un médecin, Oswald T. Avery, qui a mis en évidence le rôle de l'acide désoxyribonucléique (ADN) dans les mécanismes de l'hérédité. D'origine canadienne, le docteur Avery avait été embauché à l'hôpital Rockefeller à la veille de la Première Guerre mondiale pour localiser l'agent infectieux des pneumonies et pour réaliser un vaccin. Il isole la bactérie responsable, qu'il qualifie de « pneumocoque » car sa membrane extérieure est doublée d'une capsule de polysaccharide. En 1929, son collaborateur René Dubos, un biochimiste agronome d'origine française, isole l'enzyme capable de lyser la coque de polysaccharide, ce qui marque d'ailleurs le début d'une longue et belle carrière à l'Institut, décrite dans un livre de souvenirs attachant (cf. bibliogr.). Dubos a créé un antigène capable de produire des anticorps contre des pneumocoques virulents, ouvrant la voie à une nouvelle discipline, l'immunochimie, ce qui l'amènera ensuite à étudier les premiers antibiotiques (gramicidine et tyrocidine). Pour en revenir au pneumocoque, un médecin britannique, Fred Griffith, avait montré que des souches inertes devenaient virulentes après avoir été mélangées à des pneumocoques virulents, mais tués par la chaleur. Ce qui suggère à Avery qu'il existe dans la cellule bactérienne un « facteur transformant ». Avec son collaborateur Colin McLeod, il entreprend d'isoler tous les constituants du pneumocoque et il arrive à une substance qui possède le caractère mutagène à un très haut degré, un acide désoxyribonucléique dont la structure moléculaire (à base de quatre nucléotides) avait été élucidée par le biochimiste Phoebus Levene, en ce même Institut, au début des années 1920. En 1944, le docteur Avery et ses collaborateurs peuvent signer dans le *Journal of Experimental Medicine* un article où ils établissent le rôle de l'ADN comme vecteur du message génétique.

En conclusion, c'est peu dire que l'Institut Rockefeller a participé à la grande révolution scientifique du XX^e s. qui a vu naître la biologie et la génétique moléculaires, il en a été l'un des principaux artisans. Alors que l'Institut fonctionnait comme un centre de recherche médicale, en 1955 à l'heure d'étendre sa vocation à l'enseignement, il disposait de toutes les qualités

requis pour devenir une université Rockefeller. Mais il n'a pas abandonné la recherche pour autant. En témoignent son intérêt pour la nouvelle médecine génétique et ses récents travaux sur le gène de l'obésité, un important problème sanitaire de l'Amérique contemporaine.

► BLUMENTHAL A.K., *Leadership in Medical Philanthropy : Simon Flexner and the Rockefeller Institute for Medical Research*, Drew Univ., 1991 (Ph.D.). — CORNER G.W., *A History of the Rockefeller Institute, origins and growth, 1901-1953*, New York, Rockefeller Univ. Press, 1964. — DUBOS R.J., *The Professor, the Institute, and DNA*, New York, Rockefeller Univ. Press, 1976. — FLEXNER S., *A Half Century of American Medicine*, Louisville, Univ. of Louisville Press, 1937. — JONAS G., *The Circuit Riders. Rockefeller Money and the Rise of Modern Science*, New York, W.W. Norton, 1989. — PICARD J.-F., *La Fondation Rockefeller et la recherche médicale*, Paris, PUF, 1999. — Internet : ROCKEFELLER ARCHIVES CENTER : <http://www.rockefeller.edu/archive.cfr/>

Jean-François PICARD

→ Immunologie ; Prix Nobel des sciences.

INSTRUMENT

Descartes a indiqué dans son traité *De l'Homme* l'analogie entre les sens et les instruments : si la lentille est une sorte d'œil plus puissant, l'œil peut être assimilé à une lentille qui permet la formation de l'image, l'analogie fonctionne dans les deux sens. Plus près de nous, l'anthropologue Marcel Mauss a souligné que le corps est le premier instrument de l'homme : les différentes cultures attestent la variété de ses usages. L'instrument scientifique, dont le rôle est crucial dans l'accroissement du savoir, est ainsi ancré dans la vie profane et matérielle.

Dès lors que l'homme ne se contente plus d'observer à l'aide des cinq sens, il cherche des adjuvants pour surmonter leurs limitations dans l'exploration de la nature : « Les instruments et les règles sont comme des muscles surajoutés aux bras, et des ressorts accessoires à ceux de l'esprit [...] Le but de tout art en général ou de tout système d'instruments et de règles conspirant à une même fin, est d'imprimer certaines formes déterminées sur une base ordonnée par la nature » (article « Art », dans l'*Encyclopédie* de Diderot). Le terme d'instrument renvoie donc de façon générale à l'usage d'un objet fabriqué assujéti à une fin : l'instrument scientifique n'est qu'un stratagème parmi d'autres. Mais, bien qu'inféodé à un dessein théorique, à mesure que son efficacité augmente, il a acquis au cours de l'histoire une sorte d'autonomie. L'évolution de la philosophie des sciences à son égard reflète ce changement, qui reflète l'émancipation moderne de la technologie. Les instruments sont devenus de véritables acteurs dans le champ de la recherche. Aussi leur diversité et celle de leurs usages retiennent-elles aujourd'hui de plus en plus l'attention des historiens et des sociologues des sciences.

L'intérêt pour les instruments a coïncidé avec le renouveau de la muséographie. Celle-ci, en cherchant une pédagogie apte à suggérer toutes les dimensions matérielles, sociales, intellectuelles et esthétiques du patrimoine, a parfois même anticipé sur les historiens. Les musées, autrefois reposoirs de curiosités étiquetées dans des vitrines, ont subi un rajeunissement. Le musée des Sciences de Munich a donné l'exemple dans les années 1960 : les objets y étaient non seulement observables mais manipulables au prix de dispositifs adaptés. Les historiens de leur côté ne se contentent plus des reproductions photographiques, ils prennent contact avec les instruments anciens et les différents prototypes, s'initient à leurs caractéristiques précises afin d'élucider leur fonctionnement et d'en percevoir les difficultés propres. Certains, tel Simon Schaffer, ont monté des expériences célèbres comme un spectacle qui les instruit dans sa théâtralité sur les voies de la persuasion.

Le recours aux instruments est en effet indissociable de l'activité scientifique lorsque celle-ci se fait expérimentale, comme l'attestent les portraits qui, depuis la Renaissance au moins, représentent les savants dans l'exercice de leurs activités, entourés de sphères, de fioles, de compas. L'essor des instruments scientifiques au XVIII^e s. a amené ces derniers à réfléchir sur les conditions de validité des observations effectuées avec leur aide. Une condition *sine qua non* était leur reproductibilité. Elle supposait résolu le contrôle des facteurs intervenant dans la marche de l'expérience et impliquait la possibilité de la refaire ailleurs avec des instruments similaires. Les expérimentateurs contemporains de Newton postulaient l'homogénéité des phénomènes naturels, qu'ils soient observés à l'intérieur ou hors du laboratoire. Le problème de la standardisation de l'observation et de l'instrument était ainsi simultanément posé. Une distinction était opérée entre les instruments « passifs », qui permettaient de franchir des échelons dans le microscopique ou le macroscopique, soulevant le problème de la réalité de la vision, qu'il s'agisse des nouvelles étoiles ou des cellules, et les instruments « actifs », destinés à interroger la nature, permettant la réalisation d'expérimentations cruciales chargées de trancher en faveur de telle ou telle hypothèse au cours d'un débat contradictoire : l'usage des prismes pour élucider la nature de la lumière en est un bon exemple.

Au XVIII^e s., les instruments sont très présents dans l'*Encyclopédie*. Mais si des planches s'efforcent de faire comprendre à la fois les principes qui les régissent et les secrets de leur fonctionnement, la science est l'élément dominant. Jusqu'au XX^e s., l'histoire des sciences reste d'ailleurs dominée par l'étude des théories. La coupure épistémologique évoquée par Gaston Bachelard entre les théories sous-jacentes aux conceptions de la matière, de la vie, du temps et de l'univers est remplacée par la notion de révolutions scientifiques chère à Thomas Kuhn et à ses épigones, sans qu'intervienne vraiment la culture matérielle du savant, bien que Bachelard comme Kuhn aient fourni

des suggestions en ce sens. Bachelard ne parlait-il pas des instruments comme de « théorèmes réifiés », Koyré de « la réalisation consciente d'une théorie » ?

L'analyse des controverses scientifiques a fait intervenir des acteurs moins désincarnés, et mus par les seules idées, que dans l'historiographie passée. L'application de la notion de style à des écoles nationales ou à des équipes a également suggéré la diversité des méthodes scientifiques où le choix des instruments et les partis pris guidant leur utilisation ont leur importance. L'insistance mise par les marxistes sur la notion de *praxis* allait également dans le sens d'une reconnaissance à travers l'instrument de la matérialité des sciences. L'instrument a été enfin projeté au premier plan avec les microétudes de l'anthropologie des sciences sur la culture locale des laboratoires. Elles passaient inévitablement par l'apprentissage des instruments et la découverte de savoir-faire.

À partir du moment où la notion d'instrument est devenue centrale, elle a tendu à gagner en extension et en organisation. La tendance actuelle est d'intégrer parmi les instruments scientifiques, à côté des appareils de mesure, des machines et des ordinateurs, de nouvelles entités. Le livre, par exemple, en fait certainement partie, à condition que l'on tienne compte de l'usage particulier qu'en fait le scientifique. En biologie, les animaux de laboratoire, tout au moins ceux qui ont été standardisés à des fins bien précises, comme les souris de race dite pure, obtenues par croisements à l'intérieur de la même lignée, ou les animaux transgéniques peuvent être considérés comme des instruments ; c'est le parti pris adopté en 1998 par l'*Encyclopédie de l'instrument* du Science Museum à Londres. Le rôle de ces animaux en génétique a pu être comparé à celui de la balance dans l'histoire de la chimie, dans la mesure où, comme elle, ils créent des différences au sein d'un matériel homogène et ont joué un rôle décisif dans l'établissement d'une discipline et la découverte de ses lois.

Le domaine de l'instrumentation s'est donc à la fois déployé et diversifié, et a fait l'objet d'une enquête renouvelée sur les conditions de validité des observations et de déductibilité des lois. Une dialectique nouvelle est perçue entre théorie et expérimentation, la seconde vérifiant la première mais suggérant aussi de nouvelles directions de recherche, les instruments permettant de faire évoluer la théorie en un sens parfois imprévisible.

Aujourd'hui, les sociologues des sciences, plutôt que mettre l'accent sur la coupure épistémologique séparant la connaissance ordinaire du savoir scientifique, préfèrent insister sur la définition primaire de la science comme savoir-faire. L'instrument devient la voie royale d'accès au raisonnement expérimental en suggérant comment les réponses aux questions sont poursuivies à travers la construction de nouveaux appareils, en collaboration avec d'autres disciplines. L'anthropologie de laboratoire a rompu avec la tradition qui voyait les travaux expérimentaux comme autant d'illustrations de la même démarche rationnelle

et des mêmes principes abstraits. Elle a suggéré une rationalité plus multiforme, plus souple et plus changeante que par le passé, et a contribué à rapprocher l'activité scientifique des autres activités humaines supposées jusque-là d'une rationalité moindre ou inférieure.

Les instruments ont ainsi acquis une place importante dans la démarche constructiviste de la philosophie contemporaine des sciences puisqu'ils offrent un moyen privilégié d'accéder aux pratiques qui fondent la science, et diffusent dans la société par des réseaux. Les instruments, par les compétences et les brevets qu'ils impliquent pour leur fabrication et leur amélioration, participent directement à la compétition qui caractérise la science moderne. La possession d'un instrument sophistiqué donne en effet une position de monopole au groupe d'experts rassemblés autour de lui et joue un rôle décisif dans la formation d'une discipline. Par exemple, l'appareil servant à l'électrophorèse des molécules, mis au point par Tiselius à Uppsala avant la Seconde Guerre mondiale, donna une longueur d'avance à un pays et à une équipe, et permit l'identification précise des anticorps dans le sang, légitimant l'immunologie et la positionnant comme une des sources de la biologie moléculaire. L'ultracentrifugeuse joua un rôle décisif dans la vision des virus et des protéines comme des macromolécules. L'acquisition de l'appareillage d'avant-garde sert de marqueur pour suivre le développement d'une théorie ou d'une discipline à l'échelle internationale.

D'autre part, les instruments ne sont plus considérés isolément, ils font partie d'un système expérimental. On entend par là un dispositif qui intègre les démarches par lesquelles un prototype est adopté, modifié, inséré dans un protocole de recherche, lui-même partie intégrante d'un programme qui reçoit des financements, le choix et la récolte des spécimens soumis à l'étude, la comparaison avec les résultats fournis par d'autres techniques... Une telle démarche, outre qu'elle décele un travail à long terme qui n'apparaît guère dans les récits de découverte privilégiant l'instantané, fait une part à l'échec, à l'aléatoire, à l'incertitude, bref révèle une histoire arborisée et non rectiligne. L'étude des carnets de laboratoire, mise à l'honneur par Larry Holmes pour Claude Bernard, par Gerald Geison pour Louis Pasteur, a contribué à la compréhension de ces systèmes expérimentaux qui ne sont guère explicites dans la littérature scientifique officielle.

L'innovation instrumentale a reçu beaucoup d'attention comme moteur de nos sociétés contemporaines. Elle soulève nombre de questions épistémologiques sur les modalités de la validation de ses données, s'agissant de phénomènes inédits. Si on prend l'exemple des instruments producteurs d'images, qu'ils utilisent les rayons X, les ultrasons ou la résonance magnétique, il existe plusieurs façons de tester empiriquement la nouvelle procédure. On peut légitimer l'instrument en invoquant une théorie physique ou biologique, indépendante du domaine d'application de la nouvelle technique. On peut confronter les images obtenues avec des

images provenant de techniques antérieures (confrontation de la radiographie avec des données cliniques ou nécropsiques, par exemple). Dans l'étape suivante, quand les images ou les produits de la technique se multiplient en fonction des applications et de la diffusion géographique du procédé, la technique se confronte avec elle-même et l'instrument acquiert sa capacité de standardisation interne.

Certains sociologues des sciences ont insisté sur le caractère artificiel, voire artificiel, des données produites par des instruments prestigieux. Les entités observables peuvent se multiplier en fonction des paramètres choisis. Alberto Cambrosio propose l'exemple du FACS (*Fluorescent Antibody Cell Sorter*), qui sépare des cellules sur la base de leurs affinités avec des récepteurs et invente des cellules dont la signification physiologique dans l'organisme vivant est au moins provisoirement inassignable.

Si les instruments sophistiqués de la physique comme les accélérateurs de particules symbolisent ce qu'on appelle après la Seconde Guerre mondiale la Big Science, la biologie connaît désormais elle aussi cette concentration spectaculaire de moyens autour d'instruments qui produisent des masses de données. La biologie moléculaire en offre de nombreux exemples. Le plus connu est évidemment l'instrument qui permet de procéder au séquençage du génome humain, dont le programme d'analyse a frappé l'opinion par l'ampleur de ses retombées futuristes en médecine humaine et des problèmes éthiques qu'il soulève. L'instrument dans sa monumentalité est désormais au centre de l'entreprise de compréhension et de transformation du monde, de lutte contre la mort et d'amélioration de l'espèce humaine, enjeux vertigineux. Il est aussi le pivot de la compétition entre les nations pour la maîtrise des informations et des phénomènes, et vient s'inscrire dans une histoire géopolitique qui rend intelligibles les multiples stratégies dont il est l'objet.

Les données fournies par l'instrument ne servent pas seulement à se reconnaître dans le champ considéré et à y repérer des phénomènes innomés, mais à s'y déplacer. Le *mapping*, terme popularisé par la génétique moléculaire, rappelle qu'un instrument sert simultanément la connaissance et l'action. L'aspect interventionnel semblait prédominant dans les instruments de médecine. Le couteau ou la lancette apparaissaient plus proches des outils des artisans que des appareils du savant. La biologie et la médecine ayant contracté une alliance durable, les instruments de la physique et de la médecine sont devenus plus proches, comme les appareils fondés sur l'usage des ultrasons (échographe), les différents scanners, les lasers et les fibroscopes, la plupart ayant en commun de permettre à la fois de voir et d'intervenir sous contrôle de la vue.

L'instrument figure assez bien le rapport simultané de la science au pouvoir et à la vérité. Son étude, qui fut un temps considérée comme une machine de guerre des sociologues des sciences contre les historiens plus traditionnels, pourrait finalement réconcilier relativistes et réalistes, en instruisant sur la diversité des

raisons et des pratiques, de manière aussi bien diachronique que synchronique. L'histoire des instruments est philosophiquement intéressante en un autre sens, en ce qu'elle concilie l'incorruptible notion de progrès et celle d'un éternel recommencement, la tradition scientifique de cumul et de radicalisme. En d'autres termes, les instruments offrent un biais particulièrement favorable pour observer comment la science progresse en se contredisant. L'instrument scientifique a ainsi acquis une dignité et une fécondité épistémologique sans précédent.

► BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, PUF, 1938 ; *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951. — BEAUNE J.-C., « Technologie », *Encyclopédie Philosophique*, Paris, PUF, 1991, t. 1, p. 965-973 ; *Philosophie des milieux techniques. La matière, l'instrument, l'automate*, Seyssel, Champ Vallon, 1998. — BRACEGIRDLE B., « The microscopical tradition », *Companion Encyclopedia of the History of Medicine*, éd. W.F. Bynum & Roy Porter, Londres, 1993, t. 2, p. 102-119. — BUD R. & COZZENS S.E., *Invisible Connections, Instruments, Institutions and Science*, Washington, SPIE Optical Engineering Press, 1991. — BUD R. & WARNER D.J. éd., *Instruments of Science, An historical Encyclopedia*, Londres, Garland, 1998. — CLARKE A. & FUJIMURA J., *The Right Tool for the Job : at Work in 20th Century Life Sciences*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1992. — GALISON P., *Image and Logic. A material culture of microphysics*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1997. — GILLE B., *Histoire des techniques*, Paris, Gallimard, 1978. — GODDING D., PINCH T. & SCHAFER S. éd., *The Uses of Experiment. Studies in the Natural Sciences*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1989. — GUILLERME A. éd., *Techniques et technologies*, Paris, Hachette, 1973. — HACKING I., *Representing and Intervening. Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1988. — KOYRÉ A., « Du monde de l'à-peu-près à l'univers de la précision », *Critique*, 1948, n° 28. — LATOUR B. & WOOLGAR S., *Laboratory Life. The Construction of Scientific Facts*, Beverly Hills, Sage, 1979. — LAWRENCE G., « The ambiguous artifact. Surgical instruments and the surgical past », *Medical Theory, Surgical Practice*, éd. C.J. Lawrence, Londres, Routledge, 1992, p. 295-311. — MOULIN A.M. & PELIS K., « Medical Instruments », *Reader's Guide to the History of Science*, éd. A. Hessenbruch, Londres, Fitzroy Dearborn, 1998. — RABINOW P., *Making PCR*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1996. — RASMUSSEN P., *Picture Control. The Electron Microscope and the Transformation of Biology in America, 1940-1960*, Stanford, Stanford Univ. Press, 1997. — RIEU A.M., « Technologie », *Encyclopédie Philosophique*, Paris, PUF, 1993, t. 4, p. 2556-2562. — SHAPIN S. & SCHAFER S., *Leviathan and the Air Pump*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1985 (trad. fr., Paris, La Découverte, 1993). — SIMONDON G., *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 1964.

Anne Marie MOULIN

→ Automate ; Épistémologie ; Expérience ; Technique.

INTENTIONNALITÉ

Le concept d'intentionnalité occupe une place importante dans la philosophie médiévale, où le terme d'*intentio* est utilisé pour désigner soit l'acte mental par lequel l'esprit s'applique à un objet de connaissance, soit l'objet même de cet acte de connaissance en

tant qu'il est saisi par l'esprit. Il a été réintroduit dans la philosophie moderne par Franz Brentano, qui voyait dans l'intentionnalité la marque du mental. Dans son usage actuel, l'intentionnalité désigne la propriété qu'a l'esprit de pouvoir renvoyer à quelque chose, être dirigé ou orienté vers un objet. En ce sens, les phénomènes mentaux tels que les désirs, croyances, intentions, souvenirs et perceptions sont des phénomènes intentionnels. Le terme d'intentionnalité pris au sens technique ne doit être confondu ni avec intention ni avec intension. Dans l'acception usuelle, un acte est intentionnel s'il est prémédité ou réfléchi. Les intentions ne sont qu'un type particulier de phénomènes intentionnels, au même titre que les croyances, désirs ou perceptions. Les intensions sont des propriétés ou concepts par opposition à des extensions. Ainsi, avoir un cœur et avoir un rein ont même extension, car tous les êtres dotés de l'un de ces organes ont aussi l'autre, mais une intension différente. Il existe toutefois un lien étroit entre intentionnalité et intensionnalité, dans la mesure où les états intentionnels manifestent une intensionnalité caractéristique. On peut, par exemple, croire que les tortues ont un cœur sans croire qu'elles ont des reins.

Le problème de l'intentionnalité consiste à développer une théorie unifiée de la propriété de renvoi à des objets qu'ont les actes mentaux, alors même que ces objets peuvent être non seulement des objets physiques existants, mais aussi à des *abstracta*, comme les nombres, des *ficta*, comme le père Noël, ou des *impossibilia*, comme les cercles carrés. Deux solutions principales ont été proposées, la première concevant l'objet intentionnel comme contenu dans la conscience et donc immanent, la seconde comme une entité objective, extérieure à l'esprit du sujet. On peut en outre distinguer deux variantes à l'intérieur de la position immanentiste : la première conçoit l'intentionnalité comme une relation intrapsychique entre un sujet ou un acte et un objet mental, alors que la seconde fait de l'intentionnalité une propriété ou une modification du sujet ou de l'acte. L'avantage de la solution immanentiste, qui a notamment été défendue par Brentano, est de proposer un traitement unifié de la structure des différents types d'actes intentionnels. En revanche, elle semble incapable d'expliquer comment l'esprit peut transcender la sphère du mental et entrer en contact véritable avec les objets du monde. Inversement, le second type de position qui conçoit l'intentionnalité comme une relation authentique entre un acte et une entité existant indépendamment de l'esprit ne peut proposer un traitement unifié des actes intentionnels puisque certains de ces actes n'ont pas d'objet véritable. Une première solution à cette difficulté a été proposée par Meinong avec sa « théorie des objets purs » où l'existence est traitée comme un prédicat que des objets peuvent ou non posséder. Par ce moyen, il règle les problèmes posés par les objets non existants et autorise un traitement uniforme des différents types d'actes intentionnels tous dotés d'un objet qui peut ou non exister ou subsister. En revanche, il ne rend pas compte du caractère

particulier de la relation intentionnelle caractéristique des actes véridiques où le terme de la relation est un objet existant.

La voie nouvelle ouverte par Husserl, et ensuite empruntée tant par différents courants phénoménologiques que par la philosophie contemporaine de l'esprit, consiste à interpréter l'intentionnalité non pas comme une relation binaire entre un acte et un objet mais comme une relation plus complexe faisant intervenir un sujet, un acte, un contenu et (dans les cas véridiques) un objet. On peut ainsi rendre compte à la fois de ce qui est commun à tous les actes mentaux — tous ont un contenu — et de ce qui est distinctif des actes véridiques ou réussis — à leur contenu correspond un objet. Toutefois, il existe d'importantes différences dans la manière dont les différentes versions de cette approche analysent le complexe intentionnel et conçoivent le statut ontologique de ses termes. Ainsi, alors que le premier Husserl concevait le contenu idéal d'un acte comme l'espèce que le contenu réel de l'acte instancie et son objet comme un objet du monde réel existant indépendamment de la conscience, après son tournant idéaliste il conçoit le contenu idéal ou noème comme une signification idéale, et sa redéfinition de la transcendance objective rend l'objet dépendant d'une subjectivité constituante. De même, de nombreuses analyses proposées en philosophie analytique de l'esprit conçoivent la relation intentionnelle aux objets du monde externe comme indirecte, mais elles divergent quant à leur conception de la nature des entités intermédiaires permettant l'établissement de cette relation. Aux analyses qui font d'entités abstraites les propositions, les vecteurs de cette relation s'opposent celles qui font jouer ce rôle aux représentations mentales, chaque approche comportant autant de variantes qu'il y a de théories des propositions et des représentations mentales.

Le débat contemporain en philosophie de l'esprit a en outre été marqué par un réexamen de la thèse de Brentano, selon laquelle l'intentionnalité est la marque du mental. Cette thèse a été interprétée comme une thèse d'irréductibilité : le mental, en vertu de son intentionnalité, ne saurait être réduit au physique, et, par conséquent, une science de l'intentionnalité devrait être autonome par rapport aux sciences de la nature. Cet antinaturalisme est au cœur des approches phénoménologiques. En revanche, le développement des sciences cognitives, qui se veulent sciences naturelles de l'esprit, a placé la question de la naturalisation de l'intentionnalité au centre du débat contemporain, donnant lieu à un large éventail de positions sur la réductibilité ou l'irréductibilité de l'intentionnalité et leurs conséquences ontologiques. De nombreuses tentatives ont été faites pour produire une explication naturaliste des phénomènes intentionnels. Les sémantiques fonctionnalistes visent à rendre compte des propriétés représentationnelles des états mentaux en termes des relations causales internes qu'ils entretiennent avec d'autres états mentaux, les entrées sensorielles et les

sorties comportementales. Les sémantiques causales et téléologiques mettent, elles, l'accent sur les relations causales que ces états entretiennent avec les objets ou propriétés de l'environnement externe et sur les fonctions biologiques qu'ils servent. Si aucune des solutions avancées à ce jour n'apparaît totalement satisfaisante, le dynamisme du débat actuel témoigne à tout le moins de la fécondité d'un dialogue de la philosophie avec les sciences cognitives.

► BRENTANO F., *Psychologie vom empirischen Standpunkt*, 1924-1928 (trad. fr., *Psychologie du point de vue empirique*, Paris, Aubier-Montaigne, 1944). — HUSSERL E., *Ideen zu einer reinen Phänomenologie und phänomenologischen Philosophie*, 1913 (trad. fr., *Idées directrices pour une Phénoménologie*, Paris, Gallimard, 1950). — PACHERIE É., *Naturaliser l'intentionnalité*, Paris, PUF, 1993. — SEARLE J.R., *Intentionality*, 1983 (trad. fr., *L'intentionnalité*, Paris, Minuit, 1985).

Élisabeth PACHERIE

→ Dennett ; Donné ; Husserl ; Phénoménologie ; Transcendantal.

INVARIANCE DE JAUGE

On sait que depuis Galilée les propriétés de symétrie, ou d'invariance, ont joué un rôle essentiel pour permettre une approche objective de la réalité physique : sont objectivés les aspects de la réalité qui se maintiennent lorsque l'on change le point de vue à partir duquel on observe cette réalité. On appelle symétrie précisée cette immunité de la réalité objective face à un changement de référentiel. D'un point de vue mathématique, on dira qu'une certaine théorie possède certaines symétries si les équations qui la traduisent sont invariantes lorsque l'on opère sur elles certaines transformations. En mécanique rationnelle classique, les propriétés de symétrie sont mathématiquement équivalentes à des lois de conservation.

Le recours aux propriétés de symétrie pour caractériser l'objectivité est encore plus crucial dans le cadre de la physique quantique car, le quantum d'action introduisant un rapport insécable entre l'objet physique et l'appareil de mesure, il est nécessaire d'inclure les conditions de l'observation dans le contenu même des concepts, et seules les propriétés de symétrie peuvent permettre d'accéder aux propriétés intrinsèques de la réalité physique lorsque l'on défalque des données expérimentales l'effet de variations maîtrisées de ces conditions d'observation. Tout l'appareil mathématique de la physique des particules (théorie des groupes, espace de Hilbert, géométrie différentielle, variétés fibrées) est adapté à la prise en compte des diverses propriétés de symétrie qui ont été mises à jour : symétries cinématiques relativistes (groupes de Lorentz et de Poincaré), symétries discrètes (parité, conjugaison de charge, renversement du sens du temps), symétries internes (isospin, couleur, saveur...). Ces symétries internes sont déterminantes dans la

compréhension des interactions fondamentales : les particules de matière sont regroupées dans des multiplets, des représentations irréductibles des groupes associés aux symétries internes ; les interactions sont invariantes par des transformations de ces groupes. Les symétries internes peuvent être globales (les transformations ne dépendent pas du point d'espace-temps où elles sont appliquées) ou locales (les transformations dépendent du point d'espace-temps où elles sont appliquées). Les symétries de jauge sont des symétries internes locales.

Un progrès décisif a été accompli lorsque l'on a compris le rôle dynamique de la symétrie de jauge dans l'interaction électromagnétique. Cette symétrie était déjà apparue au niveau classique, dans la formulation de la théorie de Maxwell au moyen du potentiel électromagnétique : il existe toute une classe de potentiels, déduits les uns des autres par des transformations de jauge, qui donnent lieu au même champ électromagnétique en chaque point de l'espace-temps. Cette symétrie a pris une importance considérable lorsque l'on est passé au niveau quantique : les particules de matière qui participent à l'interaction électromagnétique, comme les électrons, sont les quanta de champs quantiques ; la symétrie interne de l'interaction électromagnétique, au niveau quantique, est l'invariance par changement de la phase du champ quantique de matière. Cette propriété d'invariance est complètement équivalente à la loi de conservation de la charge électrique. Il est très naturel de demander que cette invariance de phase soit locale, car il est évident qu'en chaque point de l'espace-temps l'origine des phases doit pouvoir être choisie de manière totalement arbitraire. Or, il apparaît qu'on ne peut imposer cette invariance de phase comme une symétrie locale que s'il existe un potentiel d'interaction obéissant à l'invariance de jauge de l'interaction électromagnétique classique : au niveau quantique donc, c'est de l'adéquation de l'invariance de phase locale du champ de matière et de l'invariance de jauge du champ d'interaction que découle la forme de l'interaction électromagnétique.

Ce rôle dynamique des symétries locales avait déjà été remarqué dans la théorie moderne de la gravitation, la théorie de la relativité générale : en rendant locale l'invariance de Lorentz, la propriété de symétrie globale de la relativité restreinte, Einstein a pu généraliser sa théorie de la relativité à des changements arbitraires de référentiels d'espace-temps et parvenir à une théorie géométrique de la gravitation universelle qui englobe celle de Newton et la redonne à l'approximation des faibles champs. Malheureusement, jusqu'à présent, on ne sait pas tenir compte des effets quantiques dans cette théorie.

Le groupe de jauge (le groupe de la symétrie de jauge) de l'interaction électromagnétique est le groupe commutatif (on dit aussi abélien) $U(1)$ de la multiplication par une phase. Il était tentant de rechercher des symétries de jauge dans les autres interactions... et on les a trouvées : le groupe $SU(3)$ de couleur est le groupe

de jauge de la chromodynamique quantique, et le groupe $SU(2) \times U(1)$, produit de l'isospin faible par l'hypercharge faible, celui de l'interaction faible.

L'invariance de jauge, ainsi généralisée, s'articule remarquablement bien avec les autres ingrédients essentiels du modèle standard, la théorie de référence des particules élémentaires et des interactions fondamentales non gravitationnelles.

Les théories à invariance de jauge sont renormalisables, ce qui signifie que les difficultés liées à la prise en compte conjointe des contraintes de la relativité restreinte et de la mécanique quantique peuvent y être résolues d'une manière satisfaisante.

Les théories à invariance de jauge non abélienne, comme la chromodynamique quantique, satisfont la propriété dite de « liberté asymptotique », selon laquelle la constante de couplage effective (on dit aussi « renormalisée ») décroît avec la résolution, c'est-à-dire avec l'énergie. Grâce à cette propriété, la méthode « perturbative » de développement des amplitudes de réactions en séries de puissances de la constante de couplage est applicable à l'interaction fondamentale des quarks et des gluons. Cette interaction, faible à haute énergie (c'est-à-dire à petite distance), s'accroît à grande distance et confine les quarks et les gluons à l'intérieur des particules composites (les hadrons) dont ils sont les constituants.

Comme les intensités des interactions fondamentales dépendent de l'énergie, un rapprochement peut s'opérer entre la physique des particules et la cosmologie. D'après le modèle du « big bang », le modèle standard de la cosmologie, l'univers est en expansion et en refroidissement depuis une singularité initiale où la densité et la température étaient infinies. La température (l'énergie cinétique moyenne des particules constitutives de l'univers primordial) décroît comme l'inverse de la racine carrée du temps écoulé depuis le big bang. Les intensités des interactions qui dépendent de l'énergie dépendent donc de ce temps cosmologique. Des interactions, différentes aujourd'hui, peuvent avoir eu la même intensité dans l'univers primordial. Il devient tentant de supposer qu'au moment du big bang, toutes les interactions avaient la même intensité, qu'elles étaient unifiées au sein d'une théorie dont le groupe de jauge serait suffisamment grand pour contenir comme sous-groupes les groupes de jauge actuels.

La brisure spontanée de symétrie est le concept (emprunté à la mécanique statistique) qui permet précisément d'élaborer des scénarios d'histoire de l'univers depuis l'état initial où toutes les particules étaient de masse nulle et indifférenciées, où toutes les interactions étaient unifiées, jusqu'à l'état dans lequel il se laisse observer aujourd'hui, en passant par toute une série de transitions de phases où les particules se différencient, certaines d'entre elles acquérant de la masse, les symétries se brisent en symétries résiduelles, de nouvelles structures et de nouveaux états de la matière se forment.

Au début des années 1970, on a pu montrer que la brisure spontanée de symétrie respecte la renormalisabilité des théories à invariance de jauge. On a ainsi abouti à la théorie électrofaible (unifiant les interactions électromagnétique et faible) dont, jusqu'à présent, toutes les prédictions ont été confirmées expérimentalement, grâce en particulier aux données fournies par le collisionneur « LEP » (Large Electron Positron Ring : collisionneur de particules du CERN) du CERN à Genève, depuis 1989. Ce modèle standard comporte encore un chaînon manquant, le « boson de Higgs ». Il s'agit d'une nouvelle particule, encore à découvrir, dont l'existence est impliquée par le mécanisme de brisure spontanée de la symétrie électrofaible. Sa recherche est l'objectif prioritaire assigné au programme du LHC (le grand collisionneur actuellement en construction au CERN) qui s'annonce comme la plus grande aventure scientifique jamais entreprise par l'homme.

► BATON J.P. & COHEN-TANNOUDI G., *L'horizon des particules*, Paris, Gallimard, 1989. — COHEN-TANNOUDI G. & SPROU M., *La matière espace-temps*, Paris, Fayard, 1986 (Paris, Gallimard, 1989). — KLEN E. & LACHÈZE-REY M., *La quête de l'unité*, Paris, Albin Michel, 1996. — ROSEN J., *Symmetry in Science, an introduction to the general*, New York/Berlin/Heidelberg, Springer Verlag, 1995. — WEINBERG S., *Le rêve d'une théorie ultime*, Paris, Odile Jacob, 1996.

Gilles COHEN-TANNOUDI

→ Big bang ; Espace-temps ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Symétrie.

INVENTION

L'invention diffère de la découverte par sa perspective : celle de mettre un fait nouvellement isolé au service d'une intention finalisée — pratique ou intellectuelle. Il y a invention lorsque l'on met en évidence de nouvelles connexions d'images, de connaissances et de techniques participant de séries différentes, que l'on rapporte à l'identité d'un projet défini — qu'il soit scientifique, technique ou technologique. Une invention suppose une découverte, un fait nouvellement isolé et réinterprété dans un ensemble de modèles ; une découverte suppose l'invention des formes permettant d'apercevoir un fait non remarqué auparavant, et qui sera l'objet de la découverte.

On parlera donc plutôt de découverte lorsqu'il s'agit de travailler à l'intérieur d'un domaine défini de la science — même lorsqu'il s'agit de mathématiques pures : on découvre les nombres imaginaires plus qu'on ne les invente ; en revanche, on invente une construction qui permet une démonstration géométrique. Il se peut que pour la découverte et l'invention des connaissances des domaines voisins soient nécessaires : l'homme de sciences capable de travailler sur les frontières — tel Pasteur entre la chimie et la médecine — est sans doute avantagé si par ailleurs il possède

bien son domaine. Néanmoins, la découverte appartient au domaine défini par les principes qui en définissent les limites. La tribologie (science du frottement) peut donner lieu à des inventions dans des domaines divers, puisqu'elle est ce qu'on appelle une discipline générique, mais elle suppose toujours la découverte de faits nouveaux dans le domaine de la mécanique. L'invention articulera la découverte à un montage qui excède les limites d'un domaine, ou du moins n'en dépend pas.

Une tendance actuelle présente l'invention comme un événement qui ne peut advenir qu'en technique ou en technologie, et non pas en sciences, en particulier à cause de son caractère finalisé. Mais c'est là un point de vue très schématique sur la science, qui la suppose comme un édifice majoritairement inductif, où les lois ont été élaborées à partir de la généralisation de cas particuliers, l'invention étant alors limitée aux modalités de généralisation pour trouver les lois.

Pourtant l'épistémologie laisse sa place à l'invention. 1) Une tradition expliquant la science non pas du point de vue de l'induction et des lois, mais laissant une grande place à la création d'hypothèses probables, jamais définitivement justifiées — tradition que l'on fait remonter en particulier à Pascal, à la suite de Gassendi et de Roberval — et continuée par la tradition bayésienne. Ainsi, Van Fraassen fait remonter tout un courant important de conception de la science à Pascal, courant où les probabilités prennent une place majeure — aucune loi ne pouvant être dogmatiquement vraie —, et où la logique dite de la découverte est remplacée par celle du changement de l'opinion : dans cette différence peut s'inscrire l'invention contre la découverte. 2) D'un point de vue plus dogmatique que le précédent, parce que plus centré sur la notion de loi, il peut y aller de l'invention, dans la mesure où les lois sont considérées comme de libres créations de l'esprit humain : c'est le cas dans la tendance conventionnaliste. Quoi qu'il en soit, une loi, même empirique, même expérimentale, n'est justifiée que si elle est reliée régulièrement à tout un faisceau de lois. On ne peut alors mettre en correspondance biunivoque les lois et les « faits » à partir desquels elles auraient été généralisées. Elles supposent alors quelque chose de l'ordre de l'invention et non seulement de la découverte. 3) Il y a tout un courant actuel qui critique la notion de loi : des épistémologues qui se disent en des sens divers « constructivistes » (Stengers, Le Moigne) ou/et ceux qui s'intéressent à l'aspect sémantique de la science (Van Fraassen, Giere), et qui donnent une nouvelle importance à la construction de modèles dans les sciences — qui ne sont plus alors seulement des « interprétations vraies » de la théorie. L'invention prend alors tout son sens, un modèle étant finalisé, au moins dans la mesure où il cherche des invariants et des conditions de stabilité pour les paramètres qu'il choisit. 4) D'autres philosophes, tels Peirce et les pragmatistes, ont montré que la science, même la plus théorique, était finalisée, non en un sens grossier et immédiatement

pratique, mais au sens où la science ne peut se comprendre que comme un ensemble de problèmes à résoudre, et non comme suite de résultats progressifs à l'intérieur d'un domaine prédéfini. Kant avait déjà montré l'importance du concept de fin pour comprendre l'ensemble de l'architecture des lois scientifiques. On pense par exemple à l'histoire des sciences telle que la préconise Larry Laudan, et, en un autre sens, Imre Lakatos.

La séparation entre invention et découverte dans les sciences dépend donc très largement du point de vue que l'on a sur les sciences, le point de vue des lois étant soutenu surtout par des physiciens, celui des modèles par ceux qui cherchent à tenir compte d'une diversité de sciences dont la physique ne serait pas le seul modèle – quoiqu'un grand modèle : celui qui a donné lieu à la problématique de la découverte et de l'idée que les lois scientifiques pouvaient – ou devaient – être des lois naturelles. On insiste de plus en plus en sciences sur l'invention, parce que la logique de la découverte a donné lieu à d'importantes critiques. Non seulement Popper, dans le célèbre livre du même nom (*Logique de la découverte scientifique*) affirmait paradoxalement qu'il n'y a pas de logique de la découverte, mais plusieurs épistémologues plus récents ont fait voir comment la confusion entre logique de la découverte et logique de la justification rendait ce terrain stérile (Larry Laudan, Bas Van Fraassen). L'invention est le nouveau nom pour parler du champ de ce qu'on appelle « découverte » en termes de modèles, de création, de science envisagée du point de vue de la construction plutôt que de la vérification.

Cette conception plus « constructiviste » de la science commence à faire un sort aux méthodes de l'ingénierie, ne les percevant plus comme application des domaines classiques, mais plutôt comme articulation de modèles de taille et de nature différentes, relevant de disciplines de base variées (logique, géométrie, mathématiques, physique, mécanique, matériaux, maintenance, etc.), ou, ce qui revient presque au même, comme processus à la fois d'intégration et de concrétisation, l'« objet » à produire étant au départ insaturé et à produire synthétiquement selon une logique de la conception (« design ») : il y faut donc des étapes d'élaboration qui ne peuvent être prévues par la seule analyse de la situation ou du cahier des charges. Toutes ces étapes ne sont d'ailleurs pas comprises comme invention, mais plutôt comme innovation. L'invention comme telle intervient lorsqu'un examen global de l'objet à produire peut être fait de façon assez synthétique du point de vue de sa fonction pour que l'on puisse le concevoir avec des moyens tout à fait différents. L'invention est alors comprise comme une rupture dans le processus continu de l'innovation. Le produit de l'invention est alors apparemment purement technique. Mais cela est aussi une question de point de vue : tout dépend du statut – scientifique, technique – que l'on accorde aux sciences de l'ingénieur. Si l'on tient compte du nouvel usage des modèles dans l'interprétation des sciences, l'ingénierie pourrait être

comprise comme scientifique. L'invention se situerait alors dans une problématique qui n'est plus celle de ce qui préexiste ou non à la recherche scientifique (les lois naturelles), mais plutôt dans celle de l'usage technique des connaissances scientifiques.

► ARISTOTE, *Secondes Analytiques* (sur l'ars inveniendi). – BACHELARD G., *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1938 ; *La philosophie du Non*, Paris, PUF, 1940. – CANGUILHEM G., *La Formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, PUF, 1955 ; *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1975. – CHAUVIRÉ C., « Peirce, Popper et l'abduction. Pour en finir avec l'idée d'une logique de la découverte », *Revue philosophique*, 4, 1981, p. 441-460. – DEWEY J. et al., *Creative Intelligence : Essays in the Pragmatic Attitude*, New York, Holt, 1917. – DURBIN P., *Logic and scientific Inquiry*, Milwaukee (Wis.), Bruce, 1968. – FOUREZ G., *La Construction des sciences. Les logiques des inventions scientifiques. Introduction à la philosophie et à l'éthique des sciences*, Bruxelles, De Boeck. Hanson Norwood Russel (1958) ; *Patterns of Discovery*, Cambridge Univ. Press, 3^e éd., 1996. – HOLTON G., *L'Imagination scientifique*, trad. J.-F. Roberts, Paris, Gallimard, 1981 ; *L'invention scientifique. Thémata et interprétation*, trad. P. Scheurer, Paris, PUF, 1982. – KOESTLER A., *The Act of Creation*, New York, MacMillan, 1964. – KUHN T.S., *La Structure des révolutions scientifiques* (1962), trad. L. Meyer, Paris, 1972. – LAKATOS I., *Preuves et réfutations : essai sur la logique de la découverte mathématique* (1976), trad. N. Balacheff & J.-M. Laborde, Paris, Hermann, 1984 ; *Histoire et Méthodologie des sciences : programmes de recherche et construction rationnelle* (extrait de *The Methodology of scientific research Programs*), trad. C. Malamoud & J.-F. Spitz, Paris, PUF, 1994. – LAUDAN L., *Progress and its Problems*, Berkeley, Univ. of California Press (trad., *La dynamique de la Science*, Bruxelles, Mardaga, 1977) ; *Science and Hypothesis*, Dordrecht (le chapitre intitulé : « Why was the Logic of Discovery Abandoned ? »), 1981. – LE MOIGNE J.-L., *Le Constructivisme*, t. 1 : *Des fondements*, t. 2 : *Des épistémologies*, Paris, ESF, 1994, 1995. – LE ROY É., « Sur la logique de l'invention », *Revue de Métaphysique et de Morale*, 13, 1905, p. 128-137. – MACH E., *Popular scientific Lectures*, Chicago, Open Court Publ. Co (1^{re} éd. angl., sous la trad. de T.J. McCormack), en particulier : « On the part played by Accident in Invention and Discovery », 1898, p. 259-281. – MOLES A., *La Création scientifique*, Genève, Kister, 1957. – NICKLES T. éd., *Scientific Discovery, Logic and rationality*, Dordrecht, 1980. – PEIRCE Ch.S., *Essays in the Philosophy of Science*, Indianapolis, Bobbs-Merrill, 1957, p. 126-143. – PERRIN J., éd., *Conception entre science et art*, Lausanne, Presses Polytechniques Romandes, 2001. – POLYA G., *How to solve it*, New York, Doubleday, 1945, 2^e éd., 1957. – POPPER K.A., *La Logique de la découverte scientifique*, trad. N. Thyssen-Rutten & P. Devaux, Paris, Payot, 1959 ; *Conjectures et Réfutations. La Croissance du savoir scientifique*, trad. M.-I. & M. B. de Launay, Paris, Payot, 1963. – RESCHER N., *Plausible Reasoning*, Atlantic Highlands (NJ), Humanities, 1976. – ROTHENBERG A. & GREENBERG B., *Index of Scientific Writings on Creativity, 1566-1974*, Hamden (Conn.), Shoe String Press, 1976. – SIMON H.A., *Models of Discovery*, Dordrecht, Reidel, 1977. – STENGERS I., *L'invention des Sciences modernes*, Paris, La Découverte, 1993 ; *Cosmopolitiques*, Paris, La Découverte/Les Empêcheurs de penser en rond, 7 vol., 1993. – TORETTI R., *Creative Understanding. Philosophical reflexions on Physics*, Chicago Univ. Press, 1990.

Anne-Françoise SCHMID

→ Conjecture ; Découverte ; Méthode ; Prix Nobel des sciences.

IRRÉVERSIBILITÉ

PHYSIQUE

La question du comportement des systèmes physiques dans le renversement du temps est fondamentale et délicate : leur évolution est-elle réversible ou irréversible ? Ce problème a fasciné depuis très longtemps physiciens et philosophes, car il a des incidences sur celui du déterminisme, et par là, en fin de compte, sur celui du libre arbitre individuel. Nous n'irons pas ici jusqu'à poser cette interrogation perpétuellement renouvelée, ni celle de la grâce divine, qui ne lui est pas étrangère. Nous nous contenterons d'évoquer modestement ses aspects scientifiques, déjà fort complexes. Il nous faudra pour cela sortir des sentiers le plus communément battus par la thermodynamique et la mécanique statistique traditionnelles : nous nous proposons d'étudier des systèmes hors de l'équilibre qui, par conséquent, évoluent au cours du temps à l'échelle macroscopique. On suppose connues ici les notions de macroscopique et de microscopique, et celle de probabilité qui permet de les relier.

Les équations microscopiques sont toujours réversibles

Tout commence par le constat que les équations de la mécanique classique de Newton sont invariantes par renversement du temps. Qu'entend-on par là ?

L'opération de renversement du temps consiste à remplacer partout le temps t par son opposé. Un peu plus techniquement, ayant choisi une origine des temps, *a priori* arbitraire, où nous convenons que t est nul, nous effectuons dans toutes les équations le changement de variables $t' = -t$. Cela revient à inverser le sens du temps : pendant que t croît depuis zéro (notre origine) vers des valeurs positives de plus en plus grandes, t' quant à lui décroît depuis zéro (où il coïncide avec t) vers des valeurs de plus en plus grandes mais négatives.

Considérons de ce point de vue la relation fondamentale de la dynamique newtonienne. Elle pose l'égalité entre la force, d'une part, qui s'exerce sur un mobile – nous le prenons ponctuel pour simplifier – et le produit, d'autre part, de la masse (inerte) du mobile par son accélération. C'est par celle-ci, et par elle seulement, que le temps s'introduit explicitement dans l'équation du mouvement. Or, l'accélération est inchangée si l'on y remplace le temps t par son opposé t' . L'accélération, en effet, est la dérivée seconde de la position par rapport au temps ; elle subit donc un double changement de signe, ce qui équivaut à pas de changement de signe du tout. La relation fondamentale de la dynamique, clef de voûte du somptueux édifice de la mécanique newtonienne, garde même forme si l'on y inverse le sens du temps.

Cette propriété structurelle, qui paraît abstraite à l'abord, se traduit par des conséquences physiques concrètes. Si l'accélération garde sa valeur lors d'un renversement du temps, la vitesse est en revanche

changée en son opposé : il s'agit ici de la dérivée première de la position par rapport au temps, qui change de signe avec le temps. Filmons alors un mobile quelconque, et faisons ensuite passer le film à l'envers dans le projecteur, ce qui revient à inverser le temps : dans les images qui se dérouleront devant nous, la vitesse du mobile nous apparaîtra clairement changée de sens, c'est-à-dire de signe. Nous énoncerons donc la conclusion suivante – en prenant d'abord le cas d'un seul mobile ponctuel : à tout mouvement possible du mobile, correspondant à une solution de l'équation fondamentale de la dynamique, on peut associer un autre mouvement possible, qui vérifie aussi la relation fondamentale de Newton ; ce second mouvement se fait le long de la même trajectoire que le premier, mais avec, en chaque point qu'il atteint, une vitesse opposée, de sorte que la trajectoire est parcourue en sens inverse. L'argument et l'énoncé se généralisent sans difficulté à des ensembles de mobiles ponctuels, et donc à un corps quelconque.

C'est en règle générale la mécanique quantique qu'il convient de mettre en œuvre pour décrire le comportement des systèmes à l'échelle microscopique. La question de la réversibilité est techniquement un peu moins simple à traiter en mécanique quantique qu'en mécanique classique. L'analogue quantique de la relation fondamentale de la dynamique est l'équation de Schrödinger. Le temps y intervient explicitement au premier ordre, à travers la dérivée première de la fonction d'onde – du vecteur d'état, plus généralement. Cette dérivée est, comme l'était ci-dessus la vitesse classique, changée en son opposé dans un renversement du temps. Mais elle apparaît, dans l'équation de Schrödinger, multipliée par le nombre purement imaginaire que l'on note le plus souvent i (dont le carré est égal à -1) ; la fonction d'onde prend en outre des valeurs complexes. En associant le changement de t en $-t$ et l'opération de conjugaison complexe, on montre que l'équation de Schrödinger est elle aussi invariante par renversement du temps, avec des conséquences physiques semblables aux précédentes.

Voici donc que se dégage un problème de fond : les équations (tant quantiques que classiques) qui régissent le mouvement d'un système à l'échelle microscopique sont invariantes par renversement du temps ; pourtant, l'évolution de ce système à l'échelle macroscopique possède une caractéristique contradictoire, l'irréversibilité, puisque, livré à lui-même, il tend vers un état d'équilibre.

L'évolution macroscopique est pourtant irréversible

L'équation de Boltzmann. – C'est Ludwig Boltzmann (1844-1906) qui accomplit un travail de pionnier sur le problème de l'irréversibilité. Il choisit pour cela d'étudier un gaz dilué, car son comportement microscopique serait plus aisé à suivre : les molécules y sont bien séparées les unes des autres, et leurs collisions bien individualisées. À partir de quelques hypothèses, dont certains nous étonnent encore par leur

pénétration, Boltzmann produisit une équation, qui porte depuis son nom, décrivant l'évolution des gaz dilués. Elle en propose ce qu'on nomme traditionnellement une théorie cinétique, c'est-à-dire qu'elle analyse en détail le comportement des constituants microscopiques du gaz et construit à partir de là, en traitant cette information de manière statistique, l'évolution macroscopique du système dans son ensemble. L'équation de Boltzmann a été abondamment et vivement critiquée à ses débuts (1872); elle n'a cessé depuis d'être analysée, discutée et utilisée; elle conserve pourtant sa forme initiale (à peine modernisée) et sa puissance explicative.

L'équation maîtresse. — Considérons un système macroscopique, dont les états microscopiques seront notés (l) , ou (m) , ... Sa description est probabiliste: P_l est la probabilité pour qu'il se trouve, à un instant donné, dans l'état microscopique (l) . Comme il est hors de l'équilibre, il va évoluer au cours du temps: les diverses probabilités P_l sont fonction du temps (elles étaient constantes dans la mécanique statistique d'équilibre). Leur variation est régie par l'équation maîtresse (on dit parfois « équation pilote »), plus simple dans sa forme que l'équation de Boltzmann, et plus générale, en principe du moins, dans son domaine d'application. La structure de l'équation maîtresse est facile à appréhender dans le cadre d'un ensemble statistique de Gibbs. La probabilité P_l est, dans ce cadre, représentée par le nombre N_l de systèmes, dans l'ensemble, qui ont (l) pour état microscopique (P_l est le rapport de N_l à N , nombre total des systèmes constituant l'ensemble statistique).

Prenez maintenant un petit intervalle de temps — infinitésimal, en fait —, dont nous noterons t_i le début et t_f la fin. Entre les instants t_i et t_f , le nombre N_l de systèmes à être dans l'état (l) augmente (algébriquement) d'un certain incrément, qui s'obtient comme la différence de deux termes. Le terme de peuplement intervient positivement. C'est le nombre de systèmes de l'ensemble qui, se trouvant à t_i dans l'état microscopique (m) , différent de (l) , aboutissent à t_f dans l'état (l) , précisément; ce terme prend donc la forme d'une somme sur tous les états (m) différents de (l) ; la contribution, à cette somme, d'un état (m) particulier est évidemment proportionnelle au nombre N_m de systèmes dont (m) est, à t_i , l'état microscopique. Le terme de dépeuplement, qui est précédé d'un signe moins, est quant à lui le nombre de systèmes qui, ayant (l) pour état microscopique à l'instant t_i , le quittent pour se retrouver, à t_f , dans un état (m) quelconque distinct de (l) ; le terme de dépeuplement est donc lui aussi une somme, sur tous les états (m) , autres que (l) , qui peuvent accueillir les systèmes émigrant de (l) ; les composants de cette somme sont tous proportionnels à N_l , nombre — à t_i — de systèmes de l'ensemble susceptibles d'être touchés par un tel processus de dépeuplement de l'état (l) .

L'équation maîtresse est dans son aspect conforme à cette description qualitative. Au premier membre, la

dérivée de la probabilité P_l par rapport au temps; au second membre, une somme sur les états (m) ; deux contributions à cette somme: l'une, affectée du signe plus, est proportionnelle à P_m (peuplement de l'état (l) à partir de l'état (m)); l'autre, portant le signe moins, est proportionnelle à P_l (dépeuplement de l'état (l) vers l'état (m)).

L'équation maîtresse — et avec elle l'équation de Boltzmann — présente plusieurs propriétés intéressantes; nous en retiendrons trois. La première a trait à l'invariance par renversement du temps. La variable t n'intervient explicitement qu'au premier membre, dans la dérivée (première) de la probabilité P_l ; ce premier membre est donc changé en son opposé lorsqu'on inverse le sens du temps; mais pas le second. Ainsi, l'équation maîtresse n'est pas invariante par renversement du temps. La deuxième propriété concerne le comportement aux temps longs. L'équation maîtresse assigne alors (pour t tendant vers l'infini) la même valeur à toutes les probabilités P_l, P_m, \dots associées aux divers états microscopiques. Or, c'est là leur valeur d'équilibre, selon le postulat fondamental de la mécanique statistique d'équilibre. Ces deux propriétés conjuguées construisent ensemble l'image suivante: l'évolution des probabilités P_l , donc de l'état macroscopique du système, est irréversible; elle aboutit à l'état macroscopique d'équilibre, dans lequel — pour un système isolé — tous les états microscopiques accessibles sont équiprobables. La troisième propriété de l'équation maîtresse que nous mentionnerons est le « théorème H ».

Le théorème H, expression de l'irréversibilité macroscopique. — Boltzmann déduisit de son équation ce qu'on appelle depuis le théorème H: c'est qu'il notait H une grandeur proportionnelle à l'entropie S (en réalité, il semble que cet H là n'était pas la lettre latine qui nous est familière, mais bien la majuscule de la lettre grecque éta). On sait aujourd'hui le démontrer à partir de l'équation maîtresse, quel que soit le système auquel on veuille l'appliquer. Il y faut toutefois une relation spécifique, quoique très simple, entre les coefficients qu'elle comporte.

Dans la description que nous en avons donnée ci-dessus, l'équation maîtresse relie les probabilités P_l, P_m, \dots associées aux divers états microscopiques $(l), (m), \dots$. D'un côté de l'égalité figure la dérivée par rapport au temps de P_l ; de l'autre, une somme sur (m) de la différence de deux termes, l'un proportionnel à P_m , l'autre à P_l . Le premier de ces termes est le produit de P_m par un coefficient que l'on peut noter $A(m'l)$, puisqu'il représente la probabilité — par unité de temps — pour que le système passe de (m) à (l) ; de façon analogue, P_l est multipliée dans le second terme (affecté d'un signe moins) par $A(l'm)$. La relation qui permet de déduire le théorème H de l'équation maîtresse postule que $A(l'm)$ et $A(m'l)$ sont égales pour toutes les paires d'états microscopiques.

Il est remarquable que cette relation peut être démontrée à partir de l'hypothèse que l'évolution du

système à l'échelle microscopique est réversible par renversement du temps (cf. *infra*, « Irréversibilité et indéterminisme »). Elle a pour conséquence l'égalité du « bilan détaillé » (selon l'expression consacrée), dont le teneur s'exprime aisément dans le cadre d'un ensemble de Gibbs (voir *supra*, « L'équation maîtresse »): à l'équilibre — où les probabilités sont constantes dans le temps et égales entre elles —, le nombre de systèmes de l'ensemble qui quittent l'état (m) pour l'état (l) durant un intervalle de temps déterminé est égal au nombre de ceux qui font précisément le chemin inverse, de (l) à (m) , pendant ce même intervalle de temps.

Le théorème H est simple dans son énoncé: l'entropie d'un système isolé est une fonction non décroissante du temps. Cela signifie en clair que l'entropie d'un système isolé ne peut que croître au cours du temps, ou peut-être rester parfois constante: la dérivée par rapport au temps de l'entropie d'un système isolé est toujours positive ou nulle. Il s'ensuit en particulier que l'état (macroscopique) d'équilibre correspond dans ce cas au maximum de la fonction entropie.

L'équation de Boltzmann et, plus généralement, l'équation maîtresse sont irréversibles: le théorème H l'exprime de façon inéquivoque. Si en effet l'entropie doit croître avec le temps, elle va nécessairement décroître si l'on renverse le temps, puisque celui-ci décroît alors. Voilà donc une grandeur (une grandeur primordiale) qui se comporte différemment suivant que le temps s'écoule dans le sens normal ou en sens inverse. C'est là une manifestation de ce qu'on appelle souvent la flèche du temps. Lorsque nous analysons les mouvements microscopiques, nous avons constaté que les trajectoires (nous raisonnons pour simplifier dans le cadre de la mécanique classique) des particules peuvent être décrites en sens inverse, car le renversement du temps — qui laisse invariables les équations du mouvement — revient à changer chaque vitesse en son opposée. En revanche, nous trouvons ici qu'il est impossible qu'un système macroscopique parcoure en sens inverse le chemin qu'il a suivi à l'aller.

Impossibilités et paradoxes

Lorsqu'elle fut publiée (1872), l'équation de Boltzmann — et le théorème H qui l'accompagnait — souleva de vives critiques. Les premiers arguments furent quasiment tautologiques: les équations du mouvement sont manifestement réversibles; or, l'équation de Boltzmann ne l'est plus; donc les approximations et hypothèses physiques nécessaires à sa démonstration sont erronées. Ces premières escarmouches débouchèrent sur une vaste et longue bataille rangée, dont on ne peut pas dire encore qu'elle est définitivement éteinte.

Henri Poincaré démontra en 1890 un théorème extrêmement général et important sur l'évolution des systèmes en mécanique (classique, à cette époque): tout système régi par les équations du mouvement clas-

siques finit toujours, si l'on attend suffisamment longtemps, par revenir à un état microscopique aussi voisin que l'on veut de l'état dont il est parti.

On aura noté que ce théorème, qui fut bientôt opposé à Boltzmann, semble exclure toute évolution vers l'équilibre, alors qu'on en observe expérimentalement de multiples exemples. C'est un mathématicien allemand, Ernst Zermelo, qui a attaché son nom à cette question, qu'il a élevée au rang de paradoxe: comment concilier l'existence visible d'évolutions irréversibles (par exemple, les évolutions vers l'équilibre) avec le théorème sans faille de Poincaré, qui prédit une évolution cyclique? La contre-attaque de Boltzmann prit une forme inattendue. Il entreprit d'estimer le temps qui serait nécessaire à un système macroscopique, selon les données de Poincaré, pour revenir tout près de son état initial. Cette estimation le conduisit, pour cent centimètres cubes d'un gaz ordinaire, à un ordre de grandeur très supérieur à dix élevé à la puissance de dix puissance dix, temps exprimé en années! L'âge de l'Univers même (dix milliards d'années environ) est totalement inappréciable devant une telle durée. Autant dire que, à l'évidence, le théorème mathématique de Poincaré ne présente aucun caractère d'urgence pour la description physique des systèmes macroscopiques.

Le problème de l'irréversibilité formulé sur un exemple simple

Analysons en premier lieu le comportement d'une particule ponctuelle unique qu'enferme un récipient macroscopique; nous supposons pour simplifier que son mouvement peut être correctement décrit par la mécanique classique. Nous nous donnons, à un certain instant, la position A de la particule et sa vitesse v (la vitesse est un vecteur de l'espace). Le mouvement de la particule la conduit, au bout d'un certain temps, au point B , où elle arrive avec la vitesse w . La relation fondamentale de la mécanique newtonienne est invariante par renversement du temps (cf. *supra*). Cela implique que, si la même particule est placée, à un nouvel instant, en B , et qu'on lui communique la vitesse opposée à w , elle se retrouvera en A , avec pour vitesse l'opposée de v , au bout d'un temps égal à celui qu'avait pris le trajet aller. Pour saisir ce fait de façon plus intuitive, on peut imaginer que l'on a filmé le mouvement de la particule de A à B . Si l'on fait ensuite passer le film à l'envers, c'est le mouvement inverse, de B à A , avec des vitesses opposées aux précédentes, qu'on verra sur l'écran. Aucun spectateur ne trouvera ce mouvement inverse anormal, car il est parfaitement compatible avec le bon sens comme avec les lois physiques.

Examinons maintenant le comportement d'un gaz constitué d'un très grand nombre de particules, en supposant ici aussi qu'il est décrit par la mécanique classique. À l'instant initial, le récipient qui le contient est séparé par une cloison en deux compartiments égaux: toutes les particules se trouvent alors dans la moitié gauche du récipient, la moitié droite étant vide. On

retire maintenant la cloison. Le gaz se répand dans le compartiment initialement vide, pour occuper de façon homogène, dans un nouvel état d'équilibre, le volume global que lui offre l'ensemble du récipient. L'irréversibilité prend ici un aspect très simple et concret : jamais le gaz ne reviendra spontanément se confiner dans la moitié gauche du récipient. Imaginons qu'on ait pu filmer les molécules du gaz au cours de son évolution réelle, et que l'on passe ensuite le film à l'envers. Personne ne sera dupe cette fois : l'évolution inverse qui se déroulera sur l'écran sera évidemment contraire aux lois naturelles.

Mais pourquoi n'est-il pas possible, en changeant de sens les vitesses de toutes les molécules du gaz, de faire parcourir à celui-ci le chemin inverse de son évolution spontanée ? La réponse est relativement simple : le nombre des molécules est tellement énorme qu'il est impensable de chercher à contrôler la vitesse de chacune d'elles au même instant. Notons que, dans l'état initial où le gaz n'occupe que le compartiment de gauche, on ne possède pas une information détaillée sur la position précise de chaque molécule – et encore moins sur sa vitesse –, mais seulement une information globale, à l'échelle macroscopique : elles se trouvent toutes dans la moitié gauche du récipient. L'évolution du gaz a pour effet de diluer cette information au niveau microscopique, où elle devient inaccessible : chaque molécule garde en principe, dans sa position et sa vitesse, le souvenir d'une parcelle de l'information initiale, mais celle-ci ne peut pas être reconstituée car ces parcelles sont trop ténues et trop nombreuses : l'information que portait la configuration originelle est maintenant éclatée. C'est cette perte d'information que mesure l'accroissement d'entropie (l'entropie macroscopique est directement reliée au manque d'information que comporte la description microscopique) prévu par le théorème H. C'est aussi elle qui interdit tout retour en arrière.

D'où vient l'irréversibilité ?

La question primordiale demeure : comment l'irréversibilité de l'évolution macroscopique peut-elle découler de lois microscopiques invariantes par renversement du temps ? Ce problème a fait l'objet de nombreux travaux, sans être véritablement résolu : les physiciens n'ont pas tous exactement la même opinion sur le sujet.

Irreversibilité et indéterminisme. – Voici l'idée physique générale qui, selon la majorité des experts, sert de base à la compréhension du phénomène. Le problème de l'irréversibilité est intimement lié à celui du déterminisme : les équations fondamentales sont déterministes, en ce sens qu'elles permettent de caractériser de façon univoque l'état microscopique du système à tout instant à partir de la donnée de cet état à un instant antérieur unique ; au contraire, l'évolution macroscopique dudit système est stochastique, c'est-à-dire que sa description est fondée sur les probabilités. Dans l'exemple

du gaz, analysé dans la section précédente, l'impossibilité du retour en arrière est due au fait que l'état final du système n'est pas connu avec suffisamment de précision, à l'échelle microscopique, pour qu'on puisse envisager de façon crédible d'inverser toutes les vitesses ; cette méconnaissance de l'état microscopique final provient à son tour de la nécessité de traiter l'évolution du système de façon probabiliste. Donc les antinomies réversible-irréversible et déterministe-stochastique doivent être envisagées comme deux aspects d'une seule et même question fondamentale.

Dans le point de vue majoritaire que nous exposons ici, la clef de l'énigme réside dans l'extrême sensibilité des équations microscopiques à de petits changements dans les conditions initiales ou à de faibles perturbations du système au cours de son évolution.

Reprenons l'« exemple simple » que nous avons introduit plus haut, en commençant par le cas d'une particule unique. La situation réelle est moins aisée que ne le laisse croire la description que nous en avons donnée. Dans la réalité, en effet, la position et la vitesse initiales de la particule ne peuvent pas être connues avec une précision parfaite : A ne peut pas être un point mathématique, ni la vitesse une flèche de longueur et de direction exactement définies. La présence de telles incertitudes, bien qu'on s'efforce évidemment de les réduire, n'en est pas moins au cœur même de la description physique du réel. Examinons le comportement de la particule lorsqu'on choisit successivement comme état initial les diverses éventualités qu'offrent ces incertitudes : on prend un point dans le petit domaine (entourant A) où peut se trouver la position initiale de la particule, et de même une vitesse parmi celles qui sont possibles (elles sont très proches les unes des autres). À partir de chacun de ces états initiaux mathématiques, l'équation du mouvement – parfaitement déterministe – donne de façon univoque l'état de la particule aux instants ultérieurs. On pourrait penser que ces deux mouvements, issus de conditions initiales voisines, vont rester continuellement voisins. Il n'en est rien : ces deux mouvements, et en particulier les trajectoires qu'ils empruntent, s'écartent irrémédiablement l'un de l'autre. On peut s'en faire une idée en prenant en compte – pour une unique particule – les inévitables irrégularités que présentent les parois du récipient à l'échelle – microscopique – de la particule : deux trajectoires initialement très voisines peuvent devenir complètement étrangères l'une à l'autre après avoir rebondi sur un obstacle rugueux.

Ainsi, les chocs successifs de la particule sur les parois du récipient ont pour effet de diluer l'information initiale – la particule est issue d'un point voisin de A avec une vitesse voisine de v – en élargissant de façon explosive le domaine d'incertitude.

N'oublions pas en outre que le système étudié – qu'il soit constitué d'une particule ou de plusieurs – est perpétuellement soumis à de très faibles mais multiples influences extérieures dont l'efficacité est considérablement accrue par la sensibilité intrinsèque des équations du mouvement. Ces deux effets conjugués font

que l'on devient incapable, au bout d'un certain temps, de préciser même l'endroit où se situe la particule à l'intérieur du récipient. Et ce temps est très court : dans les conditions ordinaires, les molécules d'un gaz ordinaire se déplacent, en moyenne, à plusieurs centaines de mètres par seconde ; le nombre de chocs, par seconde, d'une particule sur les parois est donc très grand. On doit dès lors avoir recours aux probabilités : si par exemple on divise le récipient en deux parties d'égal volume, une particule a la probabilité $1/2$ de se trouver dans l'un de ces compartiments, et la probabilité $1/2$ de se trouver dans l'autre. L'évolution déterministe a fait place à une évolution stochastique. Il est impossible également de revenir en arrière, c'est-à-dire de retrouver, à partir de la description probabiliste finale, le domaine restreint de positions et de vitesses dont nous sommes partis : l'évolution est devenue irréversible.

Irreversibilité dans les systèmes à un grand nombre de particules. – Pour un système composé d'un grand nombre de particules, s'ajoute aux précédents l'effet des collisions entre particules, qui agissent dans le même sens. L'irréversibilité se manifeste dans ce cas de façon plus évidente. Nous avons envisagé plus haut un gaz qui se répandait dans l'ensemble d'un récipient après avoir été confiné dans l'une de ses moitiés. Dans cet exemple, la probabilité pour que, après l'expansion, les molécules du gaz se retrouvent toutes dans une moitié du récipient vaut $1/2$ élevé à la puissance N , si N désigne le nombre total des molécules du gaz. Pour N de l'ordre du nombre d'Avogadro – évaluation réaliste –, cette probabilité est si faramineusement petite que l'événement correspondant – regroupement de toutes les molécules dans une moitié du récipient – est véritablement impossible.

Irreversibilité, ergodicité, simulation. – La propriété que nous venons d'explicitier – instabilité des équations du mouvement – joue également un rôle primordial en ce qui concerne le problème ergodique. Supposons en effet que l'on arrive à préparer un système (isolé) dans un état macroscopique initial qui serait restreint à un groupe très étroit d'états microscopiques. Cet état macroscopique initial serait donc bien loin de satisfaire à l'équiprobabilité des états microscopiques accessibles, postulat fondamental de la mécanique statistique d'équilibre. Aucune objection à cela : l'état macroscopique, ainsi préparé, serait hors de l'équilibre, voilà tout. Mais, pour les raisons que nous avons données ci-dessus, l'évolution dans le temps conduirait ce groupe restreint d'états microscopiques à s'élargir rapidement, jusqu'à couvrir uniformément tout le domaine des états microscopiques accessibles. C'est ainsi que notre système macroscopique, préparé hors de l'équilibre, tend rapidement vers l'équilibre. Lorsqu'il l'a atteint, son évolution dans le temps préserve l'équiprobabilité des états microscopiques accessibles, et il vérifie donc le principe ergodique.

Nous avons systématiquement mis en avant, jusqu'ici, les influences extérieures qui s'exercent sur le système, même lorsqu'on le croit isolé : choc des particules sur les parois, forces légères créées par des objets étrangers au système. Mais il n'est pas impossible que l'irréversibilité et l'ergodicité apparaissent aussi dans un système rigoureusement isolé. On a pu effectivement le démontrer pour ce que l'on appelle le « gaz de sphères dures » (gaz dont les molécules se comporteraient comme des boules de billard impénétrables). Certains pensent donc que l'étude mathématique des systèmes dynamiques pourra un jour répondre à l'ensemble des questions que nous avons soulevées.

D'autres cherchent la solution dans des expériences de simulation. On y calcule pas à pas l'évolution d'un système de particules, interagissant par une loi de force conforme à la réalité, et enfermées dans un récipient. L'inconvénient majeur de ces simulations sur ordinateur est que le nombre de particules y est limité, pour des raisons techniques et financières, à un millier. Il n'est pas aisé non plus d'obtenir, à l'aide d'un ordinateur, un mouvement microscopique strictement réversible : les nombres qu'il calcule sont habituellement arrondis par l'ordinateur sur le dernier chiffre significatif qu'on lui demande ; les erreurs, même minimes, qu'introduisent ces arrondis jouent, vis-à-vis du mouvement reconstitué, un rôle semblable à celui d'actions extérieures ; autrement dit, si l'on demande à l'ordinateur, à un certain stade, d'inverser toutes les vitesses puis de recalculer à partir de là le mouvement des particules, il ne retrouve pas la situation initiale qu'on lui avait donnée comme point de départ. L'instabilité des équations du mouvement, qui a été commentée plus haut, est aussi présente dans ce modèle.

Il est toutefois possible d'éviter les arrondis et de calculer le mouvement des particules de façon parfaitement réversible : si, quelque temps après le départ, on change les vitesses de sens, on retrouve exactement l'état initial après un temps égal. Pourtant, quelle que soit la configuration qu'on lui donne pour initier le calcul, l'ordinateur fait toujours tendre l'ensemble du système de particules vers le même état, qui présente les caractéristiques qu'on peut attendre d'une distribution d'équilibre. Ainsi établit-on une évolution irréversible à partir d'équations du mouvement réversibles, sans intervention d'influences extérieures comme la rugosité des parois ou les perturbations engendrées par des objets externes, avec comme seule cause possible le nombre des particules ; ce nombre n'a certes, ici, aucune commune mesure avec le nombre d'Avogadro, mais il est apparemment quand même suffisant pour que se manifestent les traits propres aux systèmes macroscopiques.

► DIU B., GUTHMANN C., LEDERER D. & ROULET B., « Éléments de Physique Statistique », Paris, Hermann, 1989, chap. IV. – DOLGOV A.D. & ZELDOVICH Ya. B., « Cosmology and Elementary Particles », *Reviews of Modern Physics*, 53, 1, 1981. – KREUZER H.J., *Non-equilibrium Thermodynamics and its Statistical Foundations*, Oxford, Clarendon Press, 1981.

chap. 10 et 11. — VAN KAMPEN N.G., *Stochastic Processes in Physics and Chemistry*, Amsterdam, North Holland, 1981, chap. V.

Bernard DU

→ Corps noir ; Probabilité [PHYSIQUE] ; Quantique ; Temps.

ISOPÉRIMÈTRE

Parmi les chapitres de la géométrie que l'on rencontre depuis l'Antiquité se trouve celui des isopérimètres et des isépiphanes. Montrer que, de tous les domaines du plan ayant un périmètre donné, le disque a la plus grande aire ; et que, parmi les solides ayant la même aire totale, c'est la sphère qui a la plus grande volume : cette recherche « extrême » intéressait aussi bien les mathématiciens que les astronomes. La question des isopérimètres et des isépiphanes semble en tout cas, durant une longue période de son histoire, liée à la perspective cosmologique : c'est elle qui lui assure pendant des siècles permanence et fécondité. Sa large diffusion est due, sans aucun doute, à sa présence dans le premier livre de l'*Almageste* et dans le commentaire qu'en fait Théon d'Alexandrie.

Ptolémée présente en effet comme un acquis de la géométrie le résultat suivant : « Puisque, parmi les figures différentes ayant leur périmètre égal, celles qui ont plus de côtés sont plus grandes, le cercle est la plus grande des figures planes, la sphère est le plus grand des solides, et le ciel est le plus grand des corps » (J.L. Heiberg, *Claudii Ptolemaei opera quae extant omnia. I. Syntaxis mathematica*, Leipzig, 1898, p. 13, lignes 16-19). Les commentaires de l'*Almageste*, depuis Théon d'Alexandrie, ne pouvaient plus désormais passer sous silence une telle formule, sans en apporter la preuve. D'autres mathématiciens se sont intéressés à ce problème, comme Héron d'Alexandrie et Pappus d'Alexandrie — dans le cinquième livre de *La Collection* (cf. trad. de P. Ver Eecke de *La Collection mathématique*, Paris/Bruges, 1933, t. I, p. 239 sq.).

Mais, à qui revient cet acquis mathématique ? Deux témoignages — relativement tardifs — concordent pour attribuer l'étude à Zénodore. Le premier est de Théon d'Alexandrie, qui nous dit : « Nous allons le prouver d'une manière abrégée, tirée des démonstrations de Zénodore dans son traité des figures isopérimètres (περί ἰσομέτρων σχημάτων) » (p. 33). Le second nous vient du commentateur d'Aristote, Simplicius, qui écrit : « Il a été démontré, en tout cas avant Aristote, s'il est vrai que celui-ci s'en sert comme d'une vérité démontrée, et par Archimède, et de façon plus détaillée par Zénodore, que parmi les figures isopérimètres celle qui est la plus étendue est, parmi les figures planes, le cercle, et parmi les figures solides, la sphère » (*Simplicii in Aristotelis De Caelo comment.*, éd. J.L. Heiberg, p. 412, lignes 12-17). On cherchera en vain des

traces de l'étude des isopérimètres chez Aristote ou Archimède. Mais Simplicius est d'accord avec Théon pour attribuer à Zénodore la première étude extensive. Ce dernier est, selon toute vraisemblance, postérieur à Archimède et antérieur à Théon, c'est-à-dire qu'il a dû vivre entre le III^e s. avant notre ère et le IV^e s. après. L'imprécision des dates de Zénodore nous empêche de savoir avec certitude si ce dernier avait écrit son traité pour justifier l'affirmation de Ptolémée non encore démontrée. Le texte où Théon rapporte les résultats de Zénodore, ainsi que l'*Almageste* étaient connus, dans leur traduction arabe, des mathématiciens et des astronomes de Bagdad au IX^e s., et ils suscitèrent une nouvelle tradition de recherche, inaugurée par le philosophe et savant al-Khāzīnī.

Dans cette tradition vont s'inscrire des mathématiciens de l'Est aussi bien que de l'Ouest, comme Ibn Hūd et Jābir ibn Aflāḥ. Ce sont surtout al-Khāzīnī et Ibn al-Haytham qui représentent les principales figures aujourd'hui connues (R. Rashed, *Les Mathématiques infinitésimales du IX^e au XI^e siècle*, vol. II : *Ibn al-Haytham*, Londres, Al-Furqān, 1993). La lecture et l'analyse de ces deux dernières contributions révéleront la grande distance qui sépare deux mathématiciens, qui pourtant faisaient partie d'une seule et même tradition. Alors que le premier développe le passé, le second, en l'accomplissant, touche aux rives de l'avenir. Al-Khāzīnī, mathématicien du milieu du X^e s., part lui aussi de la citation de Ptolémée, qu'il propose d'établir non point à l'aide du calcul, mais par les moyens de la géométrie. L'idée directrice, qui semble parfaitement consciente chez al-Khāzīnī, est que, parmi toutes les figures convexes d'un type donné (triangle, losange, parallélogramme...), la plus symétrique réalise un *extremum* pour une certaine grandeur (aire, rapport d'aire, périmètre...). On procède de la manière suivante : on fixe un paramètre et on fait varier la figure en la symétrisant par rapport à une certaine droite. Ainsi, en fixant le périmètre d'un parallélogramme, on transforme ce parallélogramme en un losange, si on le symétrise par rapport à une diagonale ; l'aire augmente dans le processus. À l'aide de plusieurs lemmes, al-Khāzīnī établit la propriété isopérimétrique des polygones réguliers, avant de passer enfin au théorème sur le cercle. Il montre ensuite à l'aide des polyèdres réguliers la propriété isépiphanique : « De tous les solides convexes ayant la même aire, la sphère est celui qui a le plus grand volume. »

La seconde tendance est représentée par un autre mathématicien, mort après 1040, le célèbre Ibn al-Haytham. Il entendait à l'évidence donner une démonstration « dynamique » de ces deux propriétés. C'est alors qu'il a rédigé un traité qui fut à l'avant-garde de la recherche mathématique de l'époque, mais qui conserva ce poste durant bien des siècles. Ibn al-Haytham commence par régler rapidement le cas des figures planes. Tout comme son prédécesseur al-Khāzīnī, il compare des polygones réguliers de même périmètre, et d'un nombre de côtés différent, et démontre 1) Soient deux polygones réguliers de même

périmètre, celui qui a le plus grand nombre de côtés a la plus grande aire. 2) Si un cercle et un polygone régulier ont le même périmètre, alors l'aire du cercle est plus grande que celle du polygone.

Contrairement à tous ses prédécesseurs, Ibn al-Haytham utilise la première propriété pour établir la seconde, en considérant le cercle comme limite d'une suite de polygones réguliers ; c'est en cela que sa démarche est « dynamique ». Notons qu'au cours de sa démonstration, il suppose l'existence de la limite « l'aire du disque », ce qui était assuré à partir de *La Mesure du cercle* d'Archimède.

La seconde partie de son traité est consacrée aux isépiphanes. Elle s'ouvre sur dix lemmes qui constituent à eux seuls le premier traité véritable sur l'angle solide, que je passe sous silence ici. Ces lemmes lui permettent en tout cas d'établir les deux propositions suivantes : 1) De deux polyèdres réguliers ayant des faces semblables et des surfaces égales, celui qui a le plus grand nombre de faces a le plus grand volume. 2) Si deux polyèdres réguliers ont pour faces des polygones réguliers semblables, et sont inscrits dans une même sphère, alors celui qui a le plus grand nombre de faces a la plus grande surface et le plus grand volume.

On observe donc qu'Ibn al-Haytham part des polyèdres réguliers. Les deux propositions que je viens de citer ne s'appliquent alors qu'au cas du tétraèdre, de l'octaèdre et de l'icosaèdre, puisque le nombre des faces d'un polyèdre régulier à faces carrées ou pentagonales est fixé (6 ou 12). L'intention d'Ibn al-Haytham ressort cependant clairement de ce qui précède : à partir de la comparaison entre polyèdres de même aire et d'un nombre différent de faces, établir la propriété extrême de la sphère ; c'est-à-dire approcher la sphère comme limite des polyèdres inscrits. Mais cette démarche dynamique se heurte manifestement à la finitude du nombre des polyèdres réguliers, et j'avoue que ce fait demeure incompréhensible. Cela dit, cet échec se double d'une grande réussite : la théorie de l'angle solide.

Ce traité d'Ibn al-Haytham prend déjà des distances à l'égard du cadre cosmologique, qui était initialement celui du problème isopérimétrique. Bien plus, porté par le courant de ce nouvel esprit, Ibn al-Haytham engage une autre étude sur l'extrémité. Il compare entre les différentes courbes convexes dans un segment de cercle, en considérant que la longueur de chaque courbe est la borne supérieure des polygones inscrits, pour ainsi ramener la comparaison entre les courbes à celle des polygones.

Pour aller plus loin qu'Ibn al-Haytham, il a fallu attendre la fondation et l'essor du calcul différentiel vers l'extrême fin du XVII^e s. et le début du XVIII^e s., ou plus précisément avec les premiers pas du calcul des variations. Le problème isopérimétrique changera alors et deviendra celui de trouver une courbe, ou une famille de courbes, qui rend maximale ou minimale une grandeur associée à chacune des courbes d'un ensemble de courbes donné. Tout a commencé en effet par un défi lancé par Jean Bernoulli aux

mathématiciens en juin 1696 sous la forme suivante : « Datis in plano verticali duobus punctis *A* et *B*, assignare mobili *M* viam *AMB*, per quam gravitate sua descendens, et moveri incipiens a puncto *A*, brevissimo tempore perveniat ad alterum punctum *B* » (*Acta Eruditorum*, 1696, p. 269). On reconnaît le célèbre problème du Brachistochrone : « Connaissant deux points *A* et *B* dans un plan vertical, trouver le chemin *AMB* qu'un mobile parcourt de *A* à *B* par vertu de son poids dans le temps le plus court possible. » Jacques Bernoulli montre en 1697 (*Acta Eruditorum*, 1697, p. 211) que cette courbe est un cycloïde.

De toute évidence, le problème isopérimétrique est bien sur un autre terrain que celui qu'avait investi au début la recherche issue de la question cosmologique. Cette dernière recherche s'était épuisée, on l'a vu, non pas après Ibn al-Haytham, mais pour ainsi dire au milieu de son livre. Avec les Bernoulli, c'est déjà le calcul des variations que leurs successeurs Euler, puis Lagrange, vont instituer définitivement. Il est vrai que l'étude du problème précédent ainsi que de ceux rencontrés par le calcul des variations naissant a conduit pour chaque problème à des équations différentielles dégagées par Euler. Ce dernier s'est donc efforcé de reprendre les problèmes et d'unifier les méthodes de solution. Ainsi, le problème à résoudre apparaît comme celui de déterminer parmi les courbes de longueur $L = \int \sqrt{1 + y'^2} dx$, celle pour laquelle la surface $\int y dx$ est maximale (Euler, *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes*, Lausanne, 1744). Il se peut cependant que l'*extremum* ne soit pas atteint, c'est-à-dire qu'aucune des courbes solutions ne donne l'*extremum*. La difficulté soulevée par l'existence de l'*extremum* accompagnera le calcul des variations pendant une longue période de son histoire.

Depuis la fin du XVII^e s. et au cours du XVIII^e s., on assiste donc à l'étude du problème isopérimétrique à l'aide des méthodes variationnelles, comme chez Euler, Lagrange... Un retour aux méthodes géométriques a été opéré à partir du début du XIX^e s. avec J. Steiner (1796-1863). Ce dernier a conçu une construction géométrique connue sous le titre de la symétrisation de Steiner. On associe à chaque domaine différent du cercle et à une direction de droite un nouveau domaine isopérimètre plus petit. Il s'agit des constructions géométriques au cours desquelles, à partir d'une figure qui n'est pas un cercle, on associe soit une figure de même périmètre mais d'aire plus grande, soit une figure de même aire mais de périmètre plus petit ; l'aire et le périmètre du cercle restant invariables par ces constructions. Steiner en conclut que le théorème est démontré pour le cercle, c'est-à-dire que parmi les courbes qui enferment une aire donnée, le cercle a le plus petit périmètre. Autrement dit : soit L le périmètre et S l'aire de la figure, Steiner propose l'inégalité $L^2 - 4\pi S \geq 0$. L'égalité n'est variable que pour le cercle. Mais Steiner suppose l'existence de l'*extremum* (cf. « Einfache Beweise der isoperimetrischen Hauptsätze », *Crelle's Journal*, 1838, 18, p. 281-296).

Pour surmonter cette difficulté, on a procédé à l'aide des méthodes du calcul des variations (Weierstrass, Schwarz...). T. Bonnesen revient aux constructions géométriques élémentaires (*Les Problèmes des isopérimètres et des isépiphanes*, Paris, Gauthier-Villars, 1929) et démontre les inégalités suivantes :

$$L^2 - 4\pi S \geq (L - 2\pi r)^2,$$

$$L^2 - 4\pi S \geq (2\pi R - L)^2,$$

$$L^2 - 4\pi S \geq \pi^2(R - r)^2,$$

avec r le rayon du plus grand cercle inscrit dans la courbe du périmètre L , et R le rayon du plus petit cercle circonscrit. Ces inégalités peuvent aussi résoudre le problème isopérimétrique. J. Steiner a également traité le problème isépiphanique géométriquement. Dans ce cas, il y a des difficultés supplémentaires en raison du comportement du volume. Rappelons parmi celles-ci le fait que cette fois on ne peut plus se ramener à des domaines convexes. En 1905, F. Bernstein avait trouvé l'inégalité

$$L^2 - 4\pi S + S^2 a^{-2} \geq 8\pi^2 a \sin \frac{R-r}{4a(1+2\pi)}$$

avec a le rayon de la sphère (cf. Bonnesen, 4^e chapitre, notamment p. 83). Comme on peut le constater le problème isopérimétrique, en quelque sorte à l'origine du calcul des variations au début du XVIII^e s., est devenu l'objet de la théorie des domaines convexes à partir de la fin du siècle dernier et au début de ce siècle. On pouvait encore suivre ce même problème dans d'autres domaines de la géométrie récente où les inégalités trouvées servent d'une manière ou d'une autre. Cette longue et riche histoire illustre à elle seule cette dialectique rencontrée dans les différents chapitres des mathématiques entre la pérennité des thèmes et leurs variations, entre une continuité et de profondes discontinuités.

► BERNOULLI J., *Acta Eruditorum*, 1697. — BONNESEN T., *Les Problèmes des isopérimètres et des isépiphanes*, Paris, Gauthier-Villars, 1929. — EULER, *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes*, Lausanne, 1744. — GOLDSTINE H.H., « A History of the Calculus of Variations from the 17th through the 19th Century », *Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences*, 5, New York/Heidelberg/Berlin, Springer Verlag, 1913. — HEIBERG J.L., *Claudii Ptolemaei opera quae extant omnia. I. Syntaxis mathematica*, Leipzig, 1898. — PAPPUS D'ALEXANDRIE, *La Collection mathématique*, trad. P. Ver Eecke, Paris/Bruges, 1933. — RASHED R., *Les Mathématiques infinitésimales du IX^e au XI^e siècle*, vol. II, *Ibn al-Haytham*, Londres, Al-Furqan, 1993. — STEINER J., « Einfache Beweise der isoperimetrischen Hauptsätze », *Crelle's Journal*, 1838.

Roshdi RASHED

→ Géométries.

JACOB François, né en 1920

François Jacob, biologiste français né à Nancy le 17 juin 1920, docteur de la Faculté des sciences de Paris en 1954. La presque totalité de son œuvre a été réalisée à l'Institut Pasteur de Paris, où il est entré,

comme assistant, en 1950. Nommé directeur de l'unité de génétique cellulaire en 1960, il sera aussi professeur au Collège de France à partir de 1965, année où il recevra, avec Jacques Monod et André Lwoff, le prix Nobel de physiologie et de médecine pour ses travaux portant sur la régulation de l'expression des gènes. Ceux-ci avaient abouti à un modèle de régulation de l'expression génétique fondé sur l'interaction des protéines avec le matériel génétique (ADN). Le modèle permettait d'expliquer une série d'observations restées isolées jusqu'alors : en particulier, la lysogénie (le fait que certaines bactéries puissent enclencher un processus de lyse après exposition aux rayons ultraviolets) et le phénomène qui avait été étudié par Jacques Monod sous les termes d'« adaptation enzymatique » (le fait que les bactéries manifestent des activités enzymatiques spécifiques en réponse au milieu dans lequel elles se développent). F. Jacob, initialement un élève de A. Lwoff (qui travaillait sur la lysogénie), avait engagé une collaboration avec J. Monod (qui travaillait sur l'adaptation enzymatique) en 1958. Le modèle dit « de l'opéron » est le développement du concept d'une régulation de l'expression des gènes fondée sur l'interaction entre protéine et ADN. En fournissant un mode simple et commun d'explication à deux phénomènes considérés jusqu'alors séparément, ce modèle introduisait l'idée d'une unité de fonctionnement de l'expression génétique, idée d'une grande fécondité puisqu'elle autorisait aussi à concevoir les bases fondamentales de la différenciation cellulaire.

● *La logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970. — *Le jeu des possibles, Essai sur la diversité du vivant*, Paris, Fayard, 1981. — *La statue intérieure*, Paris, Odile Jacob, 1987. — *La souris, la mouche et l'homme*, Paris, Odile Jacob, 1997.

Pascal NOUVEL

→ ADN ; Bricolage ; Cellule ; Régulation moléculaire.

JARDIN DU ROI → Muséum national d'histoire naturelle

KANT Emmanuel, 1724-1804

Ayant dispensé un enseignement (de logique, de métaphysique, d'éthique, mais aussi de mathématiques, de mécanique et de géographie) durant quarante ans à l'université de Königsberg, sa ville natale, Kant peut être considéré comme le premier grand philosophe dont l'activité coïncide avec son professorat. À 23 ans, dans ses *Pensées sur la véritable estimation des forces vives*, il tente de concilier Descartes et Leibniz afin de fonder le mécanisme newtonien. La mort de son père l'obligeant à quitter l'université avant l'heure, il mène une modeste vie de précepteur scandée par une cascade de publications. Nommé *Privatdozent* en 1755, il présente dans l'*Histoire générale de la nature et théorie*

de ciel une hypothèse cosmogonique que formulera Laplace en 1796. Mais ce n'est qu'à 46 ans, avec sa *Dissertation de 1770*, qu'il devient professeur titulaire. Voyant rétrospectivement dans cette ébauche de la théorie de l'idéalité du temps et de l'espace le commencement de sa philosophie critique, Kant interdira d'insérer ses écrits antérieurs à la publication de ses œuvres.

Car il apparaîtra que la métaphysique ne peut, à l'instar de toutes les autres sciences, se constituer comme telle que par une révolution subite. Ce n'est toutefois qu'après un long silence de onze ans que la *Critique de la raison pure* (1781) produit cette révolution philosophique permettant de fonder *a priori* la moralité sans concurrencer les sciences sur leur propre terrain. Jugeant le piétinement de la métaphysique à l'aune du progrès à l'œuvre en mathématique et en physique, Kant y établit que la limitation de la connaissance spéculative aux objets de l'expérience possible constitue un élargissement du pouvoir de la raison dans la mesure où ce rétrécissement supprime l'obstacle qui en menace l'usage pratique.

Devant l'indifférence générale rencontrée par la *Critique*, Kant en donne une présentation analytique, deux ans plus tard, dans les *Prolégomènes à toute métaphysique future qui pourrait se présenter comme science*. Le succès se faisant toujours attendre, il fait paraître en 1785 *Les fondements de la métaphysique des mœurs*, dans lesquels il établit la formule de la moralité. Mais c'est seulement l'année suivante, après l'engouement suscité par *Qu'est-ce que les lumières ?*, qu'il est célébré à titre de grand *Aufklärer* par ce siècle qu'il qualifiait dès 1781 de « siècle de la critique ». Devenues incontournables, ses thèses font désormais l'objet de vives polémiques auxquelles il répond en publiant en 1787 la seconde édition de la *Critique* puis, un an après, la *Critique de la raison pratique*, dans laquelle il fait de la liberté la clef de voûte du système de la raison pure. En 1791, la *Critique de la faculté de juger* achève l'édifice en établissant un pont entre nature et liberté.

Édité après la mort de Frédéric le Grand, son ouvrage *La religion dans les limites de la simple raison* (1792) fait l'objet d'un rescrit royal de 1794 interdisant à son auteur de publier dorénavant sur les questions religieuses. S'y soumettant, Kant fait paraître l'année suivante le *Projet de paix perpétuelle*, suivi de près par la *Métaphysique des mœurs*. En 1796, l'annonce d'un prochain traité de paix perpétuelle en philosophie marque le terme de son activité professorale. Huit ans plus tard, octogénaire, le maître de Königsberg meurt, laissant inachevé un manuscrit publié sous le titre d'*Opus postumum*.

● *Kant's gesammelte Schriften, herausgegeben von der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften*, Berlin, Druck und Verlag von Georg Reimer, puis Walter de Gruyter & Co, 28 vol., 1904. — *Œuvres philosophiques*, Paris, NRF-Gallimard « Pléiade », 1980, 1985, 1986.

► LEBRUN G., *Kant et la fin de la métaphysique*, Paris, A. Colin, 1970. — MARTY F., *La naissance de la métaphysique chez Kant*, Paris, Beauchesne, 1980. — PHILONENKO A., *L'Œuvre de Kant*, Paris, Vrin, 1969, 1972. — RIVELAYGUE J., *Leçons de métaphysique allemande*, t. 2, Paris, Grasset, 1992.

François BOITUZAT

→ Analogie ; A priori ; Concept ; Criticisme ; Dialectique ; Donné ; Empirisme ; Espace-temps ; Formalisme ; Géométries ; Idéalisme ; Infini ; Loi biogénétique fondamentale ; Nécessité ; Phénomène ; Phénoménisme ; Phlogistique ; Rationalité ; Révolution scientifique ; Transcendantal ; Vérité ; Vitalisme et mécanisme.

KEPLER Johannes, 1571-1630

Astronome allemand que l'on peut tenir pour le véritable créateur de l'astronomie moderne, l'homme qui, le premier, abandonne le cercle pour l'ellipse, s'interroge sur la cause du mouvement des planètes et formule les lois du mouvement des planètes qui porteront désormais son nom. Il déloge le Soleil du centre géométrique du système où Copernic l'avait installé ; il avance, encore confusément, la première hypothèse d'une dynamique associée au Soleil, qu'il faut se garder de prendre pour une « attraction », il repousse les limites du monde copernicien, déjà plus vaste que celui des Anciens. Il rejette cependant l'idée d'un univers infini. *L'Astronomia nova* (1609) est tout à fait explicite : « Cette pensée, écrit-il, porte avec elle je ne sais quelle horreur secrète. »

Que cette répulsion fût inspirée par des motifs religieux ne fait aucun doute : Kepler, né en 1571 dans le Wurtemberg, avait eu la vocation d'être pasteur et était habité d'une foi ardente. Plus encore que Copernic, dont la lecture l'avait soulevé d'enthousiasme dans sa jeunesse, il voue au Soleil un culte de tonalité mystique. Il croit retrouver dans l'ordre du monde la présence de la Trinité : le Soleil correspond au Père, la sphère des fixes au Fils, et l'entre-deux rempli de l'aura céleste, à l'Esprit saint !

Mais l'idée d'un univers infini lui paraît aussi réfutée par l'observation même. Le mode de répartition des étoiles fixes dans l'espace varie en effet d'une région à l'autre. Or, selon Kepler, si l'univers physique était infini et uniforme, cette répartition aurait dû, elle aussi, être uniforme. Les découvertes de Galilée, qu'il accueillit avec joie, ne le conduisirent pas à modifier sa position : il continue de soutenir que notre monde mouvant et héliocentrique est un monde singulier qu'il oppose au royaume des étoiles fixes.

Johannes Kepler, s'interrogeant sur les formes hexagonales des flocons de neige et de cristaux, se fonde encore sur les arguments d'Aristote pour affirmer leur origine liquide et, tout en comparant leur structure interne à celle d'une ruche d'abeilles – petites parties sphériques empilées de manière à occuper le moins d'espace possible –, invoque, afin d'expliquer la disposition de leurs faces, des raisons puisées aux sources de sa cosmologie mystique : les forces géométriques des cristaux seraient le reflet de l'« âme de la Terre ». On

reconnaît là le « pythagorisme » de Kepler, celui-là même sur lequel il a pu fonder l'énoncé des lois de la gravitation des planètes autour du Soleil ; aussi choquante qu'une telle filiation spéculative puisse paraître aux esprits positivistes.

● *Œuvres complètes. Gesammelte Werke*, Munich, Beck, 22 vol., 1938 sq. – *Le secret du monde*, trad. et notes A. Segonds à partir d'un essai initial de L.-P. Cousin, Paris, Les Belles Lettres, 1984.

► CHARDAK H., *Kepler, le chien des étoiles*, Paris, Séguier, 1989. – CHEVALLEY C., *Paralipomènes à Vitellion*, Paris, Vrin, 1980. – HALLEUX R., *L'étréne ou la neige sexangulaire*, Paris, Vrin, 1975. – HALLYN F., « Kepler, l'astrologie d'un astronome », *La pensée scientifique et les parasciences*, Paris, Albin Michel, 1993. *Les structures rhétoriques de la science*, de Kepler à Maxwell, Paris, Le Seuil, 2004. – KEPLER J., *Le Cas Kepler, précédé de « Les conceptions philosophiques de Wolfgang Pauli »*, de W. Pauli, W. Heisenberg, W. Heisenberg (Préface), Paris, Albin Michel, 2002. – KOVRÉ A., *Chute des corps et mouvement de la terre de Kepler à Newton*, trad. fr., Paris, Vrin, 1973. – SIMON G., *Kepler, astronome astrologue*, Paris, Gallimard, 1979.

Dominique LECOURT

→ Gravitation ; Héliocentrisme ; Image ; Inertie (Principe d') ; Lumière ; Terre ; Thématia ; Vision.

KHUWARIZMI (AI-) , ~ 780-850

Mathématicien, historien et géographe né à Khiva (Ouzbékistan) et mort à Bagdad. En tant qu'important membre de la « Maison de la Sagesse » (Bayt al-Hikma), il représente le type même des savants dont la cour du calife abbasside Al-Ma'mun sut s'entourer.

Si nous ne connaissons que peu d'événements de sa vie, les traces de ses travaux scientifiques sont multiples et de grande importance pour la science occidentale. Nombre de ses ouvrages ne sont parvenus que par fragments et souvent seulement à travers des traductions latines datant du Moyen Âge. Géographe et astronome, il composa un livre de Tables astronomiques, ainsi que des ouvrages sur l'astrologie et l'astrolabe. Il faut surtout remarquer son *Livre de la configuration de la Terre*, composé en collaboration avec d'autres savants du Bayt al-Hikma, qui met en évidence l'assimilation des travaux de Ptolémée revus à l'aune des nouvelles connaissances, conséquence de l'extension de l'empire vers l'Orient, et corrigés pour s'harmoniser à la conception terrestre du Coran.

Dans le domaine mathématique, il assura la diffusion du système décimal de position emprunté à la culture indienne. Son nom latinisé, « algorithme », désigna longtemps ce système de numération constitué du zéro et des neuf chiffres, avant de prendre le sens moderne plus général. Atteste aussi de son influence le mot « algèbre », dérivant du titre de son ouvrage, célèbre au Moyen Âge, *Liher Mumeti filii Moysi Alchoarismi de algebra et almuchabala* dans sa version latine. Sont ici décrites les opérations nécessaires à la

résolution d'équations algébriques : *algebra* pour le passage de termes d'un membre à l'autre, et *almuchabala* pour la réduction de termes semblables.

► ZEMANEK H., « Dixit Algorizmi », *Algorithms in Modern Mathematics and in Computer Science*, Urganç, Lecture Notes in Computer Science 122, chap. 1, 1979.

Pablo ARGON

→ Analyse diophantienne ; Équation.

KOCH Robert, 1843-1910

Microbiologiste et médecin allemand. L'un des fondateurs de la bactériologie moderne, Koch sut démontrer la nature parasitaire de la tuberculose au moyen de l'analyse microscopique des bacilles isolés du corps du malade et maintenus en culture pure. Méthodologie dont les principes avaient été définis dans un article intitulé : « Zur Untersuchung von pathogenen Organismen » (1881) et dont Koch commentera les résultats dans sa leçon du 24 mars 1882 consacrée à la définition de l'étiologie de la tuberculose, prononcée devant les membres de la Société de physiologie de Berlin. Sur le plan thérapeutique, Koch crut trouver dans la tuberculine (résultant du filtrage de bacilles tuberculeux multipliés durant six à huit semaines dans un milieu contenant du glycéril), découverte en 1890, un remède par lequel « le processus morbide pouvait être interrompu, sans influence néfaste sur l'organisme ». Cependant, bien que capable d'effets notables sur les altérations tuberculeuses, la tuberculine s'avéra impuissante à enrayer la progression du mal. Les réactions provoquées par son administration permettent en revanche de diagnostiquer avec précision la présence d'un bacille tuberculeux actif. L'observation par Koch de tels changements de comportement de l'organisme vis-à-vis d'une infection d'épreuve, à l'origine des premières tentatives de classification anatomique et clinique des formes de tuberculose, servira plus tard de base à von Pirquet pour construire la théorie de l'allergie, puis à Calmette et Guérin, pour mettre au point la vaccination antituberculeuse. Outre la tuberculose, d'autres pathologies telles que la malaria, le choléra et l'anthrax firent l'objet des recherches de Koch. Ce dernier s'opposa quelquefois sur l'un ou l'autre de ces sujets d'étude à d'autres savants de son époque. Ainsi, durant plus de cinq ans (1881-1886), Koch contesta-t-il vigoureusement à tort la définition pastoriennne des modes de transmission et de traitement du charbon véhiculé par le bacille de l'anthrax chez les animaux de ferme.

● *Gesammelte Werke von Robert Koch*, éd. J. Schwalbe, G. Gaffky & Pfuhl, 2 vol., 1912. – « Zur Untersuchung von pathogenen Organismen », *Mitteilungen aus dem Kaiserlichen Gesundheitsamt*, 1, 1881, 1-48. – « Ueber die Pasteurischen Milzbrandimpfungen », *Deutsche medizinische Wochenschrift*, 13, 1887, 722. – « Die Aetiologie der Tuberculose », *Berliner klinische Wochenschrift*, 19, 1882, 221-230. – « Ueber den derzeitigen Stand der Tuberkulosebekämpfung », allocution de réception du prix Nobel du 12 déc. 1905.

Deutsche medizinische Wochenschrift, 32, 1906, 89-92. – « The Relations of Human and Bovine Tuberculosis », *Journal of the American Medical Association*, 51, 1908, 1256-1258.

► DOLMAN C.E., « Koch », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1972, t. VII, p. 420-435. – LAGRANGE E., *Robert Koch : Sa vie et son œuvre*, Tours, 1938. – PASTEUR L., CHAMBERLAND C., ROUX E. & THUILLIER L., « De l'atténuation des virus », *Revue scientifique*, 2^e sér., 4, 1882, 353-361 ; « La vaccination charbonneuse. Réponse à un mémoire de M. Koch », *ibid.*, 5, 1883, 74-84. – WEBB G.B., « Robert Koch (1843-1910) », *Annals of Medical History*, n. s. 4, 1932, 509-523. – Coll. : *Bulletin de l'union internationale contre la tuberculose*, vol. 56, n° 3-4, sept./déc. 1981, p. 90-119.

Éric HAMRAOUI

→ Spengler.

KOYRÉ Alexandre, 1892-1964

Mathématicien, philosophe et historien des sciences français d'origine russe. À seize ans, Koyré quitte la Russie ; il suit les cours de Hilbert et de Husserl à Göttingen avant de s'installer à Paris, où il côtoie Bergson et commence une thèse sur *L'idée de Dieu dans la philosophie de saint Anselme* qu'il terminera en 1923, après avoir combattu durant quatre ans pour sa patrie d'élection. En 1929, dans sa thèse de doctorat d'État sur *La philosophie de Jacob Boehme*, il analyse l'effort des théologiens philosophes pour repenser leur discipline dans un monde copernicien. Ce qui le conduit d'une histoire de la philosophie et de la religion vers une étude des « origines de la science moderne » définie, dans ses *Études galiléennes* (1939), comme une « transformation des cadres de l'intelligence » caractérisée par une « géométrisation de l'espace » et une « dissolution du Cosmos ». Entre-temps, ce « maître de lecture » (Belaval) participe à la création des *Recherches philosophiques* (1931).

Durant la Seconde Guerre mondiale, envoyé aux États-Unis afin d'y soutenir la cause de la France libre, il participe à la création de l'École libre des hautes études de New York. Après guerre, son enseignement, qui se partage entre Paris (EPHE) et Princeton, porte sur les thèmes cosmologiques liés à la révolution astronomique des XVI^e et XVII^e s. (*From the Closed World to the Infinite Universe*, 1957) et sur une analyse minutieuse de ses concepts-clés (*La révolution astronomique*, 1961). En 1964 paraissent les *Newtonian Studies*, fruit de quinze ans de recherches sur la loi de la gravitation universelle et la synthèse de la physique terrestre et de la physique céleste présentée dans les *Principia*.

► BELAVAL Y., « Les recherches philosophiques d'A. Koyré », *Critique*, août-sept. 1964, p. 675-704. – JORLAND G., *La science dans la philosophie*, Paris, Gallimard, 1981.

François BOITUZAT

→ Expérience.

KREBS Hans Adolf, 1900-1981

Biochimiste allemand, auteur de travaux sur le métabolisme des glucides qui l'ont conduit à décrire un ensemble de réactions d'oxydations et de réductions connu sous le nom de « cycle de Krebs ». Prix Nobel de physiologie et de médecine en 1953 avec F.A. Lipmann. Le cycle de Krebs est le segment terminal commun des voies métaboliques d'un grand nombre de nutriments. Il est aussi nommé cycle des acides tricarboxyliques ou cycle de l'acide citrique. Il génère des substrats qui sont ensuite utilisés dans la chaîne respiratoire (dont les enzymes sont localisées dans la mitochondrie) et fournit, par ce biais, d'importantes quantités d'énergie à la cellule. Krebs quitta l'Allemagne en 1933 du fait de la montée du nazisme et continua ses recherches d'abord à l'université de Cambridge (Yorkshire, de 1935 à 1954), et finalement à Oxford (de 1954 à 1967).

● « Excursion into the borderland of biochemistry and philosophy », *Bulletin of the Johns Hopkins hospital*, 95, 1954, p. 45. – « The making of a scientist », *Nature*, 215, 1967, p. 1244.

► JOHNSON W.A. & KREBS H.A., « The role of citric acid in intermediate metabolism in animal tissues », *Enzymologia*, 4, 1937, p. 148.

Pascal NOUVEL

→ Prix Nobel des sciences.

KUHN Thomas Samuel, 1922-1996

Philosophe et historien des sciences. Après des études de physique, il s'intéresse à l'histoire des sciences. Son œuvre la plus connue, publiée en 1962, *La structure des révolutions scientifiques*, développe la conception d'une histoire des sciences scandée selon deux rythmes différents : science normale (où l'activité des chercheurs consiste à résoudre des énigmes) et révolutions scientifiques (au cours desquelles s'élabore un nouveau paradigme, tout à la fois nouvelle façon de voir et nouvelle direction des problèmes). Ce terme de paradigme constitue l'innovation conceptuelle principale de l'œuvre de Kuhn. La délimitation du sens de ce terme restant imprécise, Kuhn ne cessera par la suite d'y apporter des corrections et des nuances. L'histoire des sciences aurait été dominée par l'idée d'un savoir cumulatif auquel le concept de paradigme substitue l'idée d'un savoir se renouvelant périodiquement de manière radicale en installant un nouveau cadre de perception des problèmes. Ce renouvellement n'est pas lui-même déterminé de manière purement rationnelle mais fait intervenir une composante sociologique que Kuhn invitera à élucider plus en détail. Cependant, il s'est démarqué nettement de plusieurs conclusions importantes nées des travaux sociologiques entrepris dans cette perspective. En particulier, il a toujours refusé de considérer sa conception de l'histoire des

sciences comme relativiste. Il semble que ce point ait une certaine importance aux États-Unis, où le conflit entre réalisme et relativisme est perçu comme un débat de haute tenue philosophique.

• *The Copernician revolution; planetary astronomy in the development of western thought*, Cambridge (Mass.), Cambridge Univ. Press, 1957 (trad. fr. A. Hayli, *La révolution copernicienne*, Paris, Fayard, 1973). – *The structure of the scientific revolutions*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1962, rééd. avec postface, 1970 (trad. fr. L. Meyer, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1982). – *The essential tension: selected studies in scientific tradition and changes*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1977 (trad. fr. M. Biezunski, P. Jacob, A. Lyotard-May & G. Voyat, *La tension*

essentielle: tradition et changement dans les sciences, Paris, Gallimard, 1990). – *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*, New York, Oxford Univ. Press, 1978.

► BARNES B., *T.S. Kuhn and social science*, New York, Columbia Univ. Press, 1982. – HORWICH P. éd., *World changes: Thomas Kuhn and the nature of science*, Cambridge/Londres, MIT Press, 1993. – HLOYNINGEN-HUENE P., *Reconstructing scientific revolutions*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1993.

Pascal NOUVEL

→ Continuité; Découverte; Épistémologie; Expérience; Paradigme; Réfutabilité; Reproductibilité; Révolution scientifique; Rupture; Théorie; Validation.

LAMARCK, 1744-1829

Naturaliste français. Jean-Baptiste-Pierre-Antoine de Monet de Lamarck est né à Bazentin, en Picardie, le 1^{er} août 1744, le dernier d'une famille noble de 11 enfants, peu fortunée. D'abord destiné par son père à l'état ecclésiastique, il fit ses études au Collège des jésuites d'Amiens, réputé pour la qualité de son enseignement. Ne se sentant pas la vocation religieuse, il s'engagea dans l'armée à 17 ans, et il participa brillamment à la guerre de Sept Ans (1756-1763).

Au lendemain de cette guerre, il résida en garnison dans le midi de la France, et il s'y adonna à l'étude de la botanique. Obligé de quitter l'armée pour raison de santé, il vint s'établir à Paris, où il vécut d'expédients, tout en entreprenant des études médicales et botaniques, sous la direction de Bernard de Jussieu. Il ne tarda pas à acquérir une grande maîtrise en ce domaine, et en 1778 (1779) il publia, grâce à la protection de Buffon, une description des plantes de France, classées d'après la méthode dichotomique (réponse par oui/non à la question: la plante étudiée a-t-elle un caractère donné, et ainsi de suite pour toute une série de caractères). Cette *Flore française*, en 3 volumes, le rendit célèbre et le consacra comme un botaniste de renom.

La Révolution allait décider définitivement de son sort, en changeant ses occupations, et par là son destin. Lorsque Lakanal créa, par le décret du 10 juin 1793, le Muséum national d'histoire naturelle de Paris, il y fut nommé à la chaire d'enseignement des Insectes et des Vers, pour laquelle il n'était apparemment pas préparé. À 50 ans, Lamarck commence une nouvelle carrière, qui s'avéra très brillante. Il continua encore quelque temps à s'occuper de botanique, et même de météorologie. Mais il affirma très rapidement sa maîtrise dans le domaine immense qui lui avait été dévolu: celui des « Invertébrés » (c'est lui qui a forgé le mot en 1797, qui est aussitôt devenu courant). Les Invertébrés représentaient les 9/10 du monde animal alors connu, et ils étaient encore en état de « chaos » ou de « ramas », comme le disaient Cuvier et Étienne Geoffroy Saint-Hilaire. Lamarck fut le premier à en proposer une Systématique rationnelle, en 1801, dans le *Système des Animaux sans vertèbres*, puis, de 1815 à 1822, dans la volumineuse *Histoire naturelle des*

L

Animaux sans vertèbres, qui sera le livre de chevet de plusieurs générations d'invertébristes. En même temps, Lamarck en fondait la paléontologie, en déterminant plus d'un millier d'espèces fossiles (c'est Lamarck qui a fixé, en 1802, le sens courant actuel du mot « fossile »).

C'est aussi pendant ces années de la Révolution que Lamarck devait concevoir et développer la nouvelle doctrine biologique (il est un des inventeurs du mot « biologie »), qui allait progressivement investir les sciences naturelles puis la philosophie. À partir des connaissances qu'il a acquises par l'étude approfondie de milliers d'espèces actuelles et fossiles, qui lui servent, comme il le répète, de « pièces justificatives » de ce qu'il appelle « ma conclusion particulière », Lamarck en vient à enseigner le Transformisme (ou évolution), c'est-à-dire la transformation des espèces les unes dans les autres à travers les temps géologiques, depuis les formes organiques les plus primitives et les plus simples jusqu'aux plus complexes et aux plus développées, y compris l'homme. Il introduit ses premières formulations transformistes dans le discours d'ouverture de son cours de l'an VIII (1800), dont les *Recherches sur l'organisation des Corps vivans* (1802), sa *Philosophie zoologique* (1809) et son Introduction (1815) à l'*Histoire naturelle des Animaux sans vertèbres* ne sont que des développements. La classification systématique des Invertébrés, où il est passé maître – Deshayes (1845) nous apprend qu'elle était « vénérée » à l'égal de celle de Linné en botanique –, révèle, assure-t-il, la marche de la nature « dans la production » des êtres vivants: toute classification vraie, comme le répètera Darwin à sa suite, est donc généalogique. L'étude des espèces fossiles « analogues » aux espèces actuelles, dont il donne plusieurs dizaines d'exemples, fournit l'illustration paléontologique d'espèces changées les unes dans les autres « par le temps et les circonstances ».

Le Lamarck qui a passé à la postérité – le classificateur des Invertébrés, le fondateur de leur paléontologie, le promoteur du mot biologie, l'introducteur du mot fossile dans le sens actuel, le fondateur du Transformisme (ou évolution) – date donc bien de cette époque où il enseigne au Muséum d'histoire naturelle de Paris. Admiré par beaucoup pour ces performances, détesté par certains, dont Cuvier et beaucoup d'autres depuis, pour les mêmes raisons ou seulement pour

l'une ou l'autre d'entre elles, Lamarck a joui d'une grande réputation pendant une grande partie du XIX^e s., malgré une légende (qui ne date d'ailleurs que des dernières décennies de ce même siècle) qui a voulu faire croire qu'il a vécu et qu'il est mort pauvre et oublié, alors que les textes de l'époque révèlent le prestige immense de ses travaux zoologiques, et l'audience grandissante de ses idées évolutionnistes.

Ces idées avaient été répandues par Lamarck non seulement dans la partie « philosophique », mais aussi et surtout dans la partie « scientifique » de ses travaux, immensément plus importants et incomparablement plus exploités par les savants qui, pour leurs recherches, les consultaient avec la plus grande considération, comme nous l'avons vu. N'oublions pas enfin que Lamarck avait donné au Muséum un enseignement qui fut fréquenté par plus d'un millier d'étudiants venus de France et de toute l'Europe. Les recherches actuellement entreprises par un groupe d'historiens des sciences pour retrouver leurs traces nous en apprendront encore plus sur l'influence exercée par la doctrine de Lamarck sur les esprits du temps, et nous aideront à comprendre comment, vers les années 1850, une grande partie des naturalistes européens était déjà acquise à la doctrine de la transformation biologique des espèces, qui devait triompher dans la seconde moitié du XIX^e s. grâce au Darwinisme.

Marié trois fois, Lamarck a eu huit enfants. Frappé de cécité en 1818, il a vécu ensuite retiré dans l'appartement qui était le sien au Muséum, entouré des soins de deux de ses filles, jusqu'à sa mort le 18 décembre 1829.

► DELANGE Y., *Lamarck : sa vie, son œuvre*, Arles, Actes Sud, 1984. — JORDANOVA L.J., *Lamarck*, Oxford/New York, Oxford Univ. Press, 1984. — LAMARCK : Site Web : www.lamarck.net; Gould S.L., *Branching through a wormhole*, Natural History, march 1999, n° 2, p. 24. — LAURENT G., *La Naissance du Transformisme. Lamarck entre Linné et Darwin*, Paris, Vuibert/Adapt, 2001; *Lamarck*, in *Dictionnaire du Darwinisme et de l'Évolution*, éd. P. Tort, Paris, PUF, 1996. — LANDRIEU M., « Lamarck, le Fondateur du Transformisme, sa Vie, son Œuvre », *Mémoires de la Société Géologique de France*, 1908, t. 21. — PACKARD A.S., *Lamarck, the Founder of Evolution. His life and work. With translations of his writings on Organic Evolution*, Londres, Longmans, Green & Co, 1901. — SZYPMAN L., *Jean-Baptiste Lamarck et son époque*, Paris, Masson, 1982.

Goulven LAURENT

→ Catastrophisme : Cuvier; Espèce; Fossile; Lamarckisme; Muséum national d'histoire naturelle; Théorie; Vivant (Théorie du).

LAMARCKISME

Le « lamarckisme » est une invention anglaise, qui trouve difficilement sa place dans la littérature évolutionniste française. C'est presque à la poursuite d'un concept fantôme que l'historien des sciences est donc convié à se lancer. Le terme « lamarckism » est, en

revanche, très fréquent dans la littérature darwinienne anglo-saxonne, surtout la plus récente. Aussi est-il nécessaire de bien faire la distinction entre les significations du mot et les usages que l'on en fait.

On sait que Lamarck a commencé à faire connaître sa théorie de la transformation des espèces en 1800, et qu'il l'a défendue jusqu'à sa mort en 1829. Cette théorie, malgré les oppositions et les résistances tout à fait compréhensibles en face d'une doctrine nouvelle et révolutionnaire, s'est diffusée progressivement dans les milieux scientifiques, et même populaires, au point que, dans les années 1850, au témoignage de Baden Powell en Angleterre, et de Camille Dareste en France, elle était admise par une grande partie de l'opinion. « The problem is solved », affirmait en effet Baden Powell en 1857; et Camille Dareste assurait en 1859, avant que Darwin ne fût connu : « Nous voyons aujourd'hui les hommes les plus éminents entrer dans la voie ouverte par Lamarck, et faire de l'idée de la variabilité limitée des espèces le point de départ de leurs théories scientifiques. » Pour désigner cette « voie » ouverte par Lamarck au début du siècle, il n'y avait pas de vocable particulier. Ce n'est qu'à la fin du siècle que l'on verra apparaître les « ismes » destinés à la dénommer.

Pour les Français, quand ils l'utilisent, le « lamarckisme » désigne la doctrine du « fondateur du transformisme » : Lamarck est le premier à avoir introduit dans le domaine de la science l'idée de la transformation des espèces les unes dans les autres au cours des temps géologiques. Les « pièces justificatives » de cette théorie consistent dans les études approfondies qu'il a menées sur plusieurs milliers d'espèces actuelles, et plusieurs centaines d'espèces fossiles, en utilisant la problématique des « espèces analogues ». Pour justifier la transmission des changements d'une génération à une autre, il a fait appel, sans essayer de le justifier, à un mécanisme admis par tout le monde à l'époque : « l'hérédité des caractères acquis ». On sait que c'est Darwin qui emploiera cette expression pour la première fois (elle était inconnue de Lamarck), et qu'il essaiera d'en faire la justification théorique, en élaborant son hypothèse de la « Pangenèse », qu'il défendait avec d'autant plus de soin qu'il la considérait comme « son enfant malheureux », parce qu'il était en butte à beaucoup d'attaques.

L'acception originelle du mot « lamarckisme » a été admise pendant longtemps, non seulement par les Français, mais par les évolutionnistes d'autres pays. Dans l'édition de l'*Encyclopædia Britannica* de 1965, le grand biologiste américain, T.H. Morgan, Prix Nobel de médecine, affirmait que c'était une erreur de réduire la théorie de l'évolution de Lamarck à l'hérédité des caractères acquis, car « l'hérédité des caractères acquis n'était qu'une partie de l'enseignement de Lamarck concernant le transformisme, ... et probablement pas la partie la plus importante ». Ce n'est que récemment que, pour des raisons idéologiques, des néodarwiniens ont entrepris une manœuvre de déqualification de cette

définition traditionnelle. Ainsi, dans *The new Encyclopædia Britannica*, de 1990, à l'article « Lamarck », on peut lire : « Pioneer French biologist, who is best known for his idea that acquired traits are inheritable, an idea known as Lamarckism, which was controverted by Charles Darwin. » Et, dans la dernière édition (1996) du livre de Peter Bowler : *Life's splendid Drama*, l'Index comporte cette indication laconique autant que fautive : « Acquired characters, inheritance of. See Lamarckism. »

L'histoire des sciences porte témoignage de l'origine tardive et circonstancielle du « lamarckisme », puis d'un glissement orienté, effectué en deux domaines précis et faciles à identifier : la littérature scientifique et les dictionnaires. Pendant à peu près un siècle — le XIX^e s. —, de la première formulation de la théorie de la transformation des espèces, en 1800, jusque vers les années 1890, la théorie de Lamarck s'est répandue sans que ceux qui l'admettaient ou la rejetaient aient éprouvé le besoin de lui attribuer d'autres qualificatifs que celui tout simple de « théorie de Lamarck », ou « idées de Lamarck », ou « doctrine de Lamarck ». Lamarck lui-même parlait de « ma théorie » ou de « ma philosophie ». Comme l'on sait, le mot « évolution » ne sera employé qu'après sa mort, du moins en France, par Frédéric Gérard, en 1844, dans le *Dictionnaire universel d'Histoire naturelle*, mais Lyell parlait déjà d'« évolution » en 1832. Quant au mot transformisme, il ne sera introduit par Broca qu'en 1867. Par conséquent, les idées relatives à la doctrine de la transformation des espèces étaient à l'époque rattachées directement au nom de Lamarck.

Cuvier lui-même, dans son discours nécrologique, dont on sait qu'il fut mal reçu par ses collègues, parle des « idées » de Lamarck, qu'il qualifie d'ailleurs de « bizarres », de son point de vue fixiste. Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, en revanche, recommandait à ses élèves de lire Lamarck pour connaître ses conceptions transformistes, qu'il approuvait. Boblaye parlait de « la théorie hardie de Lamarck » pour la célébrer. En 1859, au moment de la parution de l'*Origine des espèces*, dans la nombreuse littérature que suscite cet événement, les savants font constamment allusion à « la théorie de Lamarck », pour en rapprocher celle de Darwin, qui à leur avis n'en était qu'une « amélioration ».

Comme on peut le constater, nulle part il n'est question de « lamarckisme ». Même le qualificatif « lamarckien » n'apparaît pas en français. En revanche, Lyell parle de « lamarckian view », qu'il compare à celle du « Darwin's camp ». Le mot « lamarckisme » ne commence à apparaître que vers la fin du XIX^e s. Ce terme n'est d'ailleurs pas une création originelle des partisans de Lamarck. Par une dérivation dont le modèle est sans doute unique dans l'histoire des concepts, le « lamarckism » a été forgé en connexion avec son « successeur » le « darwinism ».

Son apparition n'est donc pas liée à Lamarck; elle l'est beaucoup plus, historiquement, à Darwin. Ce n'est que lorsque le vocable « darwinism » aura été inventé en 1866 par Wallace — terme qui sera adopté avec la

satisfaction que l'on devine par Darwin lui-même — que l'idée se répandra de désigner les concepts de Lamarck sous le nom de « lamarckisme ». L'on sait que les naturalistes de l'époque ne voyaient pas d'opposition fondamentale entre les deux points de vue. Comme Lyell et beaucoup d'autres scientifiques le soutenaient, la doctrine de Lamarck et celle de Darwin étaient les mêmes, Darwin n'ajoutant à Lamarck que le mécanisme de la sélection naturelle, qui restait un mécanisme bien abstrait, du fait qu'on ne pouvait en donner d'illustrations expérimentales. Le critère de séparation entre le « lamarckisme » et le « darwinisme » se faisait donc sur l'acceptation ou le rejet de cette notion. Comme Darwin avait soutenu, et même défendu, l'hérédité des caractères acquis beaucoup plus nettement et beaucoup plus « philosophiquement » que Lamarck, en forgeant la théorie de la Pangenèse, il n'était pas question que la séparation entre les deux « écoles » se fit sur ce point commun aux deux savants.

Darwin, en effet, au faite de sa gloire, avait, en 1880, deux années avant sa mort, véhémentement refusé l'amputation que certains se permettaient de faire de sa pensée. Dans un texte célèbre, dont les darwinologues ont souligné la véhémence inhabituelle, il avait repoussé l'accusation de Vyville Thomson, qui l'avait fait sortir de ses gonds, au point qu'il fallut censurer une partie de la lettre qu'il avait adressée à la revue *Nature*. « Can sir Wyville Thomson, s'indignait Darwin, name anyone who has said that the evolution of species depends only upon natural selection? As far as concerns myself, I believe that no one has brought forward so many observations on the effects of use and disuse of parts as I have done in my *Variations of Animals and Plants under domestication*, and those observations were made for this special object. I have likewise there adduced a considerable body of facts, showing the direct action of external conditions on organisms, though no doubt since my books were published much has been learnt on this head. » On ne pouvait être plus clair : ceux qui voulaient réduire Darwin à la seule sélection naturelle se mettaient en contradiction formelle avec lui.

Ce n'est qu'après la mort de Darwin (1882) que le contenu des concepts va être profondément modifié. C'est en effet en 1883 et 1885 que Weismann prononce ses fameuses conférences à l'université de Fribourg, où il met en cause directement et nettement les deux savants, Lamarck et surtout Darwin, pour leur soutien à la doctrine de l'hérédité des caractères acquis. Si le point de vue qu'il défend contre eux se trouve être juste, assure-t-il, « l'idée que nous nous faisons au sujet des transformations des espèces aura également à subir un remaniement complet, car tout le système de la transformation par l'usage et la désuétude, édifié et fréquemment utilisé par Lamarck et par Darwin, devra être abandonné ». Au lendemain de la mort de Darwin, Weismann se croit donc appelé à ouvrir une voie nouvelle pour la théorie de l'évolution, différente de celle de Lamarck, bien sûr, mais aussi et surtout de celle de

Darwin, car, assure-t-il encore, il y a « peut-être beaucoup à ajouter, et beaucoup aussi à retrancher » à ce que Darwin a apporté à l'hypothèse de la descendance « si longtemps enfouie dans un profond sommeil ». La seule chose, à son avis, qui puisse être retenue de Darwin, et c'est important, car « elle peut très bien servir de base à une carte complète future », c'est le principe de la sélection naturelle, par lequel Darwin « a montré la route qui nous permettra de pénétrer dans cette terre inconnue », où Weismann projette d'introduire lui-même ses auditeurs.

C'est sur cette coupure entre ce que Weismann juge recevable dans Darwin et ce qu'il faut en retrancher que la division des évolutionnistes va se réaliser. Une fraction des évolutionnistes, en particulier des paléontologistes américains, refusa de renoncer à l'héritage conceptuel commun, c'est-à-dire à l'hérédité des caractères acquis. Ils s'intitulèrent « néolamarckiens » (Packard, 1885), comme si le concept avait été plus lamarckien que darwinien – il était en fait lamarcko-darwinien. D'autres y renoncèrent, au contraire, et s'intitulèrent « néodarwiniens », comme Romanes les appela en 1888, après les avoir d'abord traités de « post-darwiniens », car ce grand défenseur de Darwin considérait qu'ils n'étaient pas darwiniens.

À peine le terme de « néolamarckisme » – ou plutôt, pour rester dans les perspectives historiques, celui de « néolamarckism » – est-il apparu que, comme nous l'avons vu, celui de « lamarckisme » apparaît lui aussi. Il le fait donc dans un contexte darwinien, ou même plutôt darwiniste, bien plus en fait que lamarckien. Le glissement de « néolamarckism » vers « lamarckism » se fera ensuite subrepticement, comme d'ailleurs le retour connexe de « néodarwinism » vers « darwinism ». Le « lamarckism » a connu ainsi dès l'origine une histoire trouble et complexe. C'est un vocable (à ne pas confondre avec un concept) très utilisé aujourd'hui par les darwinistes, qui trouvent là un moyen commode de se débarrasser de tout ce qui ne leur plaît pas chez Darwin. C'est ce qui explique que les textes que nous avons cités de Darwin n'apparaissent jamais dans leur littérature : il faut éviter qu'ils soient connus de leurs lecteurs, qu'il faut maintenir à tout prix dans leur ignorance. L'emploi du terme « lamarckism » a ainsi un rôle tout à fait « situé » dans leur épistémologie.

On peut suivre les altérations successives du mot lamarckisme en suivant celles du mot darwinisme. Au début, le lamarckisme avait été le darwinisme moins la sélection naturelle. Ensuite ceux qui utilisent le vocable lui attribuent, en exclusivité et comme le fondement essentiel de la doctrine, l'hérédité des caractères acquis. Ensuite ils enlèvent le hasard du « lamarckism », puis le matérialisme, et la notion même d'évolution. Un des derniers avatars est le lamarckisme social, inventé dans le but précis d'évaluer le darwinisme social du darwinisme.

Il est inconvenant – et même malhonnête – d'entretenir la confusion entre néolamarckisme et lamarckisme, qui, nous l'avons vu, a une tout autre

signification. L'idéologie n'a pas en effet à se substituer à l'histoire. Les termes de darwinisme, néodarwinisme, lamarckisme, néolamarckisme désignent chacun des doctrines philosophiquement bien définies et historiquement bien situées. Mais tant que certains néodarwiniens s'obstinèrent à projeter, dans un récipient qu'ils nomment « lamarckism » pour les besoins de leur cause, tout ce qu'ils veulent enlever au darwinisme, en donnant de Darwin une image historiquement fautive, il y aura encore des auteurs pour proclamer, comme dans l'encyclopédie *Britannica*, que Darwin s'est opposé à Lamarck sur la question de l'hérédité des caractères acquis, et continuer donc à se mettre en contradiction, non seulement avec la vérité historique, mais avec Darwin lui-même. La confusion durera donc aussi longtemps que certains néodarwiniens s'obstineront à se faire passer pour darwiniens, et qu'ils mettront autant d'obstination à faire passer les néolamarckiens pour des lamarckiens. L'histoire de la déformation du lamarckisme de Lamarck est ainsi malheureusement liée à celle du darwinisme de Darwin.

Pour la clarté de l'exposé, il faudrait donc revenir à la distinction nette entre les deux concepts : celui du « lamarckisme » et celui du « néolamarckisme ». Du coup, il faudrait reconnaître aussi que l'hérédité des caractères acquis est un concept qui n'est certes pas « néodarwinien », mais qu'il est aussi bien darwinien que lamarckien. C'est-à-dire qu'il faudrait enseigner le sens de l'histoire à ceux qui cultivent, pour leurs besoins idéologiques, la confusion des mots. Le « lamarckisme » redevient alors ce qu'il est fondamentalement, c'est-à-dire « la théorie de Lamarck », la théorie de celui qui, le premier, a établi scientifiquement la transformation biologique des espèces.

► BARSANTI G., *Della storia naturale alla storia della natura. Saggio su Lamarck*, Milan, Feltrinelli, 1979. – BURKHARDT R. W. Jr., *The Spirit of System : Lamarck and Evolutionary Biology*, Cambridge/Londres, Harvard Univ. Press, 1977, rééd. 1995. – CORSI P., *The Age of Lamarck. Evolutionary Theories in France, 1790-1830*, Berkeley/Los Angeles/Londres, Univ. of California Press, 1988. – JABLONKA E. & LAMB M., *Epigenetic Inheritance and Evolution : The Lamarckian Dimension*, Oxford/New York, Oxford Univ. Press, 1995. – LAURENT G., *Paléontologie et Évolution en France, de Cuvier-Lamarck à Darwin, 1800-1860*, Paris, Éd. du Comité des Travaux historiques et scientifiques, 1987. – LA VERGATA A., *Néolamarckisme*, in *Dictionnaire du Darwinisme et de l'Évolution*, éd. P. Tort, Paris, PUF, 1996 ; Coll. : Lamarck et le Lamarckisme, Atti del Convegno, Napoli, 1-3 dicembre 1988, Napoli, La Città del Sole, 1995. – OMODEO P., « Centocinquante anni di evolucionismo », *Società*, 1983, vol. XV, p. 833-883. – Coll. : *Colloque international Lamarck*, éd. Schiller J., Paris, Blanchard, 1971. – *Jean-Baptiste Lamarck (1744-1829)*, Colloque international Lamarck, 1994, éd. G. Laurent, Paris, CTHS, 1997. – *Lamarck et son temps, Lamarck et notre temps*, colloque internat. dans le cadre du Centre d'Études et des recherches interdisciplinaires de Chantilly, Paris, Vrin, 1982.

Goulven LAURENT

→ Buffon ; Catastrophisme ; Cuvier ; Darwinisme ; Espèce ; Évolutionnisme ; Fossile ; Gaudry ; Gène ; Lamarck ; Lyell ; Monstre ; Roux ; Vivant (Théorie du).

LANGAGES FORMELS

LOGIQUE

Les deux courants par lesquels s'est développée la logique à la fin du siècle dernier : le courant algébriste et le courant formaliste, ont permis l'éclosion de plusieurs langages formels.

1) L'algébrisation de la logique a donné lieu, avec G. Boole notamment, à un calcul de la pensée. G. Boole doit beaucoup aux travaux de Sir Hamilton et de De Morgan, qui ont mis en place les notions de quantification du prédicat et d'univers de discours. La première de ces notions permet de mettre une proposition sous forme d'équation car sujet et prédicat ont désormais une extension ; la seconde trouve dans les écrits de Boole une notation symbolique : « 1 ». Boole a réussi à donner une détermination aux termes privés comme « non-homme » grâce au symbole : $1 - x$; x étant mis pour la classe associée au terme positif « homme ». Ainsi les opérations de la pensée peuvent être traduites par un système de signes où figurent notamment le signe de l'identité, des variables, des signes d'opération arithmétique tels que $+$, \times , $-$, signes auxquels Boole accorde des propriétés logiques, en particulier la propriété d'idempotence qui donne comme résultat du produit xx , la solution x . Il faut souligner l'interprétation que Boole donne des valeurs 1 et 0, désignant respectivement la classe universelle (Tout) et la classe nulle (rien). Ces valeurs consacrent le caractère purement extensionnel de l'algèbre de la logique. Dans le même esprit de prédominance de l'élément algébrique, mais sans réduction comme chez Boole de la logique à l'algèbre, on trouve chez Peirce une recherche d'un langage formel où les acquis booléens sont enrichis d'un raisonnement fondé sur les relations, autrement dit les prédicats non unaires, ceux donc qui comportent plus d'une place vide, les prédicats qui, contrairement à la tradition aristotélicienne, ne sont pas prédicatifs (dits pour signifier une propriété) mais relationnels (dits pour rendre compte des relations telles que les relations asymétriques, irréductibles aux propriétés).

2) La formalisation de la logique, commencée par Frege, a permis le développement des systèmes formels sur la base de langages formels contenant des quantificateurs, des lettres de variables, de constantes et de prédicats. Tout langage comprend une morphologie (des mots), une syntaxe (des expressions bien formées ; des suites d'expressions bien formées) et une sémantique (des correspondances avec les faits). Un système formel, c'est un langage formel associé à un ensemble d'axiomes et de règles de dérivation. On admet, par abus de langage, de ne pas distinguer entre langage formel et système formel. Le calcul propositionnel est un système formel, il permet le développement d'une logique élémentaire, il est une construction simple susceptible d'être enrichie, en ce sens il est la base de tous les systèmes classiques.

Le calcul propositionnel

On définit le langage \mathcal{A}_p par l'union de trois ensembles V , K et P , respectivement ensemble de variables propositionnelles (V), ensemble de connecteurs (K), ensemble de parenthèses (P). $\mathcal{A}_p = V \cup K \cup P$, où U est le symbole de l'union. V comprend des variables propositionnelles dites également atomes : p, q, r, s, t , etc. K comprend un connecteur unaire (relié à une seule proposition) et des connecteurs binaires (reliant deux propositions), K est composé des connecteurs (on dit également opérateurs) suivants : $\rightarrow, \vee, \wedge, \leftrightarrow$ qui sont des connecteurs binaires et \neg qui est un connecteur unaire. P comprend les deux parenthèses ouvrante et fermante notées respectivement ($(,)$).

Un mot ou une expression est une suite finie d'éléments de \mathcal{A}_p ; si on note M l'ensemble des mots, M peut comprendre des expressions telles que : $((p q ; pp ;$ qui ne sont pas des expressions bien formées. L'ensemble F des expressions bien formées (EBF) est un sous-ensemble de M ; F est le plus petit sous-ensemble de M tel que : 1) V est inclus dans F ; toute variable propositionnelle est une expression bien formée. 2) Si p appartient à F , $\neg p$ appartient à F . 3) Si p appartient à F , q appartient à F , alors $(p \times q)$ appartient à F , où \times désigne un des connecteurs binaires de l'ensemble K . Dans une expression bien formée, le nombre des parenthèses ouvrantes est égal au nombre des parenthèses fermantes.

Présentation des connecteurs

En logique formelle, on néglige les nuances de sens des termes « et », « ou », « si... alors » qui relient les propositions. Ces termes donnent naissance à une proposition moléculaire, c'est-à-dire une proposition composée de deux propositions atomiques ou variables propositionnelles. Dans la langue usuelle, la négation porte le plus souvent sur le verbe ; « il ne pleut pas », « 2 et 2 ne font pas 5 ». Dans le calcul propositionnel, elle est un connecteur même si elle ne relie pas deux propositions, car le mot connecteur est pris ici au sens d'opérateur non de relation. Le « et » relie deux propositions qui appartiennent à l'ensemble V ou à l'ensemble F . « Si "A" est une proposition proprement dite, énoncée sans être affirmée, et si elle n'est pas une question, s'il en va de même pour "B", alors "A et B" est encore une proposition proprement dite » (G. Frege, *Recherches logiques*, trad. fr. in *Écrits logiques et philosophiques*, Paris, Le Seuil, 1971, p. 217). En composant les propositions, on ne cherche pas à faire figurer des propriétés que possède la langue usuelle. On fait un choix de ces propriétés qui se justifie par la volonté de donner une théorie satisfaisante de l'inférence logique en mathématiques ; on ne décrit donc pas les raisonnements exprimés dans la langue de la conversation usuelle. Il faudrait pour cela des logiques qui intègrent d'autres valeurs que le vrai et le faux.

La sémantique du langage Λp

Une structure d'interprétation ou modèle consiste dans le fait d'attribuer des valeurs de vérité à des variables propositionnelles. Interpréter le langage Λp consiste à assigner aux éléments de cet ensemble un référent ou une valeur de vérité, soit le vrai, soit le faux, que l'on note respectivement aussi 1 et 0. On définit une distribution de valeurs de vérité d , comme une fonction qui va de l'ensemble V des variables propositionnelles à l'ensemble des valeurs de vérité comprenant la paire formée des éléments 0 et 1. $d : V \rightarrow \{0, 1\}$. Une tautologie est une formule toujours vraie : c'est une formule qui prend la valeur 1 quelle que soit la distribution de valeurs de vérité d .

Propriétés sémantiques des connecteurs

La négation. – Si A est vraie, non A est fausse, et si non A est vraie, A est fausse. Il faut savoir que la négation n'a aucun pouvoir de dissolution ici, nier une proposition ce n'est pas la dissoudre, c'est la qualifier ; la négation est un opérateur ou un foncteur propositionnel.

« A considérer la loi *duplex negatio affirmat*, on verra avec une particulière netteté que la négation n'a aucun pouvoir séparateur, résolusif ; je pars de la proposition : "le Mont Blanc est plus haut que le Broken", en y insérant "ne... pas", j'obtiens : "le Mont Blanc n'est pas plus haut que le Broken". On suppose que les deux propositions sont énoncées sans être affirmées. Une seconde négation produirait la proposition : "il n'est pas vrai que le Mont Blanc n'est pas plus haut que le Broken" » (G. Frege, *Recherches logiques*, op. cit., p. 202). Si nous reprenons notre application d , nous pouvons écrire ceci, $d(\neg p) = 1 - d(p)$, ceci se traduit aussi par la table de vérité suivante.

p	$\neg p$
1	0
0	1

La conjonction. – La conjonction de deux propositions est vraie si chacune des deux propositions est vraie, elle est fausse dans tous les autres cas. « A et B » a la même valeur de vérité que « B et A », ces deux expressions sont équivalentes, ce qui n'est pas le cas dans la langue usuelle ; la proposition « il a beaucoup bu et n'a pu dormir » n'est pas équivalente à « il n'a pu dormir et a beaucoup bu ». La conjonction de deux propositions se note : « $p \wedge q$ » et se lit : « p et q ». La table de vérité de la conjonction en langue formelle est la suivante :

p	q	$p \wedge q$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

La disjonction. – La langue usuelle donne à « ou » aussi bien le sens inclusif (un cas ou l'autre ou les deux) que le sens exclusif (un cas à l'exclusion d'un

autre). La logique ne retient que le sens inclusif : « On trouvera peut-être ici que le sens ici proposé pour le mot "ou" ne coïncide pas toujours avec l'usage. Je répondrai qu'en assignant le sens des expressions linguistiques, notre tâche n'est pas de rejoindre la langue d'usage ; celle-ci est le plus souvent inadaptée à des fins scientifiques où il est besoin d'une expression plus ajustée [...]. Les arrière-pensées que la langue d'usage éveille par résonance sont une gêne dans le domaine logique. Si l'on s'en tient à ce que nous avons dit de l'emploi de "ou", on peut en toute vérité affirmer "Frédéric le grand fut vainqueur à Rossbach ou deux est plus grand que trois" » (Frege, op. cit., p. 222).

La disjonction se note : $p \vee q$ et se lit : « p ou q ». La table de vérité de la disjonction est la suivante :

p	q	$p \vee q$
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Un système de connecteurs est complet s'il contient la négation et la conjonction $\{\neg, \wedge\}$, ou la négation et la disjonction $\{\neg, \vee\}$. Certes on peut prendre comme système l'ensemble formé des connecteurs de l'implication, de la négation, de la conjonction, de la disjonction, de l'équivalence ; mais il ne faut pas oublier qu'il y a une interdéfinissabilité des connecteurs ; qu'il est donc possible d'exprimer les uns par les autres les différents connecteurs en veillant à prendre comme base irréductible l'un des deux ensembles formés par la conjonction-négation ou disjonction-négation. M. Sheffer a formulé une condition d'incompatibilité entre propositions, dite barre de Sheffer ($A | B$) et qui suffit à donner un système complet de connecteurs : « C'est là une façon de procéder beaucoup plus simple que celle qui est utilisée dans les *Principia mathematica*, où l'on prend pour point de départ deux idées primitives, à savoir "et" et "non" » (B. Russell, *La philosophie de l'atomisme logique*, troisième conférence, trad. fr., PUF « Épiméthée », 1992, p. 370).

Langage-objet et métalangage

Le langage Λp que nous avons caractérisé est dit langage-objet, il est défini par l'union de l'ensemble des variables propositionnelles, de l'ensemble des connecteurs et de l'ensemble des parenthèses. Quand nous voulons parler de ce langage nous utilisons le langage ordinaire enrichi de quelques expressions mathématiques comme « est équivalent à », « non », « ou », « et », « si... alors », « si et seulement si », etc. ; ce langage est dit métalangage, il est utilisé pour rendre compte du langage-objet.

Enjeux philosophiques et mathématiques du calcul propositionnel et du calcul des prédicats

G.-G. Granger a montré comment le calcul propositionnel réalisait le « degré zéro de la relation d'une

forme à son contenu » (G.-G. Granger, *Formes, opérations, objets*, Paris, Vrin « Mathesis », 1994, p. 40). La non-spécification du contenu des propositions considérées comme des atomes susceptibles d'être vrais ou faux permet de dire que forme et contenu sont indiscernables. Cette même non-spécification fonde le caractère analytique du calcul propositionnel : « Serait analytique une connaissance exprimée dans un système symbolique complet et décidable » (*ibid.*, p. 42). On dit qu'un système formel est complet quand toute formule susceptible d'être démontrée dans le système est tautologique et inversement que toute tautologie est démontrable ; dit autrement : un théorème est une tautologie si en appliquant les axiomes de mon système, j'obtiens une tautologie, et inversement toute tautologie est un théorème. Il y a plusieurs systèmes d'axiomes possibles, selon le choix qui est fait des connecteurs primitifs. Les axiomes cependant ont tous la forme des formules suivantes, à l'interdéfinissabilité près :

- 1) $A \rightarrow (B \rightarrow A)$;
- 2) $(A \rightarrow (B \rightarrow C)) \rightarrow ((A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow C))$;
- 3) $(\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow ((\neg B \rightarrow A) \rightarrow \neg B)$

1, 2, 3 sont des schémas d'axiomes. Le troisième schéma d'axiomes est une forme de raisonnement par l'absurde.

Pour démontrer que toute tautologie est un théorème, autrement dit pour démontrer la partie difficile du théorème de complétude, on a souvent recours à la démonstration de L. Kalmar de 1934 qui permet de construire une tautologie comme un théorème à partir d'un système d'axiomes comprenant les trois axiomes mentionnés plus haut et la règle d'inférence dite *modus ponens* : de A et de $A \rightarrow B$, on a B . On peut alors s'aider du théorème de déduction de Herbrand (1930) ; théorème qui réside dans les propriétés syntaxiques d'introduction des connecteurs, et plus particulièrement de l'implication : si une formule G est déductible d'un ensemble de formules F et d'une formule F , alors $F \rightarrow G$ est déductible de F ; la réciproque est la règle du *modus ponens* : de G réduit à F et de $F \rightarrow G$ on peut détacher G .

Si le calcul propositionnel donne lieu à un système complet et décidable où forme et contenu sont interchangeables, le calcul des prédicats « nous ouvre un monde déterminé dans lequel on distingue des individus et leurs propriétés » (*ibid.*) et où la validité des formules va dépendre du « contenu que représente la structure du monde d'objets abstraits qu'[elles] supposent » (G.-G. Granger, op. cit., p. 42).

Le besoin d'un calcul des prédicats se fait sentir dès que nous cherchons en effet à donner des propriétés de telle ou telle chose, autrement dit dès lors que l'on ne se contente plus de l'indivisibilité des propositions de logique pure que sont les formules du calcul propositionnel. Si nous voulons donner une propriété des entiers naturels, si nous voulons restreindre une propriété à tel ou tel domaine, il apparaît vite qu'il faut quantifier, autrement dit utiliser la généralisation

universelle (quel que soit, noté \forall) ou la généralisation existentielle (il existe, noté \exists).

On peut mettre l'accent sur deux apports majeurs du langage formel issu du calcul des prédicats : 1) l'arité du prédicat et 2) la quantification.

1) La logique mathématique a permis l'expression des relations et rompu la limite de la logique traditionnelle d'allure aristotélicienne pour laquelle il n'y avait d'expression que prédicative : on savait exprimer une propriété d'un individu mais on ne parvenait pas à donner une expression satisfaisante de la relation qu'entretiennent deux individus entre eux ; que François soit plus petit que Jacques, ou que François soit à la gauche de Jacques ; nous avons là deux relations irréductibles à l'expression prédicative. Introduire l'arité d'un prédicat, autrement dit associer à un prédicat un entier naturel qui donne le nombre de places susceptibles d'être occupées par des variables, permet d'exprimer formellement des relations. Les prédicats peuvent donc être unaires ou binaires, ou n -aires, n étant l'entier naturel qui indique l'arité du prédicat.

2) La quantification est aussi un outil formel qui a permis de formaliser les propositions de façon bien plus satisfaisante que ne le faisait la catégorie de la quantité chez Aristote. On reconnaît à Peirce et à Frege le mérite d'avoir inauguré une théorie de la quantification. L'introduction de la généralité restreinte par Frege correspond au quantificateur existentiel (§ 12, de la *Begriffsschrift*, texte établi par I. Angelleli, Georg Olms, rééd., 1993, p. 23), et celle de la généralité non restreinte au quantificateur universel (§ 11). Ces deux quantificateurs sont présentés par Peirce ainsi : « Le quantificateur universel [...] permet de choisir dans l'univers un objet quelconque – peu importe lequel – et le quantificateur particulier [...] prescrit qu'un objet approprié doit être choisi » (cité par Ch. Chauviré, in *Peirce et la signification*, Paris, PUF, 1995, p. 232).

Ces deux acquis (quantification et relation) permettent de construire un calcul de prédicats du premier ordre pour lequel de nombreux langages formels peuvent être définis. Notons qu'un langage Λ du premier ordre est constitué d'un alphabet comprenant un ensemble dénombrable de symboles de variables ; un ensemble de symboles de constantes, un ensemble de symboles de relations à n places (n -aire) ; un ensemble de quantificateurs $\{\forall, \exists\}$; un ensemble de connecteurs (la négation et la conjonction par exemple), un ensemble de parenthèses, comprenant une parenthèse ouvrante et une parenthèse fermante $\{(,)\}$. Pour tout langage choisi, on définit : 1) Un mot comme une suite finie de lettres de l'alphabet ; 2) Les termes du langage comme pouvant être soit des variables, soit des constantes, soit des suites finies de termes interprétés par des fonctions, notées $f(t_1, \dots, t_n)$. Il faut noter que les symboles de relation ne sont pas les symboles de fonction : les symboles de fonction reliés à des termes ne donnent pas lieu à une proposition mais à un autre terme ; les symboles de relation reliés à des termes donnent lieu, en revanche, à une proposition. Exemple de symbole de fonction : l'addition, $2 + 2 = 4$; 4 est

un nouveau terme, mais ce n'est pas une proposition ; exemple de relation : « inférieur à », « 2 est inférieur à 4 » est une proposition, non un terme. 3) Par récurrence, les expressions bien formées (EBF) ou formules : 1) $R(t_1, \dots, t_n)$ est une formule appelée atome, où R est un symbole de relation n -aire et t_1, \dots, t_n des termes ; 2) si A est une formule, alors $\forall xA$ et $\exists xA$ sont des formules ; 3) Si A et B sont des formules, $\neg A$ est une formule et $A * B$ est une formule où $*$ désigne un connecteur binaire ; 4) Par close de fermeture, toute formule est obtenue à partir d'une itération finie de 1, 2, 3.

On définit également par récurrence ce qu'est une variable libre : a) dans un atome $P(x_1, \dots, x_n)$ toutes les variables sont libres ; b) les variables libres de $\neg A$ sont celles de A ; c) les variables libres de $A * B$ sont les variables libres de A et les variables libres de B ; d) $\forall xA(x)$ est liée, et les autres variables libres de A sont libres dans $\forall xA$. Une formule close est une formule dont aucune variable n'est libre. Les formules closes sont à la base de la définition de ce qu'on appelle en logique une théorie : une théorie T est un ensemble de formules closes. Pour construire une preuve dans le langage Λ il suffit de se donner des axiomes et des règles : une dérivation formelle ou preuve est alors obtenue par application des règles d'inférence et position d'axiomes jusqu'à détacher (par *modus ponens*) la preuve voulue.

Il s'agit maintenant de mettre en place un système formel qui permette de construire de telles démonstrations. Les éléments de base en sont les axiomes et les règles. On travaille relativement à un langage Λ fixé, mais ce langage est quelconque, nous n'en privilégions pas un en particulier ; nous en fixons un seulement.

Axiomes et règles

i) Une formule est une instance de tautologie, si elle est obtenue à partir d'une tautologie en remplaçant chaque lettre de proposition par une formule. Nous nous donnons ainsi 5 axiomes du calcul propositionnel. ii) Une généralisation d'une formule j est une formule de la forme $\forall x_1, \dots, \forall x_n j$, où x_1, \dots, x_n sont des variables quelconques et n un entier naturel.

Axiomes. — Pour toutes formules j, y, q , on a les 9 schémas d'axiomes suivants :

- A1 $j \rightarrow (y \rightarrow j)$
- A2 $(j \rightarrow (y \rightarrow q)) \rightarrow ((j \rightarrow y) \rightarrow (j \rightarrow q))$
- A3 $(\neg j \rightarrow y) \rightarrow ((\neg j \rightarrow \neg y) \rightarrow j)$
- A4 a. $j \wedge y \rightarrow j$ A4b. $j \wedge y \rightarrow y$
- A5 $j \rightarrow (y \rightarrow j \wedge y)$
- A6 $\forall xj(x) \rightarrow j(t/x)$ où t est un terme substituable à toute occurrence libre de x dans j .
- A7 $\forall x(j \rightarrow y) \rightarrow (j \rightarrow \forall xy)$ où x n'a pas d'occurrence libre dans j .
- A8 $\forall x(x \wedge x)$
- A9 $(x \vee y) \rightarrow (j \rightarrow j')$ où j est une formule atomique et j' obtenue à partir de j en remplaçant certaines occurrences de x par y .

i) L'exigence première concernant les axiomes est qu'il s'agisse de vérités, c'est-à-dire de formules valides. On peut le vérifier par simplification, réduction à une tautologie ou méthode des arbres de Beth. ii) L'ensemble A des axiomes (A1...A9) est infini. Cependant il est « récursif », c'est-à-dire qu'il existe une procédure mécanique permettant de décider si une formule donnée est ou non un axiome.

Règles. — i) Pour deux formules j et y quelconques, on a les deux règles suivantes :

R1 : (*modus ponens*) de j et de $j \rightarrow y$ on peut déduire y .

R2 : (généralisation) de j on peut déduire $\forall xj$ où j est une variable quelconque qui n'a pas d'occurrence libre dans j .

La théorie de la démonstration repose sur de tels procédés. La théorie des modèles dont on va donner un rapide aperçu conduit aux mêmes résultats dans le calcul propositionnel et le calcul des prédicats du premier ordre que la théorie de la démonstration : l'ensemble des formules valides dans une interprétation donnée et l'ensemble des démonstrations obtenues dans un système formel sont les mêmes. K. Gödel a pu démontrer le théorème de complétude en 1930 ; ce théorème permet de passer d'une déduction syntaxique à une déduction sémantique et vice versa ; autrement dit, être vraie dans un modèle M pour une formule F est équivalent à être déductible d'une théorie T . La démonstration est double : dans un sens, elle se fait par récurrence sur la formule F ; dans l'autre sens, elle se fait par usage du théorème de L. Henkin (1947) qui dit que toute théorie T syntaxiquement complète (c'est-à-dire qui est cohérente et pour laquelle toute formule close F est soit déductible d'elle, soit sa négation l'est) qui admet des témoins de Henkin a un modèle. L'intérêt des témoins de Henkin réside dans l'élimination des quantificateurs et dans la possibilité de se ramener ainsi à un calcul propositionnel : avoir des témoins de Henkin pour une théorie, c'est posséder pour le langage, qui est associé à la théorie, un symbole de constante c tel que pour toute formule F à une variable libre x , on ait : $\exists xF(x) \rightarrow F(c) \in T$.

Parler de théorie des modèles, c'est engager une réflexion sur la satisfaction des formules dans une interprétation donnée. Une interprétation I est un triplet (B, j, Q) où B est domaine d'individus ou ensemble de base non vide ; j une application qui à tout symbole de prédicat associe un sous-ensemble de B et Q une application qui associe à tout symbole de constante son interprétation dans le domaine. Munis d'une assignation ψ , c'est-à-dire d'une application de l'ensemble des variables d'individus dans B , nous pouvons voir si une formule donnée est satisfaite ou non, autrement dit donner ses conditions de vérité. Une interprétation I est modèle pour une formule A si la valeur de la formule A par l'assignation ψ dans cette interprétation I est vraie. Grâce à la théorie des modèles, nous avons ainsi une sémantique pour notre langage.

Quelques exemples de langages formels

Le langage de la théorie des ensembles (*Lens*) et le langage de l'arithmétique (*Lar*) sont deux exemples types de langages formels associés au calcul des prédicats.

Pour *Lens*, on peut donc écrire les axiomes dans un langage du premier ordre contenant deux symboles de relation binaire : $=$ (l'égalité) et \in (l'appartenance). Une théorie axiomatique des ensembles consistera donc en un ensemble d'axiomes, au nombre de 7 (c'est l'axiomatique de Zermelo-Fraenkel). Avant de le présenter, rappelons que ce système évite soigneusement le paradoxe de B. Russell, paradoxe selon lequel la classe des ensembles qui ne s'appartiennent pas ne peut pas elle-même, sous peine de paradoxe, être considérée comme un ensemble ; autrement dit cette classe est trop vaste et menace ainsi toute cohérence : il ne faut pas parler d'ensemble quand il s'agit de collections trop grandes. La découverte de Russell montre les dangers d'une conception intuitive des ensembles et ouvre la voie à une recherche axiomatique qui sera faite par Zermelo (1899). Tous les axiomes que nous allons présenter évitent les collections vastes qui succombent au paradoxe : 1) L'axiome d'extensionnalité (les ensembles ayant les mêmes éléments sont égaux), cet axiome donne la connexion entre l'usage de l'égalité et celui de l'appartenance dans notre théorie formelle. 2) L'axiome schéma de compréhension (il y a un ensemble formé des éléments qui vérifient une formule du langage), ainsi au lieu de rassembler tous les ensembles qui ont quelque propriété (ce qui mène directement au paradoxe de Russell), on commence par se donner un ensemble puis on rassemble les éléments de cet ensemble — et seulement eux — qui ont la propriété en question. 3) L'axiome de la paire (étant donné deux ensembles, il y a un ensemble qui les contient comme seuls éléments). 4) L'axiome de l'union (étant donné une collection d'ensembles, il y a un ensemble dont les éléments sont ceux qui appartiennent aux éléments de la collection). 5) L'axiome des parties (pour chaque ensemble E il y a un ensemble unique P dont les éléments sont les parties de E). 6) L'axiome de l'infini (il y a au moins un ensemble inductif, c'est-à-dire un ensemble dont les éléments ont des successeurs qui sont aussi éléments de l'ensemble), de cet axiome qui affirme l'existence d'au moins un ensemble et de l'axiome 2, on déduit qu'il existe un ensemble vide, c'est-à-dire un ensemble tel que chacun de ses éléments est différent de lui-même ($x \neq x$). 7) L'axiome de remplacement (si on remplace un ensemble par son image par une fonction, on obtient encore un ensemble) ; cet axiome nous dit à sa manière que toute collection d'ensembles qui n'est pas trop grande est encore un ensemble. 8) L'axiome de fondation (tout ensemble non vide a un plus petit élément pour l'appartenance) évite à son tour qu'un ensemble puisse s'appartenir à lui-même car si un ensemble possède un plus petit élément, alors on ne peut indéfiniment écrire sous forme d'une chaîne descendante

infinie $x \in x$. 9) L'axiome de choix qui me dit que si j'ai un ensemble d'ensembles non vides, alors je peux choisir chaque membre de chaque ensemble de cette collection et rassembler les éléments choisis dans un ensemble. Comme les fonctions de choix ne sont pas spécifiées, certains considèrent que nous construisons plus concrètement les ensembles avec les autres axiomes, c'est-à-dire les 8 premiers donnés qui sont les axiomes dits ZF (Zermelo-Fraenkel). Pour notre sujet, il importe de noter que ces 9 axiomes permettent de développer de façon opératoire le langage ensembliste comme un langage formel susceptible de donner les propriétés de ces objets mathématiques que nous nommons « ensembles ».

De même pour l'arithmétique, il existe un langage formel reposant sur le calcul des prédicats avec égalité. Ce langage comprend le symbole de constante 0, la relation « successeur », les deux symboles de relation binaire, qui, une fois interprétés, correspondent à l'addition et à la multiplication, la relation d'égalité. Cinq axiomes dus à G. Peano (1899) en donnent une axiomatique : 1) zéro est un nombre ; 2) le successeur de zéro est un nombre ; 3) deux nombres différents ont des successeurs différents ; 4) zéro n'est le successeur d'aucun nombre ou encore tout élément différent de zéro a un prédécesseur ; 5) le principe d'induction mathématique, dit aussi principe de récurrence, qui est un schéma d'axiomes (autant d'axiomes que de formules à variable libre) selon lequel si une propriété appartient à zéro et si, appartenant à un nombre quelconque, elle appartient à son successeur, alors elle appartient à tous les nombres. Ce système d'axiomes a comme modèle l'ensemble des entiers naturels associé à la relation successeur et au symbole 0.

Dedekind espérait qu'avec tous les axiomes de G. Peano on pouvait déduire tous les théorèmes arithmétiques.

Appelons la théorie P1, celle qui est définie sur le langage $\Lambda = \{=, 0, S, +, \cdot\}$ par :

- 1) $\forall x \forall y ((Sx = Sy) \rightarrow x = y)$
- 2) $\forall x (Sx \neq 0)$
- 3) j formule $[j(0) \wedge (\forall x(j(x) \rightarrow j(Sx)))] \rightarrow \forall xj(x)$
- 4) $\forall x(x + 0 = x)$
- 5) $\forall x \forall y (Sx + Sy = Sx + y)$
- 6) $\forall x(x \cdot 0 = 0)$
- 7) $\forall x \forall y (x \cdot Sy = x \cdot y + x)$

Deux remarques

1) Les axiomes 6 et 7 donnent le comportement de $=$ (égal) et de \times (multiplié). 2) L'axiomatisation est infinie car on a un axiome pour chaque formule de j (le 3 est donc un schéma d'axiomes). Gödel a montré que la théorie qui comprend les axiomes de Peano est incomplète : il y a des énoncés tels qu'on ne peut démontrer ni j ni $\neg j$. Il a montré qu'il n'y avait aucun espoir d'axiomatiser complètement l'arithmétique. Deux théorèmes sont énoncés par lui : 1) Toute théorie axiomatisable même rudimentaire est incomplète (premier théorème d'incomplétude). 2) Toute théorie

axiomatisable ne permet pas de prouver sa propre cohérence (second théorème d'incomplétude). Conséquence : si on prend une théorie cohérente du premier ordre qui est axiomatisable dans laquelle on peut définir l'addition et la multiplication, cette théorie est incomplète : il y a des théorèmes vrais dans N qu'on ne pourra pas démontrer. Vrai n'est donc pas synonyme de démontrable.

Dans la mesure où la théorie des ensembles – qui fut notre premier exemple de langage formel – contient l'arithmétique, le théorème d'incomplétude vaut également pour elle. Mais en l'absence de démonstration de cohérence absolue, il est possible de définir une cohérence ou consistance relative (Si ZF est consistant, alors ZF + l'axiome de fondation est consistant).

► BLANCHÉ R., *Introduction à la logique contemporaine*, Paris, A. Colin « U2 » ; *La logique et son histoire*, Paris, A. Colin « U », 1970. – CORI R. & LASCAR D., *Logique mathématique*, I et II, Paris, Masson, 1993. – ENDERTON H.B., *A mathematical introduction to logic*, New York, Academic Press, 1972. – FREGE G., *Begriffsschrift*, Hildesheim, G. Olms, 1879, 1993. – HEIJENOOT J. VAN, *From Frege to Gödel*, Harvard Univ. Press, 1967. – KLEENE S.C., *Logique mathématique*, Paris, A. Colin « U », 1971. – LARGEAL J., *Logique mathématique*, Paris, A. Colin, 1972 (textes). – NAGEL E. & NEWMAN J.R., *Gödel's proof*, New York, New York Univ. Press, 1958. – QUINE W.V.O., *Logique élémentaire*, trad. fr., Paris, A. Colin, 1972 ; *Méthodes de logique*, trad. fr., Paris, A. Colin « U », 1973. – RIVENC F., *Introduction à la logique*, Paris, Petite bibliothèque Payot, 1989. – RUSSELL B., *Logic and Knowledge*, 1901-1950, éd. R.C. Marsh, New York, G.P. Putnam's Books, 1956. – RUYER B., *Logique*, Paris, PUF, 1990. – SCHOLTZ H., *Esquisse d'une histoire de la logique*, trad. fr., Paris, Aubier-Montaigne, 1968. – SMULLYAN R., *First Order Logic*, Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 1968. – TARSKI A., *Logique, sémantique, métamathématique* (1923-1944), trad. fr., Paris, A. Colin, 1972, 1974, t. I et II. – WITTGENSTEIN L., *Tractatus logicophilosophicus*, trad. fr., Paris, Gallimard « Idées », 1961.

Ali BENMAKHOULOUF

→ Axiomatisation et formalisation ; Computation ; Forme ; Frege ; Peirce ; Proposition ; Russell ; Wittgenstein et le positivisme logique.

LANGEVIN Paul, 1872-1946

Physicien français. Formé à l'École de physique et de chimie de Paris (EMPC), puis à l'École normale supérieure, Langevin devient professeur au Collège de France et directeur de l'EMPC. Langevin soutient une thèse sur les gaz ionisés (1902), après un stage au Cavendish Laboratory à Cambridge, puis travaille sur la théorie cinétique, et surtout sur le magnétisme. Dans toutes ses recherches, Langevin intègre la découverte récente des électrons et suggère, dès 1904, une relation entre la masse et l'énergie. Ensuite, il diffuse la théorie de la relativité en France ; il enseigne également les théories atomistes puis quantiques, et préside les Conseils de physique Solvay à partir de 1928. À l'esprit physicien Langevin allie une formation

d'ingénieur qu'il met à profit pendant la Première Guerre mondiale pour construire un détecteur à ultrasons, ancêtre du sonar et de l'échographie, utilisant la piézo-électricité du quartz découverte par Pierre et Jacques Curie. Entre les deux guerres, Langevin milite activement pour la paix et pour l'éducation nouvelle dans divers organismes (Ligue des droits de l'homme, Comité Amsterdam-Pleyel, Comité de vigilance des intellectuels anti-fascistes). Après avoir été emprisonné puis assigné en résidence surveillée à Troyes de 1940 à 1944, Langevin préside, avec le psychologue Henri Wallon, une Commission de réforme de l'enseignement, où il tente de concrétiser son idéal de la culture, contrepoint nécessaire à la formation professionnelle.

● *Œuvres scientifiques*, Paris, Éd. CNRS, 1950. – *La Pensée et l'action*, textes recueillis par P. Labrenne, Paris, Éd. Sociales, 1964.

► BENSUADE-VINCENT B., *Paul Langevin Science et Vigilance*, Paris, Belin, 1987. – BIQUARD P., *Paul Langevin, scientifique, éducateur, citoyen*, Paris, Seghers, 1969. – LANGEVIN A., *Paul Langevin, mon père*, Paris, Éditeurs scientifiques réunis, 1971.

Bernadette BENSUADE-VINCENT

→ Electrochimie ; Électron.

LAPLACE Pierre-Simon, 1749-1827

Pierre-Simon Laplace a été un des plus importants mathématiciens de la fin du XVIII^e s. et l'un des personnalités scientifiques les plus puissantes et influentes pendant la période de la Révolution française, de l'Empire et de la Restauration.

Les vingt premières années de cette carrière (de 1768 à 1789) constituent une période de formation et d'ascension du jeune savant. Laplace publie un grand nombre de mémoires divers sur le calcul intégral, l'astronomie, la cosmologie, la théorie des jeux. En analyse, il obtient déjà des résultats importants et forge les techniques mathématiques qu'il privilégiera toute sa vie. Laplace exprime ce qui constituera le socle philosophique de son œuvre – ce qu'on appellera plus tard le « déterminisme laplacien » –, et élabore les grandes lignes d'un programme de recherches dans les deux domaines qui resteront ses domaines de prédilection : les probabilités et la mécanique céleste.

Pendant la période révolutionnaire et notamment celle du Directoire, la carrière de Laplace est à son zénith. Il publie une grande série de mémoires, puis en 1796 un ouvrage de haute vulgarisation l'*Exposition du Système du Monde* où se trouvent expliquées, sans formules, toutes les connaissances astronomiques du temps ; entre 1799 et 1805 paraissent les quatre premiers tomes de son monumental *Traité de la Mécanique céleste*. La renommée du savant est alors considérable, il est couramment appelé le « Newton de la France ». Investi de nombreuses charges et

responsabilités, Laplace joue le rôle de représentant officiel de la science auprès du pouvoir. Il prend part à l'organisation de l'École normale et de l'École polytechnique.

Dans la dernière partie de sa vie, de 1805 à 1827, Laplace revient aux probabilités ; il achève la *Théorie analytique des probabilités* en 1812 et publie l'*Essai philosophique sur les probabilités*, un ouvrage de diffusion des connaissances qui accompagne l'ouvrage technique. Par ailleurs, il investit ce qui sera son troisième champ d'intérêt, la physique. À partir de la Société d'Arcueil et de sa collaboration avec Berthollet, Laplace donne le coup d'envoi au mouvement historique de la mathématisation de nombreuses disciplines restées jusque-là lieu de spéculations plutôt qualitatives et métaphysiques. Il aborde les domaines de la capillarité, de la théorie de la chaleur, de l'optique corpusculaire, du son, etc. La dernière partie du tome IV de la *Mécanique céleste* et le tome V, qui paraissent entre 1823 et 1825, regroupent ces travaux. Si cette école de physique de Laplace possède aujourd'hui assez mauvaise réputation, elle a eu néanmoins une influence décisive sur la physique mathématique française au XIX^e s.

► DAHAN DALMEDICO A., *Mathématisations. A.-L. Cauchy et l'École française*, Paris, Libr. Blanchard, 1992. – DAHAN DALMEDICO A., CHABERT J.-L. & CHELMA K. éd., « Le déterminisme de Pierre-Simon Laplace et le déterminisme aujourd'hui », *Chaos et Déterminisme*, Paris, Le Seuil, 1992. – GILLISPIE C., « Laplace », *Dictionary of scientific Biography*, t. XV.

Amy DAHAN DALMEDICO

→ Chaos et déterminisme ; Déterminisme ; Éther ; Marées ; Probabilité [Logique] ; Progrès ; Réel ; Trou noir.

LAUE Max Theodor Felix VON, 1879-1960

Physicien allemand. Max Theodor Felix von Laue est né à Pfaffendorf et mort à Berlin. Von Laue a contribué à plusieurs domaines de la physique, et a été un des pionniers de la cristallographie à rayons X. Formé aux universités de Strasbourg et de Göttingen, von Laue reçoit son doctorat en 1903, à Berlin. Ce sont les cours de Planck sur les théories nouvelles d'Einstein qui poussent von Laue à s'intéresser à la relativité, dont il écrit le premier traitement exhaustif. En 1909, il se rend à l'Institut de physique théorique, à Berlin, institution dirigée par Sommerfeld. C'est là, en 1912, qu'il commence des recherches dans le domaine des rayons X, dont la nature était demeurée obscure depuis leur découverte en 1895 par Roentgen. Si, comme le soupçonnent von Laue et d'autres, les rayons X sont des ondes électromagnétiques, leur longueur d'onde serait trop petite pour être détectée à l'aide des grilles de diffraction usuelles. C'est alors que von Laue suggère que la structure régulière des cristaux (non confirmée par ailleurs) pourrait servir de grille suffisamment petite pour permettre la diffraction des rayons X. En projetant des rayons X au travers d'un

cristal de sulfure de zinc sur une plaque photographique, von Laue obtient des diagrammes ordonnés qui, après analyse mathématique, révèlent la longueur d'onde précise des rayons X. Cette expérience confirme que les rayons X sont bien des ondes électromagnétiques. Dès lors, en se servant de rayons X de longueur d'onde connue on peut déterminer la structure inconnue de certains cristaux. Pour ces travaux, von Laue reçoit le prix Nobel de physique en 1914. Pendant les années 1930, il s'oppose à l'hostilité des nazis à l'égard de la physique relativiste en défendant des physiciens persécutés, en particulier Albert Einstein. Après la Seconde Guerre mondiale, von Laue a joué un rôle important dans la restructuration des institutions scientifiques allemandes.

● *Gesammelte Schriften und Vorträge*, Brunswick, 3 vol., 1961 (avec autobiogr.).

► FRISCH O.R. et al., *Trends in Atomic Physics : Essays dedicated to Lise Meitner, Otto Hahn, Max von Laue on the Occasion of their 80th Birthday*, New York, Interscience, 1969. – ROSENTHAL-SCHNEIDER I., *Reality and Scientific Truth : Discussions with Einstein, von Laue, and Planck*, Detroit, Wayne State Univ. Press, 1980. – WHEATON B.R., « Impulse X-Rays and radiant intensity : The double edge of analogy », *Historical Studies in the Physical Sciences*, 11, 1981, 367-390.

John TRESCH et Simon WERRETT

→ Cristal ; Groupes et symétrie ; Propagation ; Stéréochimie.

LAVOISIER Antoine-Laurent DE, 1743-1794

Celui que l'on appelle « le fondateur de la chimie moderne » eut en réalité une carrière polymorphe. Formé comme avocat, il devient fermier général en 1768 et commissaire à la Régie des poudres et des salpêtres, en 1775. Il épouse Marie-Anne Paulze, fille d'un fermier général, qui l'assistera dans ses travaux de chimie. Entré à l'Académie royale des sciences de Paris à l'âge de 25 ans, il participe au développement de la chimie des gaz. Lavoisier n'a découvert aucun élément nouveau mais a interprété les découvertes de ses contemporains et réorganisé la théorie chimique autour de l'oxygène considéré comme principe de combustion et d'acidité. Ce changement, qui condamne le phlogistique, Lavoisier le nomme lui-même « révolution ». Il établit que l'air est un mélange, l'eau un corps composé et que tous les corps peuvent être mis à l'état gazeux par combinaison avec le calorique. Dans ses expériences, Lavoisier privilégie les aspects quantitatifs et développe les instruments de précision (balance, aréomètre, gazomètre, calorimètre). Il influence fortement la réforme de la nomenclature et publie en 1789 un *Traité élémentaire de chimie*. Il écrit plusieurs mémoires d'économie, fait des propositions pour réformer la fiscalité, alléger l'intervention de l'État, moderniser l'agriculture, améliorer l'hygiène dans les hôpitaux et les prisons. Savant et administrateur du royaume, Lavoisier a le profil caractéristique

d'un homme des Lumières. Le 19 floréal An II (8 mai 1794), Lavoisier, âgé de 51 ans, est guillotiné sur la place de la Révolution en compagnie de vingt-sept premiers généraux après une parodie de procès le matin.

► BENSUADE-VINCENT B., *Lavoisier, mémoires d'une révolution*, Paris, Flammarion, 1993. – GRIMAUX É., *Lavoisier, 1743-1794*, Paris, 1888, réimpr., Paris, Jacques Gabay, 1992. – POIRIER J.-P., *Lavoisier, 1743-1794*, Paris, Pygmalion, 1993.

Bernadette BENSUADE-VINCENT

→ Acide et base ; Élément ; Gaz ; Liaison ; Matière ; Nomenclature ; Phlogistique ; Sel ; Symbole ; Travail.

LEIBNIZ Gottfried Wilhelm, 1646-1716

Philosophe, juriste, théologien, il participe aux discussions qui entourent l'élaboration de la physique moderne dès 1671 avec la publication de la *Theoria motus abstracti* (*Théorie du mouvement abstrait*) et *Hypothesis physica nova : theoria motus concreti* (*Nouvelle hypothèse physique : théorie du mouvement concret*). Au cours d'une mission diplomatique à Paris pour le compte de l'Électeur de Mayence, dont il est le conseiller, il peut avoir accès aux manuscrits de Pascal. Christiaan Huygens le guide dans son apprentissage des mathématiques contemporaines. Durant ce séjour, il mène à bien ses premières études sur la machine à calculer et s'avance vers la découverte du calcul infinitésimal. Fin 1676, il devient le bibliothécaire et conseiller aulique du duc de Hanovre. Il entretient une immense correspondance avec toute l'Europe savante. Il manifeste dès 1678 son intérêt pour les questions de technologie à propos du drainage des mines de Harz.

Son œuvre scientifique s'élabore au fil de sa correspondance et de la publication d'articles dans les *Acta eruditorum* de Leipzig. Il expose l'algorithme infinitésimal dans la *Nova methodus pro maximis et minimis* (1684) et sa dynamique qui repose sur la formulation du principe de conservation de la force vive dans la *Brevis demonstratio erroris memorabilis cartesiani* (1686). Il expose la première version de son système dans le *Discours de métaphysique* (1686) qui reste inédit, mais suscite une importante correspondance avec Arnauld. Leibniz face à Descartes joue le rival heureux. Il ne lui ménage pas ses critiques : sa méthode manque de précision, sa géométrie est trop bornée, sa mécanique comporte une « erreur mémorable », sa physique mécaniste ignore les forces, et sa métaphysique ne s'élève pas jusqu'aux forces primitives ou entéléchies dont dérivent les forces physiques.

Après 1687, et la publication par Newton des *Principia mathematica philosophiae naturalis*, c'est au système de ce dernier que va se mesurer Leibniz. Il rédige en 1689-1690 son manuscrit *Dynamica de potentia* et l'*Essai de dynamique*. Les *Animadversiones in partem generalem Principiorum cartesianorum* (1692) et le *Specimen dynamicum*, qui paraît en 1695, préparent l'élaboration de la deuxième version de son système

qui se déploie notamment dans *Système nouveau de la nature et de la communication des substances* (1695) : la forme-force primitive des entéléchies se trouve analogiquement rapprochée du sentiment et de l'appétit. Par la théorie de l'harmonie préétablie, il étend le rapport âme-corps à toutes substances finies. De là un retour sur les questions de la théorie de la connaissance par une discussion serrée de l'*Essai sur l'entendement humain* du philosophe ami de Newton, John Locke, qui meurt en 1704. Les *Nouveaux essais sur l'entendement humain* rédigés en 1704 ne seront publiés qu'en 1765. Dans les *Essais de théodicée*, Leibniz tire les conséquences de la métaphysique qu'il élabore ainsi quant à la conception de la liberté humaine et au problème du mal. Sa pensée se déploie en réponse aux paradoxes soulevés sur ce point par Bayle.

La troisième et dernière version de son système se trouve exposée dans deux écrits posthumes : les *Principes de la nature et de la grâce fondés en raison* (1714, publié en 1740) et, surtout, la même année, les *Principes de la philosophie ou Monadologie*, qui ne sera publié qu'en 1840.

La correspondance de Leibniz avec Clarke (1715-1716), porte-parole de Newton, publiée en 1717, a grandement contribué à inscrire la pensée de Leibniz dans les débats scientifiques de son temps. Comme les cartésiens, Leibniz refuse la notion d'action immédiate à distance remise en honneur par Newton. Il la tient pour un retour aux forces occultes et une sorte de défi aux idées claires et distinctes. Sur la question de l'espace et du temps, Leibniz défend contre Newton une théorie intellectualiste finalement proche de celle qu'esquissait le Descartes de la *Géométrie* ainsi que dans l'idéal de la *Mathesis pura atque abstracta* qu'invoque la Cinquième Méditation qui ramène les images spatiales à des relations intellectuelles. Ferrailant contre « ceux qui prennent l'espace pour une substance », Leibniz considère que l'étendue se réduit à un système de relations entre les choses créées. C'est la thèse à laquelle s'en prendra Kant dans l'Esthétique transcendantale au nom d'une nouvelle interprétation des implications épistémologiques de la science newtonienne.

Leibniz représente une figure majeure de l'histoire et de la philosophie des sciences. Une virulente controverse a opposé Leibniz et ses disciples à Newton et aux newtoniens au sujet de l'invention du calcul infinitésimal. Chacun en revendiquant la priorité. On sait aujourd'hui que leurs travaux furent indépendants, et que Leibniz n'a nullement plagié Newton. On s'accorde à reconnaître qu'il a, le premier, rendu public le nouvel algorithme et inventé sa symbolique opératoire. Les grands développements de l'analyse au XVIII^e s. (les Bernoulli et Euler) lui devront beaucoup.

De la contribution de Leibniz à l'histoire de la physique, le XIX^e s. retiendra la critique des notions newtoniennes d'espace et de temps absolus. Dans un premier temps, la Naturphilosophie allemande remettra sa pensée en honneur pour sa critique du « mécanisme » de la science newtonienne ; Ernst Mach et ses disciples

le célébreront pour son refus de l'espace et du temps absolus. De son œuvre, les positivistes logiques célébreront sa « quête d'un langage idéal » et « ses efforts pour réformer la logique ». Le *Manifeste* du Cercle de Vienne (1929) lui rend hommage pour avoir avancé « l'idée de maîtriser le réel en augmentant la précision des concepts et des procédés de déduction, et d'atteindre cette précision par un symbolisme conçu sur le modèle mathématique ». Le livre qu'a consacré Bertrand Russell à sa philosophie va dans le même sens, de même que celui de Louis Couturat sur la logique.

À ses contributions directes ou indirectes aux mathématiques, à la logique et aux sciences physiques, il faudrait ajouter celle qu'il a apportée à la théorie du vivant. Sa critique de la rigidité des modèles iatromécanistes alors dominants l'amène à définir un nouveau concept d'organisme, comme machine de la nature irréductible à des machines de fabrication humaine. Une entéléchie dominante commande l'intégration organique. Leibniz se rallie aux thèses préformationnistes sur la génération des animaux.

► BELAVAL Y., *Leibniz, initiation à sa philosophie*, Paris, Vrin, 1960 ; *Leibniz, critique de Descartes*, Paris, Gallimard, 1960 ; *Études Leibniziennes*, Paris, Gallimard, 1976. – CARAUD V., *Causa sive ratio : La Raison de la cause de Suarez à Leibniz*, Paris, PUF, 2002. – COUTURAT L., *La logique de Leibniz*, Paris, Alcan, 1901. – DUCHESNEAU F., *Leibniz et la méthode de la science*, Paris, PUF, 1993 ; *La dynamique de Leibniz*, 1994. – FICHANT M., *Science et métaphysique dans Descartes et Leibniz*, Paris, PUF, 1998. – FRÉMONT C., *Singularités. Individus et relations dans le système de Leibniz*, Paris, Vrin, 2003. – GRUA G. & GUEROULET M., *Leibniz. Dynamique et métaphysique*, Paris, Aubier-Montaigne, 1967. – RUSSELL B., *La philosophie de Leibniz*, trad. fr., Paris, Alcan, 1908.

Dominique LECOURT

→ Analogie ; Analyse et synthèse ; A priori ; Automate ; Axiomatisme et formalisation ; Cartésianisme ; Causalité classique ; Couturat ; Démonstration ; Déterminisme ; Équation ; Évidence ; Évolutionnisme ; Forme ; Fossile ; Génération spontanée ; Idéalisme ; Indiscernabilité ; Infini ; Infini mathématique ; Logique et informatique ; Méthode ; Mouvement ; Naturphilosophie ; Nécessité ; Newton ; Origines de la vie ; Preuve ; Rationalisme ; Technique ; Terre ; Topologie ; Travail ; Vérité ; Virtuel ; Vitalisme et mécanisme.

LÉONARDO DE VINCI, 1452-1519

Leonardo fut pour ses contemporains un artisan et un artiste incomparable. Il travailla pour des princes comme ingénieur faisant creuser des canaux ou des douves, comme artiste faisant connaître leur puissance ; en retour, il fut considéré comme le plus grand peintre de son temps. Mais pour nous, Vinci est l'auteur d'un nombre considérable d'essais scientifiques, de dessins géométriques, mécaniques ou anatomiques qui restèrent ignorés jusqu'à la fin du XIX^e s., à l'exception d'un *Trattato della Pittura* publié en 1651. Ce travail n'eut donc pas d'influence sur son époque. Georges Canguilhem a pu écrire que Léonard de Vinci

est devenu un « héros quasi légendaire d'une histoire qui ne l'a découvert que comme auteur sans emploi sur le théâtre de la science ». Il reste qu'il fut un ingénieur-artiste génial qui s'efforça de penser ce qu'il faisait. En géométrie, même s'il a fait quelques découvertes théoriques, il a d'abord cherché des solutions pratiques pouvant être accomplies par des instruments mécaniques : « La mécanique est le paradis des sciences mathématiques. » Mais il s'est plus intéressé à la conception de ses projets « mécaniques » qu'à leur réalisation concrète : il fut bien plus « technologue » que « technicien ». En physique, sa conception de la *forza* est pour nous mythique mais elle lui permit néanmoins d'affirmer que la trajectoire d'un boulet est une courbe continue contrairement à l'opinion de l'époque, et de chercher à mathématiser la nature. L'acuité de ses dessins du corps humain permet de voir « tout ce que la Renaissance de l'anatomie aurait pu (lui) devoir. Mais nous avons affaire à l'histoire qui n'est pas l'uchronie » (G. Canguilhem). Toute son œuvre anatomique cherchait à rendre visible la structure interne du corps humain, l'œil « fenêtre de l'âme est la principale voie par laquelle notre intellect peut apprécier pleinement l'œuvre infinie de la nature ». C'est pourquoi la peinture a une valeur non seulement « mécanique » mais « scientifique » : elle est le seul art capable de vérité en montrant les choses telles qu'elles sont.

● Éditions des manuscrits : *Feuillets inédits de Léonard de Vinci*, Windsor, 22 vol., 1901 et s.d. – *Les manuscrits de Léonard de Vinci*, éd. Ravaisson-Mollien, Paris, 6 vol., 1881-1891. – *Manuscrits A, B, C, D de l'Institut de France*, transcription et trad. fr. Toni, Authier & Corbeau, Grenoble, 1964 et s.d. (inachevé). – *Traité de la peinture*, éd. A. Chastel, Paris, 1987. – *Anthologies* : CHASTEL A., *Léonard de Vinci par lui-même*, Paris, Nagel, 1952. – MCCURDY, L., *da Vinci's Note-Books*, trad. angl., Londres, 1906 (trad. fr. Servicen, Paris, 1942, rééd., 1987). – VALÉRY P., *Les carnets de L. de Vinci*, Paris, 2 vol., 1942.

► CHASTEL & GOMBRICH *et al.*, *Leonardo e l'età della ragione*, Milan, Scientia, 1982. – CROCE, PELADAN, VULLIAUD *et al.*, *Leonardo da Vinci*, Milan, Conférence florentine, 1910. – DUHEM P., *Études sur Léonard de Vinci*, Paris, 1906-1913 (rééd. 1955). – GILLE B., *Les ingénieurs de la Renaissance*, Paris, Hermann, 1964. – GOMBRICH E.H., *Leonardo, saggi e ricerche*, Rome, 1954. – PEDRETTI C., *Leonardo*, Berkeley/LOS Angeles, 1973. – PEDRETTI *et al.*, *Leonardo and the Renaissance*, Berkeley/LOS Angeles, 1987. – RETI, KEELE *et al.*, *Leonardo's Legacy*, Berkeley/LOS Angeles, 1969. – Coll. : *Léonard de Vinci et l'expérience scientifique au XVe siècle*, Paris, PUF, 1953.

François REMOISENET

→ Fossile.

LIAISON

CHIMIE

C'est une longue histoire que celle du concept de liaison chimique, qui est devenu et reste une des notions centrales pour le chimiste d'aujourd'hui.

Les théories élémentales de l'Antiquité grecque vont constituer pendant longtemps le système le plus répandu d'interprétation de la matière. Pour Platon (427-347 av. J.-C.), notre monde est le reflet du monde parfait des Idées, entités métaphysiques qui sont l'essence du réel. Les quatre éléments, feu, air, terre, eau, sont des êtres mathématiques, des volumes réguliers (les « solides platoniciens »). Cette théorie n'envisage aucune liaison, aucune possibilité d'agrégation entre ces éléments qui sont fondamentalement des structures mathématiques dont la géométrie assure la stabilité et les possibilités de transformation. Avec les atomistes grecs, dont les principaux représentants sont Leucippe (v. s. av. J.-C.), Démocrite (470-370 av. J.-C.) et Épicure (341-270 av. J.-C.), va naître la conception corpusculaire de la matière. C'est par l'ouvrage *De la Nature* du poète romain Lucrèce (98-55 av. J.-C.) qui décrit de manière détaillée et imagée les conceptions d'Épicure que nous sont parvenues les conceptions des atomistes grecs et que nous voyons émerger ce qui va, après bien des péripéties, conduire au concept de liaison chimique. Chez Lucrèce, la matière n'est ni homogène ni continue; dans le vide se meuvent des particules insécables, les atomes. Les corps durs doivent leurs propriétés aux aspérités des « atomes crochus » qui les constituent, permettent leur assemblage, et donc leur cohésion. En revanche, les atomes constituant les liquides sont ronds, sans aspérités, et roulent facilement sur eux-mêmes. Lucrèce interprète par cet atomisme très mécanique des notions de la vie courante, par exemple les goûts et les couleurs.

Jusqu'à la Renaissance, ce sont les théories élémentales, celles de Platon complétées par Aristote (384-322 av. J.-C.), qui vont par leur essence métaphysique l'emporter et l'atomisme sera quelque peu oublié. La Renaissance voit, en même temps que l'émergence de la méthode expérimentale, un renouveau de l'intérêt pour les théories atomistiques. Après P. Gassendi (1592-1655), R. Boyle (1627-1691) et D. Sennert (1572-1637), médecin et chimiste allemand qui cherchera à réaliser une synthèse des théories élémentales et atomistiques, c'est avec I. Newton (1642-1727) qu'un progrès décisif va être accompli dans l'approche conceptuelle de la liaison chimique. Un de ses ouvrages fondamentaux, *L'Optique* (1704), se termine par des « Questions » dans lesquelles Newton examine certains problèmes ouverts sous forme de conjectures. Dans la « Question 31 », il considère que les interactions entre « les plus petites particules de matière » sont régies par des forces d'attraction gravitationnelles mais également par des forces de répulsion non gravitationnelles; la résultante de ces forces va gouverner les phénomènes chimiques. Les « petites particules de matière » solides et indivisibles (il s'agit bien des atomes même si Newton ne semble pas avoir utilisé le mot) s'assemblent pour former des particules de premier degré de composition, qui s'assemblent à leur tour pour former des particules de second degré de composition: ce processus se

poursuit jusqu'à l'obtention des particules mises en jeu dans les réactions chimiques; la cohésion de ces particules va, en conséquence de leur degré de complexité, diminuer à mesure que leur grosseur augmente.

À partir de ces conceptions, Newton va interpréter des réactions chimiques. Il explique le déplacement d'un métal d'un de ses sels par un autre métal en faisant intervenir les différences d'interaction, avec les deux métaux mis en jeu, des particules d'acide à partir duquel le sel métallique initial a été formé. L'apport de Newton au problème de la liaison chimique est considérable: ce qu'il propose est en fait une théorie corpusculaire qui dépasse le cadre purement mécanique de liaison entre « atomes crochus »: ce sont des forces physiques, des forces à distance, qui assurent la cohésion des différents agrégats matériels, et on doit noter l'application que fait Newton de ses conceptions à des problèmes très concrets de réactivité chimique.

A.L. Lavoisier (1743-1794), écartant les doctrines élémentales héritées de l'Antiquité, considère en 1789 comme « éléments », sinon les particules simples ou indivisibles qui constituent les corps et que l'on n'est jamais sûr d'avoir obtenues, du moins les substances qui doivent être considérées comme simples tant que l'on n'est pas parvenu à les décomposer.

En 1808, J. Dalton (1766-1844) propose la théorie qui va faire de lui le père de l'atomisme moderne à qui il donne une base renouvelée et une forme quantitative: pour Dalton, chaque élément chimique au sens de Lavoisier est caractérisé par un atome qui possède non seulement une identité mais aussi une masse relative; les composés chimiques sont formés par l'union d'atomes de différents éléments dans des rapports simples (« loi de Dalton, ou des proportions multiples »).

En 1800, A. Volta (1745-1827) met au point sa pile électrique, montrant ainsi que l'électricité peut être d'origine chimique; la même année, A. Carlisle (1768-1840) et W. Nicholson (1753-1815) effectuent l'électrolyse de l'eau. L'existence d'une théorie atomique renouvelée et la mise en évidence des liens étroits entre phénomènes chimiques et phénomènes électriques vont avoir pour conséquence l'élaboration d'un modèle de la liaison chimique élaborée par J.J. Berzelius (1779-1848), un des chimistes les plus importants de la première partie du XIX^e s. C'est en 1814 qu'il présente ce qui reste connu sous le nom de « théorie dualistique » de la liaison chimique. Par électrolyse de potasse puis de soude fondues, H. Davy (1778-1829) avait isolé en 1807 deux nouveaux métaux, le potassium et le sodium, qui se forment au pôle négatif de la pile alors que d'autres éléments, tel l'oxygène, se forment au pôle positif. Berzelius va systématiquement caractériser les éléments par leur caractère électropositif ou électronégatif en considérant la nature du pôle de la pile où ils se forment durant une électrolyse et il va également évaluer l'ordre de leur électronégativité, l'oxygène étant le plus électropositif, et le sodium et le potassium les plus électropositifs. Il est frappant de constater que l'ordre

d'électronégativité proposé par Berzelius en 1819 diffère très peu de celui que l'on trouve dans une table moderne des potentiels d'électrodes! À partir de ces données, Berzelius propose une théorie de la cohésion et de la réactivité chimique. Pour lui, chaque élément est caractérisé par un atome ayant une structure dipolaire mais avec des charges inégales à chacun de leurs deux pôles: si les éléments électropositifs ont un excès de charges positives, c'est l'inverse pour les éléments électronégatifs. Cette théorie va avoir beaucoup de succès car elle permet de rationaliser un grand nombre de faits de la chimie de l'époque, qui était essentiellement la chimie minérale.

Dans la théorie de Berzelius, les interactions entre atomes liés étant d'origine électrostatique, un élément ne peut être remplacé dans une réaction que par un élément de même caractère, électropositif ou électropositif, et c'est bien ce qui était observé en chimie minérale. Mais très vite plusieurs résultats expérimentaux vont montrer que la réactivité des composés organiques est bien plus complexe. Il s'agit d'abord de résultats isolés que leurs auteurs décrivent sans discuter leurs implications théoriques. J. Gay-Lussac (1778-1850) obtient en 1815 le chlorure de cyanogène (CNCl) à partir de CNH, et en 1828 il écrit que le chlore, réagissant avec des huiles, « prend la place de l'hydrogène enlevé ». En 1821, M. Faraday (1791-1867) transcrit le composé C₂H₄Cl₂ en C₂H₆. Le remplacement de l'hydrogène électropositif par le chlore électropositif est incompatible avec la théorie de Berzelius, qui s'efforce de surmonter ces premières difficultés par des jeux d'écriture dans les formules des composés étudiés. Mais dans les années 1830, les travaux de J.B. Dumas (1800-1884) et surtout de A. Laurent (1807-1853) vont montrer la généralité en chimie organique alors en plein développement de ces phénomènes de substitution que Berzelius refusa toujours de reconnaître.

L'étude de la composition des composés chimiques va permettre d'étudier le nombre de relations chimiques qu'un élément peut établir avec un autre élément; ce que l'on nomme alors indifféremment sa capacité de combinaison, sa basicité ou son atomocité, puis, à partir des années 1860, sa valence. E. Frankland (1825-1899) en 1852, dans le cadre de la chimie minérale, énonce clairement que les atomes possèdent des capacités de combinaison qui sont indépendantes de la nature des atomes auxquels ils sont liés; ainsi l'azote, le phosphore, l'antimoine et l'arsenic semblent toujours devoir se combiner avec trois ou cinq atomes d'un autre élément. C'est également Frankland qui en 1862 va pour la première fois employer le terme de liaison pour utiliser une expression plus concrète qu'atomocité ou équivalence, mais sans donner au terme la signification d'une jonction matérielle; pour Frankland, les liaisons responsables de la cohésion d'un composé doivent plutôt ressembler à celles qui relient les composants d'un système solaire.

C'est en 1857 et 1858 que A. Kekulé (1829-1896)

introduit la notion de valence en chimie organique et deux propositions qui vont être à la base de toute l'évolution structurale de la discipline et que l'on peut énoncer ainsi: le carbone est toujours tétravalent (1857); les squelettes des composés organiques sont formés par des liaisons entre atomes de carbone ayant échangé entre eux « des unités d'affinité », c'est-à-dire des unités de valence (1858). Ce n'est que lentement que le terme de liaison finira par être couramment utilisé. La théorie à laquelle seul le nom de Kekulé est habituellement attaché a été proposée indépendamment, au même moment, et d'une manière sans doute plus précise et plus profonde, avec en particulier une représentation graphique originale des liaisons chimiques, par un jeune chimiste écossais A.S. Couper (1831-1892) au destin tragique. A. Wurtz (1817-1884), dans le laboratoire duquel il travaillait alors, ne soumis pas en temps voulu l'article qui présentait sa théorie à l'Académie des sciences. Entre-temps l'article de Kekulé parut et, après une vive discussion avec Wurtz, Couper retourna en Écosse, où il restera jusqu'à sa mort dans un état de grande fragilité mentale. Kekulé étend en 1865 sa théorie structurale aux composés aromatiques en proposant pour le benzène une formule cyclique hexagonale caractérisée par l'alternance des simples et des doubles liaisons. Aux conceptions de Kekulé et de Couper va s'ajouter, en 1874, la compréhension de la distribution spatiale des valences du carbone, grâce à la théorie du « carbone tétraédrique » de J.H. van'tHoff (1852-1911) et A. Le Bel (1847-1930) qui fonde la stéréochimie; et cet ensemble de chimie organique structurale va permettre le développement prodigieux de la chimie organique dans la dernière partie du XIX^e s. et assurer la prédominance définitive en chimie organique de la théorie atomique, longtemps concurrencée par ce que l'on a appelé la « théorie des équivalents ». Durant tout le XIX^e s., un certain nombre de chimistes, souvent importants, vont refuser l'atomisme et toute conception moléculaire, et pour eux le concept de liaison chimique n'a aucun sens. Un des principaux chimistes « équivalentalistes » a été M. Berthelot (1827-1907), qui, par son influence politique, a retardé l'introduction des théories atomiques dans l'enseignement français.

Malgré ses succès, la théorie structurale de Kekulé-Couper présentait dès l'abord un certain nombre de difficultés; ainsi on comprenait mal la réactivité particulière des doubles liaisons entre deux atomes de carbone; les deux atomes apparaissaient liés plus étroitement que par une liaison simple, et le système aurait donc dû présenter une réactivité diminuée... c'est-à-dire exactement l'inverse de ce qui est observé expérimentalement! Ce type de difficultés conceptuelles provoqua une série de démarches théoriques dont certaines se révélèrent très intéressantes dans l'émergence des modèles théoriques modernes. Signalons simplement sans les détailler deux de ces démarches parmi les plus importantes: la « théorie des tensions » proposée en 1885 par A. Baeyer

(1835-1917), et la théorie des « valences partielles » proposée en 1899 par J. Thiele.

La prise en compte de la théorie structurale de Kekulé-Couper ne marque pas la fin des théories électrostatiques de la liaison chimique. S. Arrhenius (1859-1927) propose en 1884 la théorie de la dissociation électrolytique dans le cadre de laquelle les sels dissous dans l'eau sont formés de particules chargées positives ou négatives, les ions, dont la cohésion est assurée par des interactions électrostatiques. Une conception originale de la liaison chimique apparaît avec A. Werner (1866-1919), qui s'intéresse à partir de 1891 aux complexes minéraux. Il va fonder la chimie des composés de coordination en considérant que l'atome central de ces complexes, en général un métal appartenant à ce que l'on appelle les métaux de transition (cobalt, chrome, platine...), possède en plus de sa valence normale, ou primaire, une valence secondaire, ou indice de coordination, qui assure la liaison avec des anions ou des molécules neutres (les « ligands ») disposés autour de lui dans l'espace.

En 1897, l'électron est mis en évidence mais c'est en 1916 que W. Kossel (1888-1956) et G.N. Lewis (1875-1946) vont proposer, indépendamment et dans des contextes différents, la théorie électronique de la liaison chimique qui stipule que les liaisons chimiques sont assurées par des électrons ; la liaison la plus fréquente dans les composés du carbone, qui constituent le champ de la chimie organique, est la liaison « covalente » qui résulte de la mise en commun de deux électrons associés en un « doublet » (Lewis). C'est à partir de la théorie de Lewis que R. Robinson (1886-1975) et C.K. Ingold (1893-1970) élaborent dans les années 1920-1940 la théorie électronique des mécanismes de réaction en chimie organique, en étudiant les processus par lesquels les liaisons chimiques se rompent et se forment.

En 1924, L. de Broglie (1892-1977) crée la mécanique ondulatoire qui va devenir la mécanique quantique et permet d'associer les caractères corpusculaires et ondulatoires de l'électron. Très vite, avec en particulier les travaux de E. Schrödinger (1887-1961), W. Heitler (1904-1981) et F. London (1900-1954), L. Pauling (1901-1994) et R. Mulliken (1896-1986) pour ne citer que ces physiciens, la mécanique quantique va apporter un support théorique à l'approche électronique de la liaison et de la réactivité chimique : elle va ainsi permettre l'émergence de ce qui est devenu la chimie théorique, toujours très active, mais dont nous ne pouvons pas présenter ici les très féconds résultats actuels ; signalons simplement que le paradoxe apparent de la réactivité des doubles liaisons évoqué plus haut a été très vite résolu par la chimie théorique qui a permis de comprendre qu'une double liaison est en fait la superposition de ce que l'on appelle une « liaison σ », c'est-à-dire une simple liaison, et d'une « liaison π », différente de la précédente et responsable des propriétés particulières de la double liaison.

► PALMER W.G., *A history of the concept of valency to 1930*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1965. — PULLMAN B., *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*, Paris, Fayard « Le temps des sciences », 1995. — RUSSEL C.A., *The history of valency*, Leicester, Leicester Univ. Press, 1971. — VIDAL B., *La liaison chimique : le concept et son histoire*, Paris, Vrin « Science-Histoire-Philosophie », 1989.

Georges BRAM

→ Catalyse ; Électrochimie ; Électron ; Quantique ; Valence.

LOCAL ET GLOBAL MATHÉMATIQUES

« Il suffit à un bon astronome de juger des mouvements et des apparences autour d'un point et que ses sens ne l'incitent pas à penser le contraire. Mais qui souhaite chercher plus loin, ou croit savoir, travaille en vain, enlise son esprit et, follement, attend trop des prédictions, soit d'effets, soit d'événements, de tant de configurations. » (Nicole Oresme, *Ad pauca respicientes*, in *De proportionibus proportionum*, éd. E. Grant, Madison, Univ. of Wisconsin Press « Wisconsin Publications in Medieval Science », 1966). Au XIV^e s., Nicole Oresme établissait donc une distinction entre les sérieuses études locales, concernant le comportement au voisinage d'un point, et les folles spéculations globales qu'il attribuait à l'astrologie. Au cours des trente dernières années ont été publiés plusieurs centaines d'articles de mathématiques dont le titre même contient les deux mots « local » et « global » : ils relèvent d'une multitude de domaines, depuis la théorie des nombres jusqu'aux probabilités, en passant par les équations différentielles et l'informatique théorique. S'il ne peut être question de retracer ici les histoires de ces réflexions croisées, le texte d'Oresme leur adresse d'emblée quelques questions : de quelles juridictions le local relève-t-il maintenant, sous quelles formes le global a-t-il donc aussi droit de cité dans les mathématiques, quels rapports – d'opposition, de complémentarité, d'intégration – ces deux pôles entretiennent-ils, à quels phénomènes chacun d'eux est-il associé ? C'est surtout la variété des réponses qu'y ont apportées les mathématiciens que nous chercherons à illustrer ici.

Les théories des fonctions d'une variable complexe

Notre premier terrain d'investigation est celui des fondations de la théorie des fonctions d'une variable complexe au XIX^e s. Elles mettent en effet en jeu des notions qui sont maintenant des archétypes pour une approche locale (développé en série autour d'un point) ou globale (intégrale, ensemble de singularités, forme du domaine de définition d'une fonction), dans des combinaisons variables selon les auteurs.

Au siècle précédent, les efforts pour donner des valeurs complexes aux arguments des fonctions

usuelles, tel le logarithme, avaient provoqué plusieurs controverses : les valeurs attribuées à ces fonctions par prolongement à partir de la situation réelle semblaient en effet dépendre des analogies privilégiées et la suggestion de Leonard Euler, selon laquelle une fonction complexe pouvait avoir plusieurs déterminations et prendre plusieurs valeurs en chaque point, avait été difficilement admise. Plusieurs présentations de la théorie de ces fonctions furent proposées au XIX^e s., dans le contexte d'un intérêt croissant pour l'usage des nombres complexes dans l'étude des phénomènes physiques et au sein des mathématiques mêmes. Les trois approches qui ont eu le plus grand écho, en particulier à cause de leur diffusion par l'enseignement, sont dues à Augustin-Louis Cauchy, Bernhard Riemann et Karl Weierstrass ; sans être indépendantes, elles s'appuient sur des conceptions et des exigences tout à fait distinctes.

Pour Cauchy, la notion de départ était celle de fonction monogène, c'est-à-dire munie d'une dérivée complexe en chaque point. Il définit l'intégrale d'une telle fonction entre deux valeurs complexes – ce qui revient, en interprétant les nombres complexes géométriquement par des points du plan, à considérer une intégrale curviligne le long d'un chemin joignant ces points – et exprima la valeur en un point d'une fonction monogène comme une intégrale sur un contour fermé autour de ce point dont l'intérieur ne contient aucune singularité de la fonction – c'est-à-dire de valeurs complexes où la fonction deviendrait infinie. À partir de cette formule intégrale, Cauchy déduisait un développement au voisinage d'un point de la fonction de départ en une série de puissances, valide, c'est-à-dire convergent, dans un disque centré en ce point et dont le rayon est la distance du point-centre à la singularité la plus proche. Un tel résultat permettait en particulier d'expliquer des phénomènes dont les effets pouvaient être constatés dans le domaine réel ; ainsi, si le développement en série de puissances $1 - x^2 + x^4 - x^6 + \dots$ de la fonction $1/(1 + x^2)$, qui n'a pourtant aucune singularité réelle, n'est valable pour x réel que si $-1 < x < 1$, c'est que la fonction possède en fait des singularités complexes, en $x = \pm \sqrt{-1}$, sur le disque unité.

Riemann, quant à lui, insistait d'entrée sur la différence entre les fonctions réelles et complexes : si des combinaisons arbitraires d'expressions analytiques variées permettent d'obtenir toute fonction assez régulière d'une variable réelle, la liberté de choix est plus restreinte dans le champ complexe et la connaissance de certains morceaux de la fonction suffit à la déterminer complètement. Riemann classa les fonctions complexes à l'aide de conditions aux bords et aux singularités et associa à chaque (classe de) fonction(s) une « surface » à plusieurs feuillets étendus au-dessus du plan, correspondant aux différentes déterminations de la fonction et recollés adéquatement ; on peut alors définir de manière unique la valeur de la fonction en chaque point de cette surface. D'importantes propriétés des fonctions associées à une surface de Riemann

dépendent de la forme générale de cette surface, entre autres de ce que Riemann appelait son ordre de connexité (maintenant le genre de la surface, égal par exemple à n pour un tore à n trous).

Les recherches de Riemann, parfois à peine esquissées, exercèrent une forte attraction chez ses contemporains, mais suscitèrent aussi des contestations nées, entre autres, de son libre usage d'idées issues de la physique – ainsi la conviction, dite « principe de Dirichlet », qu'une fonction à l'intérieur d'un disque est bien déterminée dès qu'on la connaît sur le bord : une version, satisfaisante pour les mathématiciens, de ce principe ne fut donnée qu'à la fin du siècle par David Hilbert. C'est en partie pour échapper à ces problèmes que Weierstrass adopta une autre voie, en fondant sa théorie directement sur les séries de puissances.

Pour Weierstrass, chacune définit, dans son disque de convergence, un élément de fonction complexe analytique, qu'il s'agit ensuite de prolonger de proche en proche en utilisant la rigidité des fonctions complexes évoquée plus haut : si deux fonctions complexes coïncident sur un petit disque, elles sont identiques sur leur domaine de définition tout entier, propriété qui permet d'associer à l'élément de fonction choisi au départ, en le développant à partir d'un point non central de son disque de convergence, une fonction complexe définie sur un plus grand domaine – fonction non unique, selon les chemins de prolongements suivis.

On conçoit que chaque approche ait eu ses défenseurs et surtout que les commentateurs ultérieurs aient eu la tentation de les répartir en deux camps : celui, « global », de Cauchy et Riemann, marqué par l'utilisation d'intégrales et de formes géométriques, celui, « local », de Weierstrass avec ses séries analytiques – même si, dans les premières décennies du XX^e s., des efforts d'unification, par Hermann Weyl et Ludwig Bieberbach en particulier, montreront par exemple comment construire la surface de Riemann à partir des éléments analytiques à la manière de Weierstrass. Aspects locaux et globaux, tels qu'ils sont ultérieurement distingués, sont en fait intimement mêlés chez nos trois auteurs, mais ces mélanges s'effectuent différemment : Cauchy dérive le comportement au voisinage d'un point de sa formule intégrale, Weierstrass crée un objet global sur un large domaine par raccordements successifs, Riemann met au cœur de son approche des considérations géométriques. Ces relations entre local et global sont coordonnées à d'autres préoccupations : on est tenté de dire que la rigueur a ici créé le local, au sens que l'exigence historique de ne considérer que des séries convergentes sur les nombres réels ou complexes a entraîné une réflexion sur les possibilités d'extension ou de raccordement d'éléments fonctionnels. Les réponses examinées montrent assez l'empreinte des hiérarchies entre branches des mathématiques, analyse ou géométrie en l'occurrence, pour fonder légitimement une approche ou pour représenter un phénomène nouveau.

Le principe du local-global

Ce deuxième thème rend compte du transfert vers l'algèbre de la notion géométriquement intuitive de voisinage d'un point, qui aboutit à une définition algébrique de « local » : ce qui doit être ici le « global » s'en déduit, ce qui fonde du même coup une relation très précise entre les deux.

Une partie du développement de la théorie des nombres dans la deuxième moitié du XIX^e s. se fonde sur l'analogie entre nombres (complexes) z algébriques – c'est-à-dire solutions d'équations du type $P(z) = 0$, où P est un polynôme à coefficients rationnels – et fonctions (complexes) f algébriques – solutions d'équations du type $P(z, f(z)) = 0$ où P est un polynôme à coefficients le plus souvent complexes. Dans deux articles indépendants parus en 1882, Richard Dedekind et Heinrich Weber, d'une part, Leopold Kronecker, de l'autre, ont contribué à mettre en place des traitements coordonnés des deux situations. Dans cette analogie, les entiers ordinaires correspondent aux fonctions f polynomiales ; à la décomposition des entiers en produit de nombres premiers répond le théorème fondamental de l'algèbre, autrement dit la factorisation des polynômes en produits de termes de la forme $z - z_i$, les z_i étant les zéros du polynôme considéré. En particulier, à la notion de nombre premier répond celle de fonction comme $z - z_i$, s'annulant en un seul point : d'où l'idée d'une correspondance analogique entre nombre premier et point dans le plan complexe. Ces considérations et les généralisations en théorie des nombres de la notion de nombre premier permirent d'abord à Dedekind et Weber de fonder « avec précision et en toute généralité », comme ils le disent, la précision et la généralité de l'algèbre, la notion de point sur une surface de Riemann associée à une fonction algébrique complexe comme nous l'avons décrit dans la section précédente.

Mais au tournant du siècle, Kurt Hensel, qui fut l'élève de Kronecker, importa réciproquement en théorie des nombres un outil puissant de la théorie des fonctions, le développement en série autour d'un point. Son travail fournit un paradigme pour l'interprétation en algèbre de l'idée de « local ». Puisque l'analogie d'un point est un nombre premier, Hensel représenta d'abord tous les entiers positifs comme somme (finie) de puissances d'un nombre premier p fixé, avec des coefficients compris entre 0 et $p - 1$. L'approximation à un certain ordre dans la théorie des séries correspond du côté arithmétique à une congruence modulo une puissance de p , où l'on ne conserve que le reste de la division euclidienne par cette puissance. Les séries, éventuellement infinies, obtenues par passage à la limite peuvent être additionnées, soustraites et multipliées entre elles ; elles forment l'anneau des entiers p -adiques, qui contient (strictement) les entiers relatifs : les fractions correspondantes forment un ensemble stable par les quatre opérations, le corps des nombres p -adiques, qui contient en particulier tous les nombres rationnels. L'expansion de la topologie au

début du siècle incita Hensel à définir une distance p -adique et à montrer que la construction du corps des nombres p -adiques peut être modelée, pour cette distance, sur celle des nombres réels pour la distance usuelle. En 1918, Alexander Ostrowski prouva d'ailleurs que ces distances – p -adiques pour tout p et réelles – sont essentiellement les seules distances raisonnables qu'on peut définir sur le corps des nombres rationnels ; les recherches relatives à un seul nombre premier, qui mettent en jeu un corps et une distance p -adiques, sont alors qualifiées de « locales » – le cas réel fut d'ailleurs réinterprété comme un cas local pour un nombre premier « à l'infini » –, la situation rationnelle étant perçue par contraste comme « globale ».

Ces constructions ont été mises en œuvre pour examiner des questions classiques de théorie des nombres. Un des résultats les plus féconds a donné lieu aux nombreuses variantes du principe du local-global en théorie des nombres et en géométrie algébrique : c'est le théorème de Hasse-Minkowski. À la fin du XIX^e s., Hermann Minkowski avait déterminé des conditions pour que deux formes quadratiques à coefficients rationnels soient isomorphes sur le corps des nombres rationnels, c'est-à-dire puissent être transformées l'une l'autre par des changements de variables rationnels. En 1920, des questions analogues furent reprises par un élève de Hensel, Helmut Hasse. Celui-ci donna une formulation particulièrement efficace à la réponse : deux formes quadratiques à coefficients rationnels sont isomorphes sur le corps des rationnels si et seulement si elles le sont sur le corps des réels et sur les corps p -adiques, pour tout nombre premier p . Le point intéressant est que ces dernières conditions sont beaucoup plus faciles à vérifier – par exemple les formes quadratiques réelles non dégénérées sont classées par leur nombre de variables et leur signature. Autrement dit, on peut remplacer des recherches difficiles sur les entiers et les rationnels par des recherches « locales », plus simples, dans les nombres p -adiques et les réels.

Cette idée fut généralisée par Hasse lui-même et ses successeurs et appliquée à d'autres types d'équations. Le principe du local-global est déjà en défaut pour les équations cubiques, mais l'examen de la nature des obstructions, la recherche de méthodes palliatives ou d'adaptations ont fait l'objet de nombreux travaux. Une direction légèrement différente consistait à développer pour les corps p -adiques et leurs généralisations certaines recherches entreprises en théorie des nombres. Hasse lui-même travailla sur la théorie locale des corps de classes, théorie qui décrit les extensions algébriques d'un corps (ici un corps p -adique ou une des variantes) dont le groupe d'automorphismes relatif est commutatif, en fonction de classes d'éléments du corps de base : Hasse déduisait les résultats pour les corps p -adiques de la théorie déjà existante sur les corps de nombres. Un enjeu des années 1930 et 1940 fut au contraire d'établir d'abord la théorie des corps de classes dans les cas locaux et de l'utiliser pour reconstruire la théorie globale, sur les corps de nombres ; un tel programme, achevé vers 1940 par

Claude Chevalley, avait d'ailleurs l'objectif supplémentaire de débarrasser la théorie globale de ses démonstrations originelles fondées sur l'analyse complexe, au profit d'une approche purement algébrique. Des reformulations successives, en particulier par Emil Artin et ses collaborateurs, amenèrent à définir plus précisément ce qu'on pouvait qualifier de « global » dans ce contexte, c'est-à-dire les situations pour lesquelles il est possible d'obtenir une théorie arithmétique analogue à celle des corps de nombres : outre ces derniers, les seules possibilités sont des corps de fonctions algébriques, mais obtenus comme extensions de corps de fractions rationnelles à coefficients non dans le corps des complexes, mais dans un corps fini.

En 1938, par ailleurs, Wolfgang Krull introduisit en algèbre même une structure qui synthétisait l'idée de rendre compte du comportement local, celle d'anneau local (*Stellenring* dans la terminologie de Krull). Un anneau A est un ensemble dont les éléments peuvent être combinés par addition, soustraction et multiplication, un idéal de A est un sous-ensemble lui aussi stable par addition et soustraction et contenant le produit de tous ses éléments avec n'importe quel élément de l'anneau ambiant A . Chaque idéal est contenu dans un idéal maximal ; on appelle anneau local un anneau ne possédant qu'un seul idéal maximal. C'est typiquement le cas pour l'anneau des nombres p -adiques (l'idéal maximal unique est l'ensemble des multiples de p) ou pour l'anneau des fractions rationnelles définies en un point (l'idéal maximal est composé des fonctions nulles en ce point) ; ce n'est pas le cas de l'anneau des entiers relatifs, où chaque nombre premier engendre un idéal maximal distinct. La notion est donc cohérente avec les idées de « local » et de « global » déjà rencontrées. La théorie des anneaux locaux étant là encore plus simple que la théorie générale des anneaux, les procédés de localisation constituent désormais un outil apprécié dans différents domaines – les méthodes locales interviennent par exemple dans la récente démonstration de la conjecture de Taniyama (et donc de Fermat) par Andrew Wiles. Dans la situation examinée ici, les problèmes initiaux, ceux de l'arithmétique usuelle, sont donc globaux ; l'analogie avec la théorie des fonctions a incité à définir et à explorer des points de vue locaux, relatifs à chaque nombre premier et à leurs généralisations. Il est intéressant de remarquer que l'analogie de départ doit être modifiée lorsque des notions globales précises, susceptibles de traitements et d'arguments unifiés, sont à leur tour élaborées. Notons que, aussi contre-intuitif que cela puisse paraître, le « global » est ici plongé dans chaque localisation : dans certains cas, l'information relative à un seul nombre premier, un seul anneau local, suffit à déterminer certains résultats globaux ; dans d'autres, c'est la juxtaposition des informations locales, soumise éventuellement à certaines conditions de compatibilité, qui donne accès aux phénomènes globaux, comme pour le théorème de Hasse-Minkowski.

Local et global en géométrie différentielle

La géométrie différentielle a joué un rôle privilégié dans les rapports des mathématiques et de la physique, que ce soit pour représenter l'espace ou pour traiter des phénomènes naturels au moyen d'équations différentielles. En partie à cause de cette relation, les interactions entre « local » et « global » y sont d'une grande richesse, ainsi que l'élaboration des notions et des techniques chargées de l'un ou l'autre aspect. Cette richesse, là encore, apparaît surtout rétrospectivement : à quelques exceptions près, jusqu'au début du XX^e s. au moins, la différence entre propriétés locales et globales n'est pas centrale, les recherches où on peut la mettre en évidence sont en fait focalisées sur d'autres préoccupations. L'une d'elles est l'étude intrinsèque des courbes et des surfaces, jusque-là surtout étudiées, au moins implicitement, en les imaginant plongées dans un espace euclidien de dimension 3. En 1827, Carl Friedrich Gauss définit l'élément d'arc ds le long d'une courbe tracée sur une surface par l'expression $ds^2 = Edp^2 + 2Fdp dq + Gdq^2$, où p et q sont des coordonnées sur la surface, E , F et G des fonctions de p et q . Le membre de droite de cette expression représente en fait une métrique sur la surface, au voisinage de chaque point. Gauss introduisit aussi la courbure en un point, qui sera perçue comme un des principaux réceptacles de l'information locale sur la surface, et montra son *theorema egregium* (théorème remarquable) : la courbure s'exprime au moyen des seules fonctions E , F , G et de leurs dérivées, en particulier deux surfaces applicables l'une sur l'autre – nous dirions isométriques localement – ont même courbure. En 1854, Riemann étendit cette approche à des variétés de dimension quelconque et, à partir d'une métrique donnée au voisinage de chaque point par une forme quadratique, donna un sens à la notion de longueur d'une courbe ou de distance entre deux points dans la variété ; il définit aussi une courbure analogue à celle de Gauss (et dite maintenant courbure sectionnelle). Notons au passage que ces recherches de Riemann sont séparées de celles évoquées plus haut à propos des fonctions complexes et le resteront à peu près jusqu'au début du XX^e s. : elles seront même perçues comme opposées dans leur conception de la géométrie, le programme de 1854 servant de modèle pour les approches locales. De nombreux travaux développèrent à la même époque d'autres outils pour l'exploration intrinsèque, principalement dans le cadre des surfaces : à titre exemplaire, mentionnons la méthode du trièdre mobile d'Albert Ribaucour et Gaston Darboux, qui utilisait pour étudier une courbe sur une surface un système de coordonnées variable en chaque point, un axe restant toujours tangent à la courbe, un autre normal à la surface. Élie Cartan la généralisa sous le nom de méthode du repère mobile au début du XX^e s. et en donna de multiples applications.

L'approche intrinsèque mettait donc implicitement en vedette l'étude au voisinage d'un point, en particulier parce que ses systèmes de repérage en dépendaient.

mais sans négliger les questions concernant l'ensemble de la surface ou de la courbe. Un exemple typique est celui des liens entre l'applicabilité de deux surfaces l'une sur l'autre et la possibilité de les déduire l'une de l'autre par un déplacement (global) dans l'espace euclidien. Le « global » est ainsi perçu avant tout comme un problème de rigidité. À titre indicatif, mentionnons quelques résultats dans cette direction : les seules surfaces complètes – une surface est complète si toute suite de points, dont les distances mutuelles sur la surface deviennent aussi petites que l'on veut à partir d'un certain rang, y converge – à courbure constante strictement positive sont les sphères (Karl Liebnann, 1899) ; il n'existe pas de surfaces complètes à courbure constante négative sans singularité (David Hilbert, 1899).

Une telle perception des rapports entre local et global doit être rapprochée d'une conception générale de la géométrie, telle que la proposa par exemple Felix Klein en 1872 dans son programme d'Erlangen : chaque géométrie (projective, euclidienne, etc.) était pour lui caractérisée par le groupe de transformations qui la laissait fixe. Si ce programme permettait d'inclure une multitude de géométries disponibles à l'époque, en particulier non euclidiennes, il ne laissait à peu près place, parmi les espaces riemanniens définis par des métriques locales, qu'à ceux de courbure constante. Les aspects globaux y étaient en tout cas absorbés dans la prise en compte du groupe, qui rigidifie la situation.

Plusieurs éléments vinrent transformer ce paysage au tournant du siècle. D'abord, la place accordée à la topologie sous ses différentes formes, avec les travaux de Felix Hausdorff, de Maurice Fréchet et surtout de Henri Poincaré : cette discipline fournit un nouveau cadre pour envisager les propriétés globales. Une formule classique, dite de Gauss-Bonnet, liant l'intégrale de la courbure évaluée sur un petit triangle à des propriétés de ce triangle, fut ainsi transformée en un paradigme des nouvelles liaisons entre « local » et « global » : grâce au procédé de triangulation des surfaces, outil standard de la topologie combinatoire, cette formule se réexprime comme un lien entre la courbure, élément local, et la caractéristique d'Euler-Poincaré de la surface, un invariant topologique, donc une donnée globale.

Une deuxième innovation vint de la physique mathématique, qui stimula l'étude des espaces de dimension supérieure à 3 et définis à partir de métriques locales, mis à l'honneur en relativité générale par les travaux d'Albert Einstein et de Hermann Weyl, ainsi que le développement de calculs sur ces espaces, dont celui sur les tenseurs – fonctions de l'espace dont les transformations par changement de coordonnées locales obéissent à certaines règles déterminées –, initié dès 1901 par Gregorio Ricci et Tullio Levi-Civita. Ce dernier introduit en 1917 le transport parallèle, dont Élie Cartan quelques années plus tard tira la notion fondamentale de connexion : elle permet de comparer les vecteurs des espaces tangents en des points voisins,

alors que, sur ces espaces généraux, les espaces tangents en chaque point sont *a priori* distincts et sans relation entre eux. Cartan vit la possibilité de combiner partiellement le programme de Klein et les idées de Riemann en construisant à partir de groupes adéquats certains espaces à courbure non constante, les éléments du groupe étant interprétés comme des transformations locales de l'espace servant à en raccorder les morceaux.

C'est ainsi que, dans les années 1930, sont apparues des réflexions plus systématiques sur le rapport entre local et global. Elles se traduisirent de plusieurs manières. D'abord, d'autres théorèmes de rigidité furent démontrés, pour des variétés autres que les surfaces, mais dans une perspective qui accordait un statut complémentaire aux informations locales et globales et prenait acte de ce qu'elles relevaient souvent de deux branches des mathématiques, alors que le global avait paru posséder auparavant une évidence ontologique. Ainsi Heinz Hopf et Willi Rinow prouvèrent en 1931 que toute variété riemannienne complète, simplement connexe (c'est-à-dire sans trous) et à courbure constante, est isométrique selon le signe de la courbure à une sphère, un espace euclidien ou un espace hyperbolique : Hopf présenta ce résultat, après tout un résultat typique de rigidité, comme une liaison entre topologie et géométrie différentielle sur une variété. C'est plus encore le cas pour les résultats fondamentaux de Harry Rauch dans les années 1950, qui mettaient en évidence une certaine stabilité de la nature topologique de la sphère : une variété riemannienne complète simplement connexe de courbure sectionnelle partout comprise entre 0,76 et 1 – la borne optimale de 0,25 sera obtenue ultérieurement – est une sphère, à application bicontinue près. Ensuite, on s'employa à préciser quels types d'énoncés ou de propriétés participaient du « local » ou du « global ». William Threlfall distingua ainsi dans le calcul des variations sur une variété riemannienne la partie locale (*im kleinen*), qui s'occuperait par exemple des conditions pour qu'une courbe extrême soit minimale parmi les courbes voisines, et la partie globale (*im grossen*), qui chercherait toutes les extrémales vérifiant certaines conditions limites, comme les géodésiques joignant deux points fixes – ces dernières questions furent abordées dans les travaux de Marston Morse à partir de 1934.

Enfin, de nouvelles définitions des espaces eux-mêmes mirent en évidence leur construction en tant que recollement convenable de morceaux. Une variété différentielle par exemple est donnée abstraitement par des cartes locales, essentiellement des ouverts d'un espace euclidien fournissant en particulier des systèmes locaux de coordonnées, cartes raccordées par des applications de transition différentiables ; Hassler Whitney montra d'ailleurs dans les années 1935-1936 qu'un tel objet peut être plongé dans un espace euclidien de dimension convenable. La notion d'espace fibré, introduite par Charles Ehresmann à la même époque, est un autre exemple qui donna un cadre précis

au programme de Cartan et permit une formulation globale des connexions et du transport parallèle : à partir d'une variété différentielle de base, une nouvelle variété (l'espace fibré) est formée de telle sorte qu'à un voisinage d'un point de la variété de départ correspond dans celle d'arrivée le produit de ce voisinage et d'une variété fixe (la fibre). Ce type de construction fut repris dans de multiples domaines, comme la géométrie algébrique ou la physique, dans laquelle ces espaces peuvent représenter aussi bien l'espace-temps de la relativité générale que les espaces de phases ou de configurations en mécanique. La théorie de jauge de Chen Ning Yang et Robert Mills se rattache ainsi étroitement aux espaces fibrés. La relativité générale a quant à elle favorisé des recherches sur les variétés munies de métriques locales qui, contrairement au cas des espaces riemanniens, ne sont pas définies positives : si leur théorie locale est similaire, les problèmes globaux, cruciaux par exemple dans les questions liées à la cosmologie, peuvent s'y poser de manière totalement différente.

« Prenons par exemple le problème des trois corps, ne peut-on pas se demander si l'un des corps restera toujours dans une certaine région du ciel ou bien s'il pourra s'éloigner indéfiniment, si la distance de deux corps augmentera, ou diminuera à l'infini, ou bien si elle restera comprise entre certaines limites ? Ne peut-on pas se poser mille questions de ce genre qui seront toutes résolues quand on saura construire qualitativement les trajectoires des trois corps ? Et si l'on considère un nombre plus grand de corps, qu'est-ce que la question de l'invariabilité des éléments des planètes... » (Henri Poincaré, « Mémoires sur les courbes définies par une équation différentielle (1880-1886) », *Œuvres I*, Paris, Gauthier-Villars, 1950-1965). À la fin du XIX^e s., Henri Poincaré soulignait ainsi que les méthodes analytiques et numériques élaborées au voisinage d'un point ne permettaient pas de répondre aux questions de mécanique céleste et entamaient ses études qualitatives des équations différentielles. Qualitatif, plutôt que quantitatif, voilà que se dessine une figure pour nous encore masquée du « global », réponse lointaine à Oresme, sur son terrain même, celui des phénomènes célestes. Comme répondent aussi à Oresme les travaux plus récents sur les singularités à l'origine de l'univers brièvement évoqués plus haut.

Nous n'avons pas ici épuisé toutes les figures du local et du global. Le rapprochement des trois champs étudiés suggère toutefois que, malgré la foule de réflexions antérieures, c'est seulement dans l'entre-deux-guerres que se polarisent systématiquement de nombreux domaines mathématiques autour d'une distinction entre « local » et « global ». Cette classification sert alors rétrospectivement à analyser des travaux précédents. La multiplicité des représentations de ces deux pôles et de leurs interactions, de la juxtaposition au prolongement, de l'induction par rigidité au recollement, ne s'est d'ailleurs pas tarie ; elle dépend étroitement, comme nous l'avons vu, de la répartition des champs disciplinaires, des objets disponibles, mais

aussi de conceptions préalables fortes, souvent implicites, sur la nature des phénomènes relevant du global, en mathématiques ou dans les sciences physiques.

► BAYER-FLUCKIGER E., « Local-global principles and linear algebraic groups », *Prépublication 97/07, Mathématiques de l'Université de Franche-Comté*, Besançon, 1997. – CARTAN E., *Notice sur les travaux scientifiques*, Paris, Gauthier-Villars, 1974. – CHAVEL I. & FARKAS H.M. éd., *Differential Geometry and Complex Analysis*, Berlin, Springer, 1985. – DIEUDONNÉ J. dir., *Abrégé d'histoire des mathématiques 1700-1900*, Paris, Hermann, 1978. – GILAIN C., « La théorie qualitative de Poincaré et le problème de l'intégration des équations différentielles », in GISPERT H. éd., *La France mathématique*, Paris, SFHST-SMF, 1991, p. 215-242. – HASSÉ H., « Kurt Hensels entscheidender Anstoss zur Entdeckung des Lokal-Global-Prinzips », *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1963, 209, p. 3-4. – HOPF H., « Géométrie infinitésimale et topologie », *L'enseignement mathématique*, 1931, 30, p. 233-240. – JOSH P., *Global Aspects in Gravitation and Cosmology*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1993. – LAUTMAN A., *Essai sur l'unité des mathématiques et divers écrits*, Paris, UGE « 10-18 », 1977. – NABONNAND P., « Contribution à l'histoire de la théorie des géodésiques au XIX^e siècle », *Revue d'histoire des mathématiques*, 1995, 1, p. 159-200. – RIEMANN B., *Collected Works*, 2^e éd., New York, Dover, 1953. – THRELFALL W., « Le calcul des variations global », *L'enseignement mathématique*, 38, 1939-1940, p. 189-208. – WEIL A., « Une lettre et un extrait de lettre à Simone Weil », *Œuvres scientifiques I*, 1978, p. 244-255.

Catherine GOLDSTEIN

→ Équation ; Géométries ; Topologie ; Transformation géométrique.

LOCALISATIONS CÉRÉBRALES

La théorie des localisations cérébrales – selon laquelle chaque région du cerveau possède une fonction spécifique – a pour ancêtre une doctrine défendue au début du XIX^e s. par le médecin F.-J. Gall : la phrénologie. Le terme de phrénologie ne fut pas inventé par Gall (qui préférerait parler d'organologie ou de cranioscopie) mais par un disciple nommé Forster qui créa le terme *phrenology* (T.I.M. Forster, *Sketch of the phrenology of Gall and Spurzheim*, Londres, 1816). Par ailleurs, il faut distinguer la craniologie de la phrénologie. Inaugurée au XVIII^e s. par les travaux de Daubenton et de Camper, la craniologie – étude scientifique du crâne de l'homme et des primates (cubages de la capacité crânienne, déterminations d'angles, de diamètres...) – se poursuit avec Broca au siècle suivant. Au début du XIX^e s., le terme craniologie inclut la phrénologie. Mais avec le déclin progressif de la phrénologie, à l'époque de Broca, dans les années 1860-1870, l'aire sémantique du terme craniologie exclut la phrénologie et les travaux de Gall. Dans les années 1860-1870, Broca, Wernicke et leurs collègues neurologues donnent des fondements anatomocliniques à la théorie des localisations en repérant, après autopsie, la lésion cérébrale responsable du trouble neuropsychologique. À la fin du XIX^e s., la théorie des localisations cérébrales est

généralement acceptée même si ses partisans doivent continuer à croiser le fer avec quelques antilocalisationnistes convaincus. Aujourd'hui, la spécialisation fonctionnelle du système nerveux central est unanimement admise. Toutefois, la relation mental-cérébral est beaucoup plus complexe que celle imaginée par les neurologues du XIX^e s. Les explorateurs du cerveau décrivent, à présent, des cartes de plus en plus précises de la spécialisation fonctionnelle du système nerveux central. Dans l'histoire des localisations cérébrales, trois périodes peuvent donc être schématiquement distinguées. 1) Avant 1900, les savants cherchent un lien entre le lobe du cerveau (occipital, pariétal, temporal...) et une fonction globale. À la fin du siècle dernier, le principe de localisation des fonctions principales (vision, audition, motricité...) est pratiquement accepté par tous. 2) Après 1900, le débat sur les localisations cérébrales se poursuit à d'autres niveaux : il porte, d'une part, sur la répartition du traitement de l'information au sein des diverses régions du cerveau ; d'autre part, sur la localisation des fonctions mentales supérieures. Entre 1914 et 1940 apparaît ainsi un renouveau du courant antilocalisateur, lequel domine la neurologie de l'entre-deux-guerres. 3) Après la Seconde Guerre mondiale, le principe de localisation, définitivement admis, est envisagé de façon plus dynamique.

La phrénologie de F.J. Gall

L'idée première que les caractères mentaux sont en relation avec la configuration du cortex revient à F.-J. Gall. Gall est le fondateur de la phrénologie, une discipline préscientifique qui a fortement imprégné le développement de la neurologie au début du XIX^e s. Il est convaincu que la forme du cerveau, et par conséquent la forme de la voûte crânienne qui « moule » le cerveau, donne des indications sur le caractère et les facultés des individus. Dès 1803, il expose ses théories à Vienne dans des cours privés bientôt suspendus par le gouvernement impérial d'Autriche en raison de leur danger pour la religion. En effet, Gall abandonne l'idée de l'existence d'un esprit distinct, indépendant du cerveau et remet en question l'idée de l'unicité de l'âme. La phrénologie soutient trois thèses essentielles : 1) le cerveau est l'organe de la pensée ; 2) les facultés mentales sont localisées dans des aires spécifiques de la surface du cerveau ; 3) un excès ou un déficit dans l'une de ces facultés peut être détecté grâce à l'examen du crâne, ou cranioscopie.

Selon Gall, le développement particulier d'une faculté mentale produit une extension de la région cérébrale sous-tendant cette faculté, et inversement. Gall pense aussi que les os de la voûte crânienne se développent comme le cortex qu'ils recouvrent, si bien qu'un secteur cortical volumineux produit une saillie osseuse. Une faculté mentale particulièrement développée chez un sujet provoque donc l'apparition d'une bosse au niveau de la voûte crânienne ; une faculté peu développée induit au contraire une dépression localisée du

crâne. Gall dresse une liste de vingt-sept facultés mentales innées indépendantes les unes des autres. Chacune de ces dernières trouve dans une partie du territoire cortical sa condition matérielle de possibilité. Parmi les facultés (ou penchants) que Gall pense avoir découvertes, mentionnons-en quelques-unes : l'instinct de reproduction, l'amour de la descendance, l'amitié, le sens de la métaphysique, la mémoire des mots, le sens des couleurs, l'esprit de calembour, le talent poétique... Certaines de ces facultés nous paraissent aujourd'hui fantaisistes. D'autres, comme la mémoire des mots ou le sens des couleurs, sont reprises dans les théories neurologiques à la fin du XIX^e s. et au XX^e s. Gall et ses disciples ont donc favorisé l'avènement d'une notion moderne – la notion de localisation cérébrale – par le biais d'une doctrine fondée sur des hypothèses fausses.

La phrénologie, discipline préscientifique, ouvre ainsi la voie à la théorie des localisations cérébrales, qui sera précisée tout au long du XX^e s. par les neuroscientifiques. Signalons que le philosophe positiviste Auguste Comte s'est appuyé sur les théories de Gall pour critiquer le principe de « l'unité du moi » (ou de « l'unité de l'âme ») et pour défendre l'idée de la pluralité des fonctions mentales. Comte stigmatise les métaphysiciens qui « conservent, par un principe unique ou du moins souverain, ce qu'ils ont appelé l'unité du moi, afin de correspondre à la rigoureuse unité de l'âme » (A. Comte, *Cours de philosophie positive*, t. 3, Paris, Bachelier, 1838, p. 781). Il loue, au contraire, la méthode des savants positifs « qui ne s'assujétissent d'avance à aucune autre obligation intellectuelle, que de voir, sans aucune entrave, le véritable état des choses, et de le reproduire, avec une scrupuleuse exactitude, dans leurs théories ».

Le triomphe de la théorie des localisations dans la seconde moitié du XIX^e s.

L'histoire des localisations cérébrales commence véritablement en 1861. Cette année-là, Paul Broca, chirurgien de l'hôpital de Bicêtre, relate le cas d'un patient aphasique nommé Leborgne qui ne peut plus émettre que la monosyllabe Tan. Dans un article intitulé « Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé suivies d'une observation d'aphémie (perte de la parole) », il traite des localisations cérébrales : « Il y a dans l'esprit des groupes de facultés, et dans le cerveau, des groupes de circonvolutions ; [...] les grandes régions de l'esprit correspondent aux grandes régions du cerveau. » Broca estime que l'aphémie de Leborgne est la conséquence de la lésion de l'un des lobes antérieurs du cerveau. Pour lui, le principe des localisations n'est pas encore tout à fait démontré par l'examen mais il est extrêmement probable. L'étude de la faculté du langage articulé permet de préciser la question des localisations cérébrales. Il s'agit de chercher la circonvolution du cerveau dont la lésion est responsable de l'aphémie (le mot « aphémie » est l'équivalent ancien du mot « aphasie » ; à partir de 1865, le concept

d'« aphasie » est préféré à celui d'« aphémie »). L'autopsie du cerveau d'autres patients aphasiques va lui permettre de répondre à cette question. En 1865, s'appuyant sur de nombreuses données anatomopathologiques, il affirme que l'aphasie est produite par une lésion de la troisième circonvolution frontale gauche. La découverte de Broca constitue le début véritable de la théorie des localisations.

Dans la seconde moitié du XIX^e s., d'autres travaux viennent confirmer la validité de la doctrine des localisations. Citons-en quelques-uns parmi les plus importants : la découverte par Wernicke de l'aphasie sensorielle, une autre forme d'aphasie causée par une lésion du lobe temporal ; les travaux anatomiques de Meynert, lequel propose un modèle associationniste du système nerveux ; les stimulations expérimentales du cortex moteur réalisées par Fritsch et Hitzig ; les observations de Ferrier sur le singe au cerveau lésé...

Contrairement aux « unitaires », les localisateurs affirment que chaque région cérébrale possède sa fonction propre. En aucun cas, l'esprit n'est une fonction globalement attribuable à l'ensemble du fonctionnement cérébral dont on ne pourrait supprimer l'expression que dans sa totalité. Les diverses aires du cerveau sous-tendent différents types de fonctions mentales. En 1870 est obtenu – fait majeur dans l'histoire des localisations cérébrales – le premier résultat expérimental de stimulation électrique du cortex. En cette année, deux médecins de Berlin, G. Fritsch et E. Hitzig, constatent qu'une partie de la convexité cérébrale du chien est motrice tandis que l'autre ne l'est pas. En stimulant avec un faible courant de petites aires cérébrales ils obtiennent l'activation de groupes spécifiques de muscles. La localisation est sommaire mais un pas important est néanmoins marqué : à l'époque, la conception régnante était que l'écorce cérébrale ne jouait aucun rôle moteur. Ce préjugé métaphysique imprégnait profondément la mentalité de la majorité des scientifiques. De ce fait, au début, les localisateurs éprouvèrent toutes les peines du monde à faire admettre des vues qui allaient à l'encontre de cette opinion préconçue. Ainsi, la découverte des deux jeunes privat-docents fut violemment contestée par l'« establishment » médical. L'indignation de leurs contradicteurs n'ébranla cependant pas la conviction des deux chercheurs allemands quant au bien-fondé de leurs théories. Ainsi, en 1873, Hitzig établit-il le principe général des localisations cérébrales, principe selon lequel les diverses fonctions du cerveau dépendent d'« organes cérébraux » déterminés, exactement délimités. Les résultats des deux chercheurs allemands furent confirmés ultérieurement par David Ferrier, qui reprit les travaux sur le cortex moteur de l'animal et démontra l'existence de centres corticaux de la motricité. Influencé par les découvertes de Fritsch et Hitzig ainsi que par les observations cliniques du neurologue Hughlings Jackson, le médecin écossais David Ferrier réalisa un nombre impressionnant d'investigations physiologiques, en particulier sur le cortex cérébral du singe. Il démontra ainsi l'existence de « centres

cérébraux » de la motricité et dressa même une carte des localisations dans le cerveau humain à partir des résultats acquis chez le singe.

Malgré l'évidence croissante de l'existence de centres moteurs corticaux, Ferrier, tout comme Fritsch et Hitzig, eut affaire à des adversaires tenaces. Le plus obstiné des opposants fut, sans conteste, Friedrich Leopold Goltz (1834-1902), un neurophysiologiste allemand dont les travaux consistèrent essentiellement en des ablations chirurgicales sur des cerveaux de chiens. Adoptant une attitude que l'historienne des sciences M.A.B. Brazier qualifie de résistance bornée, Goltz défendit jusqu'à sa mort la non-existence du cortex moteur. En unitaire convaincu, il soutint – comme, avant lui, le Français Flourens – que « chaque partie du cortex participe aux processus de volonté, de sensation et de pensée », que chaque partie du cortex est connectée à tous les muscles volontaires et à tous les nerfs sensitifs. En 1881, Goltz et Ferrier exposèrent leurs thèses respectives au Congrès médical international de Londres. Au cours de cet affrontement verbal, resté aussi célèbre dans l'histoire de la neurologie que le débat opposant Marie à Déjerine en 1911 sur la question de l'aphasie, Goltz et Ferrier exhibèrent leurs animaux de laboratoire pour convaincre l'assistance du bien-fondé de leurs thèses respectives : les participants furent invités à aller observer les chiens de Goltz et les singes de Ferrier dans le laboratoire du King's College de Londres. Malgré l'hostilité des antilocalisateurs, la thèse de Ferrier rencontra l'adhésion de cliniciens comme Charcot et Pitres, lesquels s'attachèrent à réunir un nombre important de documents cliniques leur permettant de démontrer la justesse de la doctrine des localisations corticales motrices.

Les débats philosophiques et idéologiques suscités par la théorie des localisations aux confins du XIX^e et du XX^e s.

Les discussions concernant la doctrine des localisations cérébrales, la question de l'aphasie, la nature de l'activité spirituelle, l'unité du moi ne sont pas uniquement d'ordre scientifique. Le débat est aussi idéologique. Une « philosophie spontanée » des médecins apparaît dans la France du XIX^e s. Les deux thèses principales sont, d'une part, la théorie des localisations (« Il n'y a pas de maladie sans une lésion correspondante des organes ») et, d'autre part, une critique radicale de la philosophie métaphysique. Ce mouvement, d'inspiration matérialiste, entreprend un combat virulent contre la métaphysique de l'école spiritualiste. Dans ce contexte, les découvertes de Broca sur l'aphasie engendrent des discussions sans fin.

L'enjeu du débat ne concerne pas uniquement la « vérité scientifique » ou la pertinence du choix qui s'offre entre des théories antagonistes du fonctionnement cérébral (localisation contre holisme). Il porte également sur les croyances religieuses en l'unité et l'immatérialité de l'esprit humain et sur la validité de ces croyances. Broca est lui-même un farouche partisan

du matérialisme. À ce propos, il convient de noter que les membres de la Société d'anthropologie (dont Broca est le fondateur) sont très généralement favorables à ce courant philosophique. Selon Harrington, un des principaux objectifs de cette association est « de faire redescendre la philosophie sur terre en la rattachant étroitement à une base matérielle » : « Il est évident que si la neurologie pouvait établir un principe de fonctionnement cérébral impliquant la fragmentation de l'âme et la localisation de ses différents fragments dans diverses régions corticales, cela favoriserait la stratégie visant à « matérialiser » la philosophie française » (A. Harrington, « Au-delà de la phrénologie : théories de la localisation à l'époque contemporaine », in Corsi P. éd., *La fabrique de la pensée*, Milan, 1990, p. 206-215). Le neurologue français Pierre Marie, un des plus farouches opposants aux thèses classiques de l'aphasie, note d'ailleurs les enjeux philosophiques sous-jacents du débat autour de l'aphasie de Broca : « Beaucoup de médecins appartenant aux anciennes générations médicales étaient « localisateurs » en tant qu'adeptes du système de Gall ; quant aux nouvelles générations, elles comptaient un plus grand nombre encore de « localisateurs ». Les étudiants, eux, l'étaient parce qu'ils sentaient qu'il y avait là une doctrine susceptible d'aboutir à un progrès, et aussi un peu parce que c'était la mode ; mais ils l'étaient encore pour une autre raison, et celle-là d'ordre philosophique. La lutte commençait à devenir ardente entre le spiritualisme d'une part, et de l'autre le matérialisme, car c'était là le nom sous lequel on s'efforçait de flétrir la libre pensée. Or pour les purs spiritualistes, il semblait qu'il y eût quelque chose d'attentatoire à la dignité de l'âme humaine dans la doctrine qui prétendait rechercher et circonscrire dans certains points fixes du cerveau telle ou telle fonction psychique, telle ou telle faculté. Aussi peut-on facilement imaginer avec quelle animation étaient défendues, par tous les novateurs, les théories localisatrices, qui, si elles triomphaient, devraient, à leur avis, saper dans ses fondements l'antique philosophie » (P. Marie, « Révision de la question de l'aphasie », *La semaine médicale*, 28 nov. 1906, p. 570).

Le climat antilocalisationniste de la première moitié du xx^e s.

Aux confins du XIX^e et du XX^e s., des publications hostiles aux théories des associationnistes font beaucoup de bruit et provoquent des débats analogues à ceux déclenchés quarante ans auparavant par les découvertes de Broca. Les discussions à propos des théories neurologiques se transforment en querelles métaphysiques.

En 1896, Bergson croise le fer avec les neurologues associationnistes dans son livre *Matière et Mémoire*. Bergson explique le syndrome de l'aphasie sensorielle par une « perturbation des habitudes motrices ». Le cerveau doit être dans un état moteur adéquat pour

recevoir le souvenir-image venant de la mémoire pure. Lorsque le cerveau est lésé, il n'est plus apte à recevoir les souvenirs-images venant de la mémoire pure. Bergson ne concède au cerveau qu'un rôle secondaire : « Le rôle du cerveau est de faire que l'esprit, quand il a besoin d'un souvenir, puisse obtenir du corps l'attitude ou le mouvement naissant qui présente au souvenir cherché un cadre approprié. Si le cadre est là, le souvenir viendra, de lui-même, s'y insérer. L'organe cérébral prépare le cadre, il ne fournit pas le souvenir. » Il s'oppose ainsi aux théories associationnistes des physiologistes où « des sons évoquent par contiguïté des souvenirs auditifs, et les sons auditifs, des idées » et dans lesquelles « des lésions cérébrales entraîneraient la disparition des souvenirs ». Bref, il écarte l'hypothèse selon laquelle un ébranlement sensoriel peut éveiller « des représentations auditives assoupies dans l'écorce ». Contrairement aux physiologistes, il refuse de considérer le cerveau comme « dépositaire de souvenirs ». Selon Bergson, l'idée que les souvenirs sont conservés sous forme de dispositifs cérébraux n'est pas confirmée par les données de la clinique neurologique. Il existe un seul cas où l'observation semble suggérer cette vue, celui de l'aphasie ou, plus généralement, celui des troubles de la reconnaissance visuelle ou auditive. Dans ce cas, un siège constant dans une circonvolution déterminée du système nerveux peut effectivement être assigné ; mais alors, ce n'est pas à une disparition brusque et définitive de tels ou tels souvenirs que l'on assiste mais bien plutôt « à l'affaiblissement graduel et fonctionnel de l'ensemble de la mémoire intéressée ». L'atteinte porte uniquement sur les régions sensorielles et motrices correspondant à ce type de perception (ou sur les « annexes » qui enclenchent intérieurement leur action) de sorte que le « souvenir pur », d'essence spirituelle, ne parvient plus à s'incruster dans une région cérébrale et devient ainsi « pratiquement impuissant ».

Au début du XX^e s., Pierre Marie relance le débat sur les localisations. À cette époque, le principe des localisations des fonctions principales (langage, vision, audition, motricité...) est pratiquement accepté par tous. Le débat porte désormais sur la subdivision fonctionnelle au sein des diverses régions du cerveau. En 1900, l'année où le neurologue français Déjerine publie sa *Sémiologie des affections du système nerveux*, la doctrine des localisations qui prédomine se mêle d'associationnisme. La doctrine associationniste se fonde sur les travaux de Meynert. Selon ce grand anatomiste viennois, les centres de projection (vision, audition...) sont reliés les uns aux autres par des fibres d'association. Il existe divers centres où sont traitées les images visuelles, auditives, motrices, graphiques... Les deux grands initiateurs de cette théorie sont l'Anglais Bastian et l'Allemand Wernicke. L'aphasie est ainsi démembrée en une multiplicité de centres. C'est la période des *diagram makers* où chaque neurologue

imagine son propre schéma des centres nerveux responsables du langage et des sens. Aussi les figures graphiques se compliquent-elles de plus en plus. En France, l'associationnisme est introduit par Charcot, qui propose son schéma de la cloche, lequel trouve son aboutissement dans la conception de Grasset. Le schéma de Grasset est constitué d'un polygone dont tous les sommets sont réunis l'un à l'autre ; dix-huit formes d'aphasie sont ainsi prévues. L'associationnisme que défend Déjerine est plus modéré. Pour expliquer les syndromes aphasiques, Déjerine distingue essentiellement deux types d'aphasie : l'aphasie motrice, causée par une lésion du centre de Broca, siège des images motrices d'articulation ; l'aphasie sensorielle, causée par une atteinte du centre de Wernicke, siège des images auditives des mots. Dans l'aphasie motrice, l'expression du langage est altérée. Le malade ne parvient plus à émettre que quelques mots. L'aphasique moteur type Broca a perdu la possibilité de traduire sa pensée par la parole. Dans l'aphasie sensorielle, c'est la compréhension de la parole et de l'écriture qui est altérée. Le malade ne comprend pas les mots prononcés devant lui. Il ressemble à un individu transporté dans un pays étranger dont il ne connaît pas la langue. L'associationnisme est également appliqué à la fonction visuelle. Au début des années 1890, les neurologues définissent l'organisation du cortex visuel. La conception en vogue à la fin du XIX^e s. est celle d'une dualité fonctionnelle de la vision : le cerveau « voit » grâce au cortex strié occipital et « comprend » ou « reconnaît » grâce au cortex associatif environnant.

En ce début de XX^e s., l'associationnisme est donc généralement admis. Pourtant, Pierre Marie s'en prend aux thèses associationnistes de Déjerine et aux dogmes de la théorie dominante de l'aphasie. En 1906, l'année où Marie publie trois articles iconoclastes dans *La semaine médicale*, les centres décrits par Broca et Wernicke constituent les piliers de la théorie de l'aphasie. Or que fait Marie dans ces écrits ? Il critique Broca, il critique Wernicke, il nie l'existence des images, il nie l'existence des centres et il défend une conception unitaire de l'aphasie. Marie regrette aussi l'usage des schémas en neurologie : « Prétendre traduire la Psychologie en schémas d'ordre anatomique quand nous ignorons tout, il faut bien l'avouer, de la Physiologie et même de l'Anatomie fine du cerveau, voilà ce qu'on ne peut admettre ! »

Après les articles iconoclastes de Pierre Marie, les nouvelles thèses antilocalisationnistes et unitaires gagnent du terrain. La neurologie de l'entre-deux-guerres est profondément imprégnée des conceptions antilocalisationnistes. Les neurologues « néo-unitaires » – comme von Monakow, Marie, Head, Mourgue, Goldstein, Lashley – influencent considérablement les conceptions philosophiques en neurologie. Ils ne remettent pas en question la localisation corticale des fonctions globales (motricité, vision, audition, langage...). Ils admettent le fait que les fonctions globales sont localisées dans des aires distinctes du cerveau. Le

débat porte désormais, d'une part sur l'existence de centres spécialisés au sein des diverses aires fonctionnelles (par exemple, sur la présence d'un centre de la couleur au sein du cortex visuel occipital), d'autre part sur la localisation des « fonctions mentales supérieures ». Von Monakow est un des plus ardents antilocalisationnistes de ce temps. Ses théories vont exercer une influence importante sur les conceptions de Kurt Goldstein et de Karl Lashley. Lashley, par exemple, en se référant explicitement à Monakow, défend l'idée d'une aire corticale visuelle unitaire et équipotentielle traitant simultanément les diverses composantes de la vision : « Pour cette fonction (visuelle), il n'y a pas de localisations subordonnées de fonctions à l'intérieur du cortex visuel ; cette aire fonctionne comme une unité » (voir K. Lashley, « Mass action in cerebral function », *Science*, 73, 1931, p. 248-249).

Le neurologue Kurt Goldstein, très fortement imprégné de la Gestalt-theorie, est aussi favorablement impressionné par Monakow, qu'il cite maintes fois dans ses écrits. Goldstein récusé la classification clinique des troubles neuropsychologiques en aphasies, agnosies, apraxies... D'après lui, une opération particulière de l'esprit n'est jamais abolie isolément : tous les domaines d'opérations de l'esprit sont toujours plus ou moins atteints. Les déficits présentés dans les divers domaines par le malade au cerveau lésé sont tous du même genre. Ils résultent d'une « modification fondamentale » : « Il y a désintégration d'opérations « supérieures », exigeant la totalité du substrat, d'opérations « difficiles », avec conservation d'opérations plus simples ; nous pouvons parler d'une hiérarchie de la désintégration » (K. Goldstein, *La structure de l'organisme*, Paris, Gallimard, 1983, p. 30 ; l'édition originale en allemand, *Der Aufbau des Organismus*, date de 1934). C'est dans ce sens que Goldstein et son collègue Gelb expliquent, en 1918, les symptômes d'un de leurs patients – le cas Schneider – victime d'une lésion du lobe occipital. En étudiant ce sujet victime de cécité psychique, ils remarquent que les troubles ne sont pas limités à la sphère visuelle mais concernent également le tact, le langage, la pensée et l'activité générale. Les divers domaines du mental sont atteints de la même manière : régression vers des conduites plus simples, plus proches du concret. La doctrine de Goldstein est globaliste : « Tout phénomène entretient un rapport avec la totalité » (*La structure de l'organisme*, p. 208) ; « On ne peut maintenir l'hypothèse d'opérations circonscrites déficientes dans un foyer circonscrit : il se produit une désintégration fonctionnelle systématique que nous ne pouvons apprécier correctement dans chaque trouble qu'en considérant l'organisme tout entier » (*ibid.*, p. 219).

L'affinement de la cartographie du cerveau

Dans le climat antilocalisationniste de l'entre-deux-guerres, l'idée de centres spécialisés dans des fonctions particulières a beaucoup de mal à se faire admettre. Pourtant des faits cliniques tendent à montrer

l'existence de tels centres. Étudions, à titre exemplatif, l'évolution des conceptions relatives à un « centre de la vision des couleurs ». Notons que, dès les années 1880, des médecins avaient émis l'hypothèse d'un centre cérébral pour la vision des couleurs après avoir décrit plusieurs cas d'achromatopsie (syndrome dans lequel la personne perd la capacité de voir les couleurs). À la fin du XIX^e s., Henschen adhère également à une conception en vogue à l'époque, celle d'une dualité fonctionnelle de la vision. Le cerveau « voit » grâce au cortex strié et « comprend » grâce au cortex associatif environnant. Cette théorie s'appuie sur un autre credo anatomo-fonctionnel : des fonctions différentes s'effectuent dans des régions anatomiques architecturalement différentes. Dans ce contexte, il n'y a pas de place pour une théorie postulant un « centre » de la couleur en dehors du cortex strié. C'est le cortex strié qui « voit ». Les « impressions colorées » comme les autres impressions visuelles sont reçues au niveau du cortex visuel primaire conçu comme étant une « rétine corticale » traitant simultanément tous les attributs visuels.

Dans la première moitié du XX^e s., les neurologues antilocalisationnistes et néo-unitaires défendent l'hypothèse d'une aire visuelle corticale simple traitant en bloc toutes les caractéristiques visuelles. « Rien ne nous paraît justifier l'existence d'un centre cortical spécial pour la vision des couleurs », écrit par exemple Marie en 1915. Comme le démontre Semir Zeki dans *A Vision of the Brain*, l'idée d'une spécialisation du cortex visuel en divers sous-systèmes s'impose seulement après la Seconde Guerre mondiale. Ce changement de conception est dû, entre autres, à l'évolution des méthodes de cartographie du cerveau.

K. Brodmann, au début du XX^e s., établit une carte du cerveau fondée sur les différences de l'architecture cellulaire des diverses couches du cerveau. Dans cette cartographie cytoarchitectonique, le cortex visuel comprend les aires 17 (cortex strié, aire visuelle primaire), 18 et 19 (aires préstriées, « cortex visuel associatif »). Depuis le XIX^e s., les neurologues considèrent que la différenciation architecturale va de pair avec la différenciation fonctionnelle : un changement architectural indique une variation de la fonction. Comme le note Zeki, ce principe général est sans doute correct. Malheureusement, les méthodes d'examen ne permettent pas de mettre en évidence toutes les caractéristiques architecturales. La méthode cytoarchitectonique, par exemple, montre la distinction entre cortex strié et aires avoisinantes mais ne révèle pas les subdivisions fonctionnelles au sein de ces régions. Cette absence apparente de subdivisions joue en défaveur de l'existence d'un « centre de la couleur ». Un tel centre spécialisé devrait posséder une architecture distincte, et la méthode architectonique employée par Brodmann ne montre pas une telle zone différenciée. Mais des nouvelles méthodes histologiques indiquent de nouvelles caractéristiques de l'architecture corticale. Ainsi, l'uti-

lisation de méthodes particulières de coloration a contribué à mettre en évidence les multiples aires visuelles.

Des travaux anatomo-physiologiques effectués chez l'animal ont enfin raison des résistances idéologiques au concept de spécialisation fonctionnelle du cerveau visuel. Dans les années 1970, des études anatomiques et physiologiques sur le cerveau de primates montrent que plusieurs cartes (dénommées V2, V3, V4, V5...) représentant la rétine existent en dehors de l'aire visuelle primaire (V1). Chacune de ces cartes possède des propriétés spécifiques. De nouvelles techniques d'examen anatomique décèlent progressivement l'architecture et la localisation des aires corticales. En dévoilant les aires à haute activité métabolique, la méthode cytochrome oxydase appliquée à V2 met en évidence l'architecture particulière de cette zone.

À la même époque, les neurophysiologistes découvrent que les diverses aires visuelles du singe macaque entreprennent des tâches visuelles distinctes. Grâce à des microélectrodes, ils étudient les réponses de cellules isolées du cortex visuel à divers stimuli apparaissant sur un écran face à l'animal. Dans l'aire V5, les cellules sont sensibles au mouvement des stimuli. Dans l'aire V4, les cellules répondent préférentiellement à certaines longueurs d'onde ; elles interviennent dans la vision des couleurs.

Grâce à ces travaux physiologiques, la thèse d'une spécialisation fonctionnelle du cortex visuel, proposée timidement par quelques médecins isolés à la fin du XIX^e s. puis rejetée pendant plus d'un demi-siècle, possède enfin des assises solides. Il existe diverses voies visuelles cheminant en parallèle, chacune étant fonctionnellement spécialisée (perception de la couleur, du mouvement, de la forme, de la profondeur...).

Les premiers cas cliniques d'achromatopsie sont réexaminés à la lumière des nouvelles expérimentations physiologiques. Une telle analyse conduit Meadows à localiser le site responsable de la cécité des couleurs dans les gyri lingual et fusiforme. Grâce à une nouvelle technique d'imagerie médicale, la tomographie par émission de positons, Zeki et ses collaborateurs ont identifié, chez l'homme, la zone cérébrale jouant un rôle crucial dans la perception de la couleur (appelée V4). En comparant les images tomographiques du cerveau de volontaires regardant un tableau de rectangles colorés avec celles de sujets mis en présence d'un tableau contenant uniquement diverses nuances de gris, les expérimentateurs ont, pour la première fois, isolé un « centre de la couleur » situé au niveau du gyrus fusiforme.

De l'associationnisme au connexionnisme : l'émergence de nouvelles conceptions des rapports esprit-cerveau

À la fin du XIX^e s., le cerveau est perçu comme un ensemble de centres reliés entre eux. Cette doctrine associationniste, vivement critiquée par les neurologues de

l'entre-deux-guerres, connaît un renouveau dans les années 1960 avec le neurologue américain Norman Geschwind. Aujourd'hui, les neuroscientifiques poursuivent avec des méthodes et des techniques plus sophistiquées le travail de cartographie du cerveau humain commencé au siècle dernier. L'associationnisme a fait place à une conception beaucoup plus complexe du fonctionnement du cerveau : le cortex cérébral est conçu comme une mosaïque d'aires fonctionnellement spécialisées reliées par des connexions parallèles. Ainsi, au sein du cortex visuel, les divers attributs visuels sont analysés par des voies neurales distinctes. Il existe tout un dispositif de liaisons neuronales à l'intérieur et entre les différents systèmes visuels. À l'intérieur de chacune de ces voies interviennent des cellules spécialisées. Les travaux sur le cortex visuel dévoilent déjà certains principes de l'organisation corticale. D'après Zeki, l'individualisation d'une aire corticale implique notamment : une caractéristique fonctionnelle la différenciant des autres aires ; une organisation des entrées et des sorties neuronales différentes des entrées et des sorties des autres aires ; une architecture unique.

Les études de coloration anatomique, les investigations physiologiques et les nouvelles techniques d'imagerie médicale permettent donc aux explorateurs du cerveau de proposer de nouvelles cartes plus précises. Le cortex visuel est un bon exemple de ce type de cartes. Les méthodes anatomo-physiologiques peuvent être appliquées à d'autres régions moins connues du cerveau, comme le cortex préfrontal ou les aires du langage. Le problème des localisations cérébrales d'opérations cognitives élaborées comme le langage et la musique est d'une complexité inouïe. Des théories de type associationniste ont été proposées notamment par A.R. Damasio pour décrire les aphasies, et par J. Sergent pour les amusies. Comme l'anatomie et la physiologie fines de ces régions du cerveau sont encore très mal connues, ces théories sont susceptibles des mêmes critiques que les diagrammes des neurologues du XIX^e s. Pour dévoiler l'organisation précise des aires du langage et de la musique, il faudra attendre l'application de méthodes analogues à celles utilisées pour le cortex visuel.

En postulant l'existence de régions et de réseaux spécialisés au sein du cerveau, la théorie des localisations cérébrales pose une autre question fondamentale : comment l'activité dans des réseaux nerveux dispersés engendre-t-elle une expérience subjective unifiée ? La vision d'un objet, par exemple, produit une perception unifiée de cet objet dans la conscience alors que le cortex visuel comporte des réseaux neurales distincts pour la forme, la couleur, le mouvement...

Certains neuroscientifiques reprennent une hypothèse défendue par Wolf Singer selon laquelle l'expérience interne unifiée est sous-tendue par une activité synchrone de neurones appartenant à des réseaux spatialement distincts correspondant aux diverses modalités visuelles (forme, mouvement, couleur...). Cette activation synchronisée de cellules nerveuses

constituerait le corrélat cérébral de l'unification de la conscience visuelle au niveau subjectif.

► BERGSON H., « Matière et Mémoire », in BERGSON H., *Œuvres*, Paris, PUF, 1959 (éd. du Centenaire). — BORING E.G., *A History of Experimental Psychology*, New York, Appleton, 2^e éd., 1957. — BRAZIER M.A.B., *A History of Neurophysiology in the 19th Century*, New York, Raven Press, 1988, p. 120-155. — CLARKE E. & DEWHURST K., *An Illustrated History of Brain Function*, Oxford, Sandford Publ., 1972. — DAMASIO A., *L'erreur de Descartes*, Paris, Odile Jacob, 1995. — FERRIER D., *The Functions of the Brain*, Londres, Smith Elder, 1876 ; *The Localization of Cerebral Disease*, Londres, Smith Elder, 1878. — FINGER S., *Origins of Neuroscience*, New York, Oxford Univ. Press, 1994. — FRITSCH G.T. & HITZIG E., « Ueber die elektrische Erregbarkeit des Grosshirns », *Archiv für Anatomie, Physiologie und Wissenschaftliche Medizin*, 37, 1870, p. 300-332. — GESCHWIND N., « Disconnexion syndromes in animals and man », *Brain*, 88, 1965, p. 237-294 et 585-644. — GOLDSTEIN K., *La structure de l'organisme*, Paris, Gallimard, 1983. — HECAEN H. & DUBOIS J., *La naissance de la neuropsychologie du langage*, Paris, Flammarion, 1969. — HECAEN H. & LANTIERI-LAURA G., *Évolution des connaissances et des doctrines sur les localisations cérébrales*, Paris, Desclée De Brouwer, 1977. — JEANNEROD M., *De la physiologie mentale*, Paris, Odile Jacob, 1996. — MARIE P., « Révision de la question de l'aphasie », *La semaine médicale*, 23 mai 1906, p. 241-247 ; 17 oct. 1906, p. 493-500 ; 28 nov. 1906, p. 565-570. — MISSA J.-N., *L'esprit-cerveau*, Paris, Vrin, 1993. — MONAKOW V. & MOURGUE R., *Introduction biologique à l'étude de la neurologie et de la psychopathologie*, Paris, Alcan, 1928. — OMBREDANE A., *L'aphasie et l'élaboration de la pensée explicite*, Paris, PUF, 1951. — SOURY J., *Le système nerveux central*, Paris, Carré & Naud, 1899. — YOUNG R.M., *Mind, Brain and Adaptation in the 19th Century*, Oxford, Clarendon, Press, 1970. — ZEKI S., *A Vision of the Brain*, Oxford, Blackwell Scientific Publ., 1993.

Jean-Noël MISSA

→ Loeb ; Neurophilosophie ; Progrès.

LOCKE John, 1632-1704

Philosophe anglais dont l'ouvrage *An Essay concerning Human Understanding* (1690) est donné comme fondateur de l'empirisme moderne. La critique de l'innéité des principes théoriques et pratiques dans le livre I de l'ouvrage apportait à la tolérance et au libéralisme la justification dont ils avaient besoin. Mais, plus fondamentalement, l'*Essai* fournissait au mécanisme corpusculaire la théorie de la connaissance qui, avec l'exposé d'une réduction analytique des idées, convenait à une représentation discontinuiste de la réalité. Locke avait fréquenté de près les savants et chimistes de la Royal Society de Londres, côtoyant Boyle, Willis et Hooke, qui l'intéressèrent aux questions relatives à la nature de l'air et de la respiration. Très engagé dans les recherches médicales aux côtés de Sydenham, Locke écrivit avec lui le *De Arte Medica* (1667), qui donne la mesure d'un « empirisme médical ». Dans l'*Essai*, Locke fraye une voie moyenne entre la méthode des hypothèses secondées par l'expérimentation préconisée par Boyle et l'observation dénuée de préconceptions.

encouragée par Sydenham. Outre la critique de l'innéisme, l'*Essai* ouvrait à d'autres problématiques qui furent autant d'événements dans l'histoire des idées : par exemple, la formulation du « problème de Molyneux » : la mise en évidence de l'absence d'idée de substance qui n'est que l'inéluctable supposition d'un « je-ne-sais-quoi », support des qualités effectivement percevables ; la substitution de la conscience à la substance ou « chose pensante », pour rendre compte de l'identité personnelle ; l'admission que la substance matérielle puisse être douée par Dieu de pensée. Ces différents chefs furent d'une influence considérable sur les philosophies ultérieures. Comme en témoignent les multiples éditions de l'*Essai*, ainsi que l'immense succès de la traduction de Coste (*Essai philosophique concernant l'entendement humain*), publiée en 1700, l'ouvrage de Locke fut comme le phare de toute la philosophie des Lumières.

• *The Clarendon Edition of the Works of John Locke*, éd. P.H. Niddich & J.W. Yolton, 30 vol., 1975. — *Locke's Essays on the Law of Nature*, éd. W. von Leyden, Oxford Univ. Press, 1954. — « De Arte Medica », in FOX BOURNE H.R., *The Life of John Locke*, Londres, vol. 1, 1876. — *Essai philosophique concernant l'entendement humain*, trad. Coste (1700), rééd. Vrin, 1994. — *Essai sur l'entendement humain*, trad. J.M. Vienne (2001-2003), 4 vol., Vrin ; *Essai philosophique concernant l'entendement humain*, trad. Coste, éd. G. Moyal, coll. « Littérature clandestine », Champion, 2004.

▷ AARON R.I., *John Locke* (1937), Oxford, Clarendon Press, rééd. 1955. — ALEXANDER P., *Ideas, Qualities and Corpuscles, Locke and Boyle on the External World*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1985. — AYERS M., *Locke*, 2 vol. : 1) *Ontology* ; 2) *Epistemology*, Routledge, New York, 1991. — BALIBAR E., *Identité et différence ou L'invention de la conscience* par John Locke, traduction et commentaire de *Essai II*, ch. 27, éd. Points-Le Seuil, 1998. — BERCHIALLI L., « Color, Space, and Figure in Locke : An Interpretation of the Molyneux Problem », in *Journal of the History of Philosophy*, vol. 40, 1, 2002, p. 47-65. — BOYLE R., *The Collected Works of the Honorable R. Boyle* (1744), éd. T. Birch, 5 vol., rééd. 1772. — BRYKMAN G., *Locke : Idées, langage et connaissance*, éd. Ellipses, 2001. — DUCHESNEAU F., *L'empirisme de Locke*, La Haye, M. Nijhoff, 1973. — GARBER D., « Locke, Berkeley, and Corporeality Scepticism », in *Berkeley : Critical and Interpretive Essays*, Minneapolis, Univ. of Minnesota Press. — GIBSON J., *Locke's Theory of Knowledge and its Historical Relations*, Cambridge Univ. Press, 1917, rééd. 1931. — JOLLEY N., *Leibniz and Locke, a Study of the New Essays on Human Understanding*, Oxford, Clarendon Press, 1984. — LEIBNIZ G., *Nouveaux Essais sur l'entendement humain* (1703), éd. von Gerhart, t. V. — PARMENTIER M., Introduction à l'*Essai sur l'entendement humain* de Locke, PUF, 1999. — TIPTON I.C. et al., *Locke on Human Understanding*, Oxford Univ. Press, 1977. — WOOLHOUSE R.S., *Locke's Philosophy of Science and Knowledge*, Oxford, Blackwell, 1971. — YOLTON J.W., *Locke and the Compass on Human Understanding*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1970 ; *Locke and French Materialism*, Clarendon Press, Oxford, 1991. — YOST R.M., « Locke's Rejection of Hypotheses about Sub-Microscopic Events », *Journal of the History of Ideas*, 12, 1951.

Geneviève BRYKMAN

→ Expérience ; Immatérialisme ; Rationalité.

LOEB Jacques, 1859-1924

Physiologiste américain né en Allemagne. En vue de répondre à la question de savoir si la liberté de la volonté existe, Loeb étudia la localisation des fonctions cérébrales, sous la direction de Goltz, à l'université de Strasbourg (1880). Son amitié avec Julius von Sachs, dont l'enseignement portait sur le tropisme des végétaux et sur les mouvements contraints provoqués par un stimulus physique tel que la lumière et la gravité, fut décisive. Savoir si un tel tropisme se manifeste chez les animaux, et s'il suffit à expliquer l'impotence de ceux-ci à opposer leurs désirs et leurs volontés aux stimuli extérieurs qui les sollicitent, est la question que Loeb sera conduit à se poser dans un environnement intellectuel dominé par la théorie de la mécanique du développement (*Entwicklungsmechanik*) de Wilhelm Roux. Ses recherches l'amènèrent à conclure que l'ensemble des animaux ont un comportement d'ordre indubitablement tropistique. Thèse qui ne tarda pas à tomber sous le coup d'attaques sévères, dont celle du biologiste américain Herbert Spencer Jennings, qui, dans son ouvrage intitulé *Behavior of the Lower Organisms* (1906), démontrait que les réponses tropistiques observées par Loeb s'apparentaient davantage à des « réactions d'évitement » non spécifiquement provoquées par des stimuli. Loeb ne se laissa nullement intimider par le contenu d'une telle critique, convaincu qu'il était d'avoir fait de l'étude du comportement une science expérimentale rigoureuse et contribué à la suppression d'une forme de mysticisme en substituant les tropismes aux instincts humains. Substitution sur l'intérêt scientifique et la portée philosophique de laquelle il reviendra dans sa fameuse adresse intitulée : « The mechanistic Conception of Life » (titre ensuite repris par l'un de ses ouvrages les mieux connus), présentée devant le 1^{er} Congrès international des monistes à Hambourg, en septembre 1911.

• Pour une bibliographie complète des œuvres de Loeb, voir OSTERHOUT W.J.V., « Jacques Loeb », *Journal of General Psychology*, 8, 1928, ix-xxii (bibliogr. N. Kobelt).

▷ Pour une appréhension globale du contenu de l'œuvre de Loeb, voir FLEMING D., *The Mechanistic Conception of Life*, repr. éd., Cambridge (Mass.), 1964, vii-xli ; « Loeb », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1973, t. VIII, p. 445-447.

Éric HAMRAOUI

→ Institut Rockefeller ; Localisations cérébrales.

LOGICISME

Gottlob Frege (1848-1925) peut à juste titre être considéré comme le fondateur de la logique mathématique. Toute sa carrière se passa au département de mathématiques de l'université d'Iéna. En fait, les préoccupations de Frege concernent très précisément sinon

exclusivement les rapports entre la logique et les mathématiques. En ce sens, non seulement peut-il être considéré comme le premier véritable philosophe de la nouvelle logique, qui allait connaître un développement fulgurant tout au long du XX^e s., mais il convient assurément de le considérer également comme le premier authentique philosophe des mathématiques. Frege introduisit la notation conceptuelle (*Begriffsschrift*, 1879), basée fondamentalement sur la distinction entre variable et quantificateur et permettant d'exprimer pleinement la généralité. C'est à l'aide de cette méthode que Frege croyait parvenir non seulement à mathématiser la logique, mais aussi à logiciser la mathématique, c'est-à-dire à réduire l'arithmétique à la logique et en particulier à fournir une analyse logique du concept de nombre. C'est le programme de recherches élaboré dans cette perspective et à cette fin que l'on nomme à strictement parler le logicisme, un programme que Frege lança et que Russell, critique de Frege, tenta par la suite de mener à bien à l'aide de Whitehead (*Principia Mathematica*). Ce programme fait l'hypothèse que les mathématiques, c'est-à-dire, pour Frege exclusivement l'arithmétique et non la géométrie, ne sont que l'extension de la logique et donc qu'il sera possible de faire voir, au terme d'une réduction appropriée menée dans le cadre de la logique formelle, que toutes les vérités mathématiques dérivent en fait de vérités logiques.

Le parcours de Frege

Après avoir publié son ouvrage *Begriffsschrift*, Frege s'attaque effectivement au problème de fonder les mathématiques, objectif qu'il s'assigne dans les *Grundlagen der Arithmetik* (1884). L'idée est simplement d'utiliser la même approche analytique dans l'examen de la plus fondamentale des théories mathématiques, à savoir la théorie des nombres. La méthode affectionnée par Frege supposait d'abord qu'il serait possible d'axiomatiser l'arithmétique, ce qui n'avait pas encore été fait. Dans l'effort qu'il fait alors pour isoler les nécessaires notions primitives et les lois fondamentales de l'arithmétique, Frege croit qu'il n'aura pas besoin d'en appeler à des notions particulières ni à des axiomes particuliers qui seraient distincts de ceux de la logique en général. Frege croyait, en ce sens, pouvoir définir tous les concepts et démontrer toutes les lois arithmétiques à l'aide des concepts et des principes qu'il avait déjà identifiés comme étant ceux de la logique. Tel est le sens de la thèse logiciste, une thèse que Russell épousa par la suite mais sous une forme affaiblie. C'est strictement à la version frégréenne de ce programme de recherches que nous allons nous attarder ici.

Il vaut sans doute la peine de relever d'entrée de jeu que Frege n'a jamais généralisé cette thèse pour l'appliquer à l'ensemble des mathématiques : le logicisme ne concerne à proprement parler chez lui que l'analyse (la théorie des nombres réels) et l'arithmétique élémentaire. Frege a, en fait, adhéré toute sa vie

durant à une conception strictement kantienne de la géométrie, c'est-à-dire à la conception selon laquelle la géométrie repose sur des propositions synthétiques *a priori* et non sur des vérités réductibles à celles de la logique. Dans ses *Grundlagen*, Frege tente d'abord et avant tout de répondre aux deux questions suivantes : « Que sont les nombres ? » et « Quelle est la nature spécifique de la vérité mathématique ? » Après avoir en quelque sorte anéanti toutes les conceptions antérieures par ses critiques dévastatrices, Frege entreprend de définir les notions de base de l'arithmétique en termes purement logiques, et il tente de prouver toutes les lois arithmétiques fondamentales en recourant seulement à des principes tirés de la logique, ce qu'il fait en limitant la notation symbolique à l'usage de lettres pour désigner les variables. Mais peu de temps après la publication des *Grundlagen*, Frege prend conscience des déficiences qui minent l'entreprise et entreprend d'y remédier, ce qui donne lieu à la publication des *Grundgesetze der Arithmetik*, une œuvre séminale mais destinée à rester incomplète, le premier volume voyant le jour en 1883, le second en 1903 et le troisième ne voyant jamais le jour. Dans les articles qu'il publie après les *Grundlagen* dans l'espoir d'améliorer son système, Frege développe plus avant ses idées en philosophie de la logique : il élabore en particulier la fameuse distinction entre sens (*Sinn*) et référence (*Bedeutung*), une paire de concepts absolument cruciaux appelée à connaître par la suite, notamment à travers les travaux de Russell, une incomparable notoriété et dont la place centrale dans la philosophie du langage n'est plus à questionner aujourd'hui.

Le système des *Grundgesetze* diffère significativement de celui des *Grundlagen* en étant en particulier beaucoup plus formel : Frege y fait un usage extensif du symbolisme, il a recours à beaucoup plus de règles d'inférence et donc, à proportion, à beaucoup moins d'axiomes, visant ainsi à raccourcir maximale ses preuves formelles. Qui plus est, le système inclut dorénavant la théorie naïve des ensembles, et donc la théorie des classes dans laquelle Russell découvrit le premier une contradiction et dont on fera état plus loin. Le deuxième volume des *Grundgesetze*, dont la publication fut retardée parce que le premier volume n'eut pas, pour utiliser une litote, le retentissement attendu, complète l'analyse frégréenne de la théorie des nombres cardinaux (Frege ne s'occupa pas des nombres ordinaux) et commence d'élaborer une théorie des nombres réels sans passer par l'étape intermédiaire d'une théorie des nombres rationnels. Le concept de « nombre réel » n'est toutefois pas défini dans cet ouvrage, un travail que Frege pensait compléter dans un troisième volume. Mais alors que le second volume était sous presse, Frege reçut une lettre de Russell lui indiquant que son système formel contenait une contradiction. Cela amena Frege à ajouter en toute hâte un appendice dans lequel il croyait solutionner le problème en affaiblissant l'axiome de compréhension de manière à bloquer la dérivation du paradoxe de Russell. Notons pour mémoire que S. Lesniewski prouva après la mort de

Frege que même cette version n'était pas exempte de contradiction. Quoi qu'il en soit, Frege en était venu lui-même à la conclusion que, sous cette interprétation axiomatique affaiblie, il n'était plus possible de prouver le théorème absolument crucial de l'infinité de la série des nombres naturels. En conséquence, le troisième volume des *Grundgesetze* ne fut jamais écrit. En 1923, Frege en vint finalement à la conclusion que le programme logiciste de fonder l'arithmétique sur la logique avait été en fait une erreur de parcours, et il reconnut pleinement que la difficulté qui devait s'avérer fatale à l'entreprise était liée à sa conception des classes : la théorie des ensembles menait inévitablement pour Frege à un cul-de-sac, ce en quoi, par contre, il se trompait lourdement. Pour sa part, Frege allait ouvertement s'en remettre à partir de là à la géométrie pour fonder l'édifice entier des mathématiques : Frege s'était convaincu lui-même du caractère synthétique *a priori* de toutes les vérités mathématiques, une thèse que partageait incidemment Poincaré. Dans le grand livre de l'histoire de la logique, le chapitre du logicisme était définitivement clos.

Éléments de philosophie logiciste

Entrons maintenant un peu plus avant dans ce programme de recherches. Trois thèses fondamentales se trouvent à la base de la démarche philosophique de Frege dans les *Grundlagen*. Frege rejette d'abord le psychologisme : les images qui se trouvent associées dans l'esprit d'un locuteur d'une langue donnée aux divers mots qu'il prononce n'ont rien à voir avec la signification de ces mots. La signification est seulement tributaire du rôle que jouent ces mots dans l'établissement des conditions de vérité des énoncés dans lesquels ils apparaissent. Loin que le sens d'un mot soit l'« idée » qu'il « représente » et qu'une phrase représente un complexe de telles idées associées et combinées entre elles, le sens d'un mot, voire d'une phrase, se ramène à l'usage qu'on en fait en pratique, une idée brillante que Wittgenstein reprendra à son compte pour la développer plus avant. La deuxième thèse coule de source : Frege pose que c'est seulement dans le contexte d'une phrase (ou d'un énoncé) qu'un mot a effectivement un sens, une idée que, là encore, Wittgenstein fera sienne aussi bien dans le *Tractatus* que dans les *Investigations*. La troisième thèse, beaucoup plus technique, concerne la distinction à faire entre concept et objet de même qu'entre concept du premier ordre et concept du second ordre. La notion d'objet est pour Frege corrélatrice à celle de nom propre au sens logique du terme, c'est-à-dire à la notion de ce que l'on appelle plus généralement un « terme singulier ». Suivant la notation conceptuelle utilisant la distinction entre quantificateur et variable, un énoncé peut comporter des prédicats monadiques (à une place d'argument, comme « x est grand » ou « x est poilu », où il suffit de substituer une constante à la variable pour obtenir un énoncé grammatical) ou polyadiques (à plusieurs places d'arguments, par ex., dans le cas des

prédicats relationnels à deux places d'argument du genre « x est le frère de y », qui nécessite deux substitutions pour obtenir une phrase). Dans la perspective frégréenne, un objet est tout simplement le corrélat d'un nom propre logique : les objets sont tout simplement ce dont les noms propres tiennent lieu, qu'il s'agisse, du reste, de choses matérielles comme des corps célestes, d'entités morales comme des personnes ou des institutions, ou encore d'entités abstraites comme des démonstrations de théorèmes, des vitesses accélérées, de points géométriques dans un plan de coordonnées cartésiennes, de l'espace-temps ou des nombres de toutes sortes. Les nombres sont donc, en ce sens, des objets que l'on peut désigner sans problème particulier, comme tout autre objet, et il en va de même des formes, des dimensions, des directions vectorielles, voire des classes d'objets.

Certes, une perspective réaliste aussi libérale soulève la question des critères d'identité des objets que l'on est prêt à admettre ontologiquement, autrement il nous sera très difficile de nous entendre sur le fait que, à point nommé, nous parlions du « même » objet, étant entendu que certains objets pourraient être reconnus comme étant très fugaces et pratiquement insaisissables (par ex. la façon dont je viens d'écrire le mot « fugaces » à l'aide de mon clavier), et étant entendu également que même les objets moins volatils et plus stables sont quand même éminemment changeants et susceptibles de varier d'apparence d'un individu à l'autre. Une élucidation satisfaisante du problème des critères d'identité requiert que l'on distingue deux grandes classes de cas. Dans ses *Investigations*, Wittgenstein s'intéresse à l'une d'elles, nommément la classe des objets qui peuvent être identifiés par ostension, en utilisant en particulier des démonstratifs comme « ceci » ou « cela ». Frege, par contre, s'intéressait plutôt à la classe des objets qui, au contraire, ne peuvent être absolument pas identifiés de cette façon et qui ne peuvent l'être que grâce à un nom propre complexe du genre « la direction de la ligne a » ou encore « la forme de la figure B », ce qui, en l'occurrence, nécessite pour être compris que l'on saisisse bien le sens de l'opérateur géométrique utilisé. Cela dit, s'il est suffisant de pouvoir montrer du doigt ou de référer ostensivement à quelque chose, peu importe quoi, pour reconnaître qu'il s'agit bien là d'un objet à proprement parler, il n'est assurément pas nécessaire qu'il en soit ainsi. Le « pan-objectualisme » de Frege n'a absolument rien de répréhensible en soi, et s'il est vrai que cette prise de position appelle de nombreuses distinctions logiques supplémentaires, toutes plus fines les unes que les autres, la super-catégorie d'objet que nous a léguée Frege est d'un indispensable secours en matière d'ontologie.

Un tel point de vue trouve immédiatement application en philosophie des mathématiques. En effet, pour Frege, tous les termes de nombres (cardinaux) sont ultimement formés par l'opérateur « le nombre de x 's tel que... x ... », opérateur dans lequel les espaces occupés par les trois points doivent être remplis par des

prédicats et non par des noms. Pour Frege, les nombres sont des objets comme tous les autres objets, et l'on dira, en ce sens, que Frege épouse l'ontologie réaliste de Platon en ce qui a trait aux idéalisés mathématiques. Quoi qu'il en soit, il n'y a pas de problème particulier à dire légitimement qu'un certain prédicat s'applique à certains nombres, et une telle approche paraît pouvoir cerner toutes les entités théoriques de l'arithmétique. Par « arithmétique », Frege entend à proprement parler, on l'a dit, les théories des nombres naturels et des nombres réels, et il soutient que tous les énoncés arithmétiques sont déductibles de lois purement logiques, étant entendu que les notions arithmétiques sont elles-mêmes définies sans avoir à en appeler à des notions primitives qui nécessiteraient elles-mêmes pour être comprises d'être réduites à des notions extra-arithmétiques. Cela implique évidemment que tous les énoncés arithmétiques soient prouvables.

Pour parvenir au but qu'il s'est fixé, Frege suppose que les nombres naturels constituent les membres finis de la totalité des nombres cardinaux, à savoir les nombres qui répondent à la question type suivante : « Combien d'objets de telle et telle sorte existe-t-il ? » Frege soutient, à raison, que la bonne réponse à une telle question passe par la réponse : « Il y en a autant que... ». En plus d'exiger que l'on puisse comparer des ensembles d'objets sous le rapport de leur cardinalité, l'arithmétique nécessite également que l'on puisse se référer aux nombres cardinaux eux-mêmes, puisque, dans des énoncés comme « 5 est un nombre premier », « 5 », un terme singulier, joue le rôle d'un nom au sens grammatical du terme et se comporte tout à fait comme ce que nous appelions plus haut un « nom propre ». Frege était d'avis que toutes les expressions numériques devaient être analysées à l'aide de l'opérateur numérique « le nombre de F 's ». Ainsi, l'énoncé « une main humaine comporte normalement 5 doigts » est, pour lui, strictement équivalent à l'énoncé « le nombre de doigts d'une main humaine normale = 5 » où « 5 » est analysé en termes de « autant que 5 » et où « = » dénote la relation d'identité, qu'il faut lire comme signifiant « est le même objet que » (ou simplement comme « est »). Reste alors seulement à définir l'opérateur numérique lui-même. La première condition à satisfaire ici est qu'un énoncé de la forme « Le nombre de F 's = le nombre de G 's » soit équivalent à l'énoncé « Il y a autant de F 's que de G 's ». Il est donc nécessaire de savoir manipuler la notion « autant que » pour répondre à toute question du type « combien y a-t-il de ? ». Qui plus est, on peut assurément dire, en référence à deux ensembles de choses x et y , qu'il y a autant de x 's que de y 's sans pour autant savoir exactement combien de x 's ou de y 's il y a. Ensuite, à la question de savoir « combien de F 's il y a », la réponse peut être inévitablement donnée sous la forme « autant qu'il y a de nombres entre le nombre n et le nombre m ». Dire, dans une certaine situation, qu'il y a autant de F 's que de G 's revient donc strictement à dire, comme l'a clairement établi Cantor très peu de temps avant Frege, qu'« il existe autant de F 's que de G 's si et seulement

s'il existe une relation un à un R entre les F 's et les G 's ». C'est dire que la notion « autant que » est issue d'une quantification de second ordre, portant non pas sur les individus au sens logique du terme mais sur les relations entre individus. Au terme d'une définition considérée comme canonique, on convient alors que l'énoncé « R est une relation un à un » signifie : « pour tous les objets x , y et z , si xRy et xRz , alors y est identique à z , et aussi si yRx et zRx , alors y est identique à z . Et l'énoncé « R met en corrélation les F 's avec les G 's » signifie quant à lui que « pour tout objet x , si x est F , alors pour un certain y , xRy et y est G , de même que pour tout y , si y est G , alors pour un certain x , xRy et x est F ».

Dans cette perspective, définissant le nombre 0 comme le nombre d'objets non identiques avec eux-mêmes et l'expression relationnelle « n est un successeur immédiat de m » comme voulant dire « Pour un certain concept F et un certain objet a , a est un F , n est le nombre de F 's, et m est le nombre d'objets autres que a qui sont F », Frege parvient à exprimer en termes généraux la relation « $n = m + 1$ ». Il lui suffit alors d'appliquer à cette relation la définition donnée dans la *Begriffsschrift* de la notion être l'ancêtre d'une relation pour définir la relation $S^*(n,m)$ voulant dire : « n tombe sous tout concept F tel que m est un F et tel que pour tout j et k , si k est un successeur immédiat de j et j est un F , alors k est un F » (si m est un nombre cardinal fini, alors $S^*(n,m)$ est le cas si et seulement si n est un nombre cardinal fini $\geq m$). Frege peut alors définir « n est un nombre naturel » comme signifiant « $S^*(n,0)$ », considérant, comme Russell du reste, que le principe de l'induction mathématique, loin de constituer un principe d'inférence spécial de la théorie des nombres naturels qu'il faudrait saisir par une sorte d'intuition mathématique *sui generis*, fait intégralement partie de la définition de l'expression « nombre naturel », au sens où les nombres naturels doivent être définis comme étant les objets mêmes pour lesquels l'induction mathématique est valide. Frege réussit de la sorte à dériver toutes les propositions que Peano présentera subséquemment comme les axiomes de la théorie des nombres naturels. Et de tous les théorèmes, le plus important est sans doute celui qui affirme que « tout nombre naturel a un successeur immédiat ».

Difficultés insurmontables

Frege a cru pouvoir ainsi prouver, sur des bases purement logiques, l'existence d'une infinité de nombres distincts. Or, c'est sur ce point précis que le logicisme impose : une analyse purement logique ne saurait tout simplement pas garantir l'existence d'un domaine infini d'objets sur lequel un opérateur comportant les propriétés formelles exigées peut être effectivement défini. Ce n'est donc pas tant la notion frégréenne d'objet qui est incohérente que la conception de la totalité des objets telle que Frege l'a appréhendée pour fonder l'arithmétique. Cette difficulté conceptuelle est liée à la notion de classe (ou d'ensemble) dont

Frege fait un usage extensif, et qui sera radicalement remise en question à la suite de la découverte d'un paradoxe fameux par B. Russell (la correspondance échangée entre Russell et Frege à ce propos est publiée dans l'ouvrage paru sous la direction de J. van Heijenoort, ouvrage mentionné en bibliographie). Exposons schématiquement ce paradoxe. Pour Frege, la notion de classe est synonyme de celle d'« extension d'un concept ». En contexte, les prédicats réfèrent aux concepts, non aux objets. Les concepts, tout comme les prédicats, ont des places d'argument : lors que la place d'argument est occupée par un objet (dans le cas d'un prédicat, cette place est éventuellement occupée par un nom propre), alors le concept remplit pleinement son rôle, alors qu'autrement, Frege le dit « insaturé ». L'extension d'un concept est alors tout simplement un objet associé à ce concept de telle manière que si deux concepts s'appliquent exactement aux mêmes objets, alors il faut considérer qu'ils ont très exactement la même extension. Pour Russell, la construction théorique de Frege mène droit à une contradiction, qu'il a tôt fait de débusquer. Frege semble en effet commis à dire qu'à toute propriété correspond une certaine classe d'objets. On devra donc considérer, construction oblige, que certaines classes dénotent les objets qui ont la propriété d'être éléments d'elles-mêmes (par ex., la classe des carrés formant un damier est elle-même un carré), et d'autres pas (la classe des pions n'est pas elle-même un pion). Soit W la classe de toutes les classes qui ne sont pas éléments d'elles-mêmes. W est-elle élément d'elle-même ? Le paradoxe logique semble ici inévitable : car si W est un élément de W , alors cette classe est élément de la classe de toutes les classes qui ne sont pas éléments d'elles-mêmes. Dans ce cas, W n'est pas élément d'elle-même. Si, au contraire, W n'est pas un élément de W , alors elle n'est pas un élément de la classe de toutes les classes qui ne sont pas éléments d'elles-mêmes. Dans ce cas, W est élément d'elle-même. Autrement dit, nous obtenons ici un paradoxe au sens strict et technique puisque, si W est élément d'elle-même, alors elle n'est pas élément d'elle-même et que, si W n'est pas élément d'elle-même, alors elle est élément d'elle-même. Selon Russell, du reste, tous les paradoxes logiques admettent malencontreusement le principe du cercle vicieux, c'est-à-dire qu'ils portent sur une totalité T dont les éléments sont définis en termes de T . Pour éviter les paradoxes, il faudra donc se donner des méthodes de construction logique beaucoup plus prudente : Russell proposera quant à lui la théorie des types, qui contient une règle de formation des énoncés dénotant une relation d'appartenance et selon laquelle, justement, aucune totalité T ne doit contenir d'éléments qui soient définis à l'aide d'elle-même. Par ailleurs, plusieurs axiomatisations consistantes de la théorie des ensembles ont été avancées par la suite, notamment celle de Zermelo-Fraenkel, et il n'y a plus aucune espèce de problème à considérer aujourd'hui que les mathématiques modernes les plus abstraites y trouvent

un fondement très sûr puisque l'absence de contradiction en est acquise.

Mais alors, pourquoi faut-il considérer que, comme tel, le logicisme ne parvient pas à ses fins ? On a prétendu que Frege échouait à réduire l'arithmétique à la logique puisqu'il recourait à une notion non logique au sens strict, à savoir la notion de classe. Ce n'est pas l'avis de M. Dummett, pour qui cette critique est superficielle et rate l'essentiel. Incidemment, Frege n'utilise qu'une notion très faible de classe dans les *Grundlagen*. Certes, il est vrai de dire que même cette conception minimaliste prête le flanc au paradoxe de Russell. Quoi qu'il en soit, il n'est pas très fertile, de toute manière, de se demander ultimement si la notion de classe est d'ordre logique ou d'ordre mathématique, à moins de s'être entendu au préalable sur les critères d'identité régissant les notions de l'une et les notions de l'autre. Mais au-delà de cette préoccupation peut-être un peu vaine, la véritable pierre d'achoppement du logicisme selon Dummett est liée au fait que la supposition faite par Frege qu'une certaine classe de termes (les expressions numériques) peut être formée et traitée comme si elle référerait bel et bien à des objets (les nombres) constitue à n'en pas douter une conjecture existentielle : qu'il existe un nombre infini dénombrable de tels objets constitue effectivement une supposition ontologique, certes minimale, mais dont Frege fait usage dans les *Grundlagen*, et il s'agit donc, par définition, d'une supposition qui peut difficilement être reçue comme relevant de la logique *simpliciter*.

Que conclure de cet épisode de l'histoire de la philosophie des sciences ? Frege était d'avis que, pour asseoir les mathématiques sur des fondements solides, il suffirait d'en élucider et d'en justifier adéquatement les axiomes de base. En cela il n'avait sans doute pas tort, et la théorie axiomatique des ensembles s'est correctement acquittée de cette tâche par la suite. Les très importants travaux de Frege, malgré l'échec patent du logicisme, auront malgré tout permis aussi bien à la logique, à la philosophie de la logique qu'à la philosophie des mathématiques d'être relancées sur la voie du progrès fondationnel. Une analyse plus complète nécessiterait que l'on contraste le programme logiciste avec ses concurrents, et en particulier le formalisme de Hilbert et l'intuitionnisme de Brouwer, qui ne sont pas non plus exempts de difficultés propres, comme la suite des événements l'a fait voir. Cette courte analyse du programme logiciste aura néanmoins permis d'apercevoir, d'une part, l'inanité de l'opération qui consiste à quantifier sur un domaine infini et, d'autre part, l'illégitimité de la bivalence (logique à deux valeurs, le vrai et le faux) dans un tel contexte de quantification, deux façons de faire qui ne parurent jamais faire problème pour Frege, mais deux objets de préoccupation qui allaient pourtant marquer très profondément l'histoire ultérieure de la logique contemporaine. Un dernier mot s'impose pour conclure. Si Frege fut méconnu et peu célébré de son vivant, il eut en revanche la chance de voir trois figures majeures de la philosophie du XX^e s. — Edmund Husserl, Bertrand Russell et Ludwig

Wittgenstein — s'intéresser de très près à ses travaux et le rendre à tout jamais célèbre par leurs remarquables discussions. Un philosophe peut difficilement en demander davantage.

► ANSCOMBE G.E. & GEACH P., *Three Philosophers*, Oxford, 1961. — BENACERRAF P. & PUTNAM H. dir., *Philosophy of Mathematics. Selected Readings*, Cambridge (G.-B.), Cambridge Univ. Press, 2^e éd., 1983. — BERNAYS P., « Sur le Platonisme dans les mathématiques », *L'Enseignement mathématique*, vol. 34, 1935, p. 52-69. — BLANCHE R. & DUBUCS J., *La Logique et son histoire : d'Aristote à Russell*, Paris, A. Colin « U », 2^e éd., 1996. — CANTOR G., *Gesammelte Abhandlungen mathematischen und philosophischen Inhalts*, E. Zermelo, H. Hirsch, Berlin, 1932 (rééd., Berlin, Springer, 1980). — CARNAP R., « Dialogizistische Grundlegung der Mathematik », *Erkenntnis*, vol. 2, 1931, p. 91-105. — DEDEKIND R., *Was sind und was sollen die Zahlen ?*, Braunschweig, 1888 (cf. *Gesammelte mathematische Werke*, éd. R. Fricke, New York, Chelsea Publ., 1969). — DUMMETT M., *The Interpretation of Frege's Philosophy*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1981 ; *Frege and other philosophers*, Oxford, Clarendon Press, 1991. — FREGE G., *Begriffsschrift, eine der Arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*, Halle, 1879 ; *Die Grundlagen der Arithmetik. Eine logisch-mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl*, Breslau, 1884, rééd., Stuttgart, P. Reclam, 1987 (trad. fr. et introd. C. Imbert, *Les fondements de l'arithmétique*, Paris, Le Seuil, 1969) ; *Grundsätze der Arithmetik, Begriffsschriftlich abgeleitet*, Iena, 2 vol., 1883-1903 (réimpr., Hildesheim, Georg Olms Verlag, 1962). — HEMPEL C.G., « On the Nature of Mathematical truth », *American Mathematical Monthly*, vol. 52, 1945, p. 543-556. — HINTIKKA J., *Fondements d'une théorie du langage*, Paris, PUF, 1994. — HUSSERL E., *Philosophie der arithmetik : mit ergänzen den Texten (1890-1901)*, rééd. *Husserliana : Gesammelte Werke*, auf grund des nachlasses veröffentlicht vom Husserl-Archiv (Louvain), unter Leitung von H.L. van Breda, 1950, La Haye, M. Nijhoff, vol. 12, 1970 (trad. fr. avec notes, remarques et index J. English, *Philosophie de l'arithmétique : recherches psychologiques et logiques. Sur le concept de nombre*, Paris, PUF « Épiméthée », 1972) ; *Logische Untersuchungen*, Halle, 2 vol., 1900-1903, rééd. *Husserliana : Gesammelte Werke* ; trad. fr. H. Élie, L. Arion & R. Scherer, *Recherches logiques*, Paris, 1959-1963, rééd., 1991. — KNEALE W. & KNEALE M., *The Development of Logic*, Oxford, 1962 (chap. 8). — LARGEAULT J., *Logique et philosophie chez Frege*, Louvain, Nauwelaerts « Publ. de la Fac. des lettres et sciences humaines de Paris-Sorbonne », 1970 ; *Logique mathématique. Textes*, Paris, A. Colin, 1972. — LE LIONNAIS F. dir., *Les Grands Courants de la pensée mathématique*, Paris, Blanchard, 2^e éd., 1971. — PEANO G., *Arithmetices principia nova methodo exposita*, Rome, 1889 (cf. *Selected works of G. Peano*, trad. angl. avec notice biographique et bibliogr. H.C. Kennedy, Toronto, Univ. of Toronto Press, 1973). — POINCARÉ H., « Les mathématiques et la logique », *Revue de Métaphysique et de Morale*, vol. 14, 1906, p. 17-34 ; *Science et méthode*, Paris, Flammarion « Bibliothèque de philosophie scientifique », 1922. — QUINE W.V.O., « On Frege's Way Out », *Mind*, vol. 64, 1955, p. 145-159 ; *Mathematical Logic*, 2^e éd. rev., Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1965 (© 1951) ; *Set Theory and Its Logic*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1963. — RIVENC F. & ROUILHAN P. DE dir., *Logique et fondements des mathématiques. Anthologie [1850-1914]*, Paris, Payot, 1992. — RUSSELL B., *Introduction to Mathematical Philosophy*, Londres, Allen & Unwin, 1919 (2^e éd., 1920 ; trad. fr. avec avant-propos et notes F. Rivenc, Paris, Payot « Bibliothèque philosophique », 1991) ; *The Principles of Mathematics*, Cambridge, 1903 (Appendix A, « The Logical and Arithmetical

Doctrines of Frege », 2^e éd., Londres, G. & Unwin, 1964). — VAN HEIJENOORT J. dir., *From Frege to Gödel. A Source Book in Mathematical Logic, 1879-1931*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 2^e éd., 1971. — WAISMANN F., *Introduction to Mathematical Thinking : the Formation of Concepts in Modern Mathematics*, préf. K. Menger, New York, 1951 (titre orig. allemand : *Einführung in das mathematische Denken*, trad. angl. T.J. Benac, New York, F. Ungar, 1951). — WANG H., *From Mathematics to Philosophy*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1974. — WELLS R.E., « Frege's Ontology », *Review of Metaphysics*, vol. 4, 1951, p. 537-573. — WHITEHEAD A.N. & RUSSELL B., *Principia Mathematica*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 3 vol., 1910-1913 (2^e éd., 1925-1927, réimpr., 1959). — WITTGENSTEIN L., « Bemerkungen über die Grundlagen der Mathematik », in ANSCOMBE G.E., WRIGHT G.H. VON & RHEES R. dir., *Remarks on the foundations of mathematics*, Oxford, Blackwell, 2^e éd., 1967 (trad. fr. M.-A. Lescouret, *Remarques sur les fondements des mathématiques*, Paris, Gallimard, 1983).

Robert NADEAU

→ Axiomatisation et formalisation ; Frege ; Induction ; Proposition ; Russell ; Vérité.

LOGIQUE ET INFORMATIQUE

L'informatique, ou science des ordinateurs, a ses racines en logique, en particulier dans la logique mathématique de ce siècle. Plus précisément, la recherche de rigueur en mathématiques (et dans le raisonnement) va de pair, au cours des trois derniers siècles, avec l'histoire de la logique, mais aussi avec l'histoire de la simulation mécanique des activités humaines (y compris la pensée).

Les mathématiques grecques faisaient un grand usage des images : thôcorème, en grec, veut dire « voir », « spectacle ». Il s'agissait d'images platoniciennes, « visions » de formes immuables, des idées, mais aussi de constructions par figures, faites avec la règle et le compas, démonstrations construites sur le sable, le feu, par des méthodes diverses. L'unité axiomatique d'Euclide n'est que partielle et ouverte à une pluralité de techniques de preuve ; les déductions font appel à l'intuition à différents endroits.

Chez Descartes, l'analyse de la déduction mathématique fait partie de celle du raisonnement ; la méthode cartésienne part des intuitions claires et distinctes et se développe par l'énumération pas à pas d'une chaîne ininterrompue d'évidences (*Regulae ad directionem ingenii*, 1629). Dans les *Regulae*, Descartes s'approche aux mathématiciens grecs l'absence d'une méthode uniforme de déduction, l'utilisation d'artifices parfois obscurs et ambigus, souvent dépourvus de généralité. La géométrie, sous son impulsion, se transforme partiellement en calcul, dans le langage de l'algèbre : la preuve géométrique est donnée grâce à l'encadrement des figures sous les axes cartésiens ; sa certitude et sa généralité sont données par celles des pas élémentaires du calcul des équations algébriques.

Pascal soulignera explicitement, dans la définition de ce qu'est la rigueur mathématique, le rôle du

langage. C'est dans le langage que l'on donne des règles pour les définitions, les axiomes et les démonstrations (*Esprit géométrique, Art de persuader, 1654-1658*). Pour Hobbes, on compose les idées, les concepts, en fait les noms, à partir des plus simples : « Par raisonnement j'entends calcul... tout raisonnement se base sur ces deux opérations de l'esprit, la somme, la soustraction » (*Computatio sive Logica, in De Corpore, 1655*). La connaissance est en effet dans les noms, pour ce nominaliste anglais, ainsi que dans la « manipulation » des mots et des concepts auxquels ils sont rattachés.

La philosophie de Leibniz est un autre passage obligé pour cette brève histoire du « raisonnement rigoureux comme calcul dans un langage (symbolique) ». origine historique et philosophique de l'informatique. Le philosophe allemand, vrai précurseur de la logique formelle moderne, considère Hobbes comme un de ses plus importants inspirateurs, car « [Hobbes] a affirmé que toute opération de notre esprit est un calcul. En fait, pour Leibniz le raisonnement doit être formalisé dans une *lingua characteristica* (l'« idéographie logique » de *De Arte Combinatoria, 1666*), forme générale de la pensée, mathématisée si possible, *calculus ratiocinator*, une *mathesis* universelle. Il souligne les insuffisances de la méthode cartésienne, qui est essentiellement psychologique et rejette toute utilisation de la logique. Voilà le projet de l'entendement sous sa nouvelle forme de rigueur logico-linguistique qui commence à se préciser. Mais les formalismes pour calculer et déduire de Leibniz sont toujours riches en signification : les mots, les symboles de la *lingua characteristica* se réfèrent toujours à « quelque chose ». Quant aux mathématiques, pour Leibniz, elles sont d'abord un « ars demonstrandi », fondé sur la logique. En fait, le XVIII^e s. est l'époque de la naissance du calcul infinitésimal, auquel Leibniz contribue grandement. La certitude du fini est perdue, le regard dans l'espace des Grecs ne suffit plus, ni l'intuition des vérités claires et distinctes de Descartes : il faut une nouvelle rigueur pour trouver des certitudes face à l'explosion conceptuelle des mathématiques, face à la manipulation de l'infini en acte, des limites, du continu. Selon certains historiens, cette exigence de rigueur, qui grandit avec la croissance du corpus mathématique, est à l'origine des innovations de Leibniz en logique, en particulier pour l'importance qu'il accorde aux « bonnes notations (formelles) » en mathématiques.

L'analyse de l'entendement comme calcul va de pair aussi avec les théories mécanicistes et, en fait, avec les mécanismes fantastiques de l'époque. Les horloges, les automates du XVIII^e et du XIX^e s. sont des machines merveilleuses. Ils sont aussi mécaniques que le raisonnement certain, celui qui se déroule pas à pas, comme calcul algébrique ou logique. Le clavecin est comme le logicien, le logicien comme le clavecin, pour d'Alembert et Diderot ; ou l'homme, dans l'acte de la pensée, à la même mécanique que l'instrument musical. Toutefois, au début du XIX^e s., la « pratique » des mathéma-

tiques reste encore incertaine : les notions d'infini, de limite, de continu sont encore floues. Beaucoup d'inventions, mais aussi de désaccords et d'incertitudes : on donne encore des preuves incomplètes ou erronées (Cauchy, par exemple, dans les preuves du théorème des valeurs intermédiaires (1821) et de la continuité de la somme d'une série de fonctions uniformément continues, n'explique pas clairement les hypothèses, en fait la définition de (uniforme) continuité ; Poincaré croit avoir démontré que toute fonction continue est différentiable). Malgré les efforts de clarification (Pascal, Leibniz...), les mathématiciens ne paraissent pas savoir ce que c'est qu'une « bonne définition ». En fait, on continue à faire confiance au regard dans l'espace, sur le plan, sur le feuillet, comme le fait Cauchy dans ses preuves ou Gauss et maints autres : il y a encore l'intuition du « voir », malgré les certitudes qui émanent du raisonnement logique et les succès des automates, ces machines logiques, dans les salons et dans l'industrie. Le fondement de l'algèbre est (encore) dans la géométrie : on interprète même l'unité imaginaire $i = \sqrt{-1}$ et les nombres complexes, dont l'existence est une conséquence de la manipulation algébrique, sur le plan cartésien (Argand-Gauss). Mais comment faire pour manier avec certitude les concepts difficiles d'infini en acte et de continu, désormais omniprésents en mathématiques ? Il faudra attendre Weierstrass (1861) et, plus encore, Dedekind et Cantor (1873-1880) pour arriver à reconstruire le continu, son infinité, ses opérations de limite, à partir du discret, de façon algébrique, représentation du continu intuitif de l'espace par la rigueur du discret linguistique des nombres entiers.

Les héritiers du nominalisme outre-Manche s'y prennent autrement. Pour Woodhouse, chef de file des algébristes anglais, la certitude est dans la manipulation « mécanique » des symboles algébriques (1801). Voilà donc Boole et son algèbre de la logique (*Le calcul du raisonnement déductif, 1847 ; Les lois de la pensée, 1854*) : la logique est une sorte d'arithmétique binaire. Et Babbage, un mathématicien de la même école, avec ses machines analytiques. L'algèbre et le calcul déductif sont dans la machine, dans les engrenages mus par la puissance de la vapeur. Des vraies machines à penser. Encore des « automates », mais qui permettent de résoudre des équations différentielles. Plus tard, en développant une idée de Babbage, on ajoutera une certaine flexibilité à ce matériel (*hardware*) rigide : des fiches en carton, remplaçables, permettront d'utiliser les mêmes engrenages pour des tâches différentes.

La crise de la géométrie : de Gauss à Hilbert

Les mathématiciens du continent aussi durent bientôt revoir les fondements de leurs certitudes mathématiques. Lobatchevski, Bolyai et Riemann, entre 1835 et 1850, proposent les géométries non euclidiennes, fondées sur les deux négations logiquement

possibles du cinquième axiome d'Euclide. Ils montrent donc que l'espace n'est pas si certain, canonique, unique : il n'y a pas une « intuition pure de l'espace en soi », en tant que variété euclidienne. Gauss les avait précédés de quelques années, mais il n'avait pas osé croire à ce bouleversement de l'intuition géométrique ou l'exprimer.

Il ne reste alors que le langage, bien au-delà des intuitions de Leibniz, comme fondement certain des mathématiques. Pourvu qu'il soit basé sur une logique, sur la logique. G. Frege fonde les mathématiques sur un calcul logique extrêmement puissant. Il propose (*Idéographie, 1879 ; Fond. de l'Arithmétique, 1884*) un langage logique, décrit avec la rigueur formelle qui sera la nôtre et dit du « premier ordre », pour la quantification des variables individuelles, les « pour tout x » et « il existe x » utilisés si mal dans le langage commun, si souvent informellement importé dans la pratique mathématique. Pour Frege, le calcul arithmétique, cœur des mathématiques, est une déduction logique dans un système logique du premier ordre ; le fondement et la signification du calcul algébrique sont dans la logique.

D. Hilbert, au contraire, ne veut donner aucun rôle au sens, dans la déduction : la certitude du calcul est dans l'absence de signification. La manipulation de suites finies de symboles par des règles entièrement formalisées donne au langage mathématique la certitude et le fondement, elle exprime et garantit l'invariance et la stabilité des concepts mathématiques, elle les soustrait aux ambiguïtés sémantiques, aux incertitudes et aux paradoxes de l'infini. Plus précisément, certitude et fondement doivent se baser sur des preuves de cohérence ou d'absence de contradiction formelle (1900). Ces preuves doivent être données dans une mathématique qui travaille sur les mathématiques (les métamathématiques). La métathéorie est décrite dans un métalangage qui permet de parler du langage objet propre aux mathématiques. Dans son programme fondationnel, Hilbert conjecture que l'on pourra démontrer aussi la décidabilité et la complétude (tout énoncé ou sa négation est démontrable) des axiomatiques formelles (des équations entre signes, des règles de déduction comme réécriture ou transformation de suites de signes dans d'autres) adoptées pour les différentes branches des mathématiques. En fait, Hilbert reprend en logique l'hypothèse de Laplace sur la prédictibilité en physique : les théories formelles des mathématiques permettent de « recouvrir complètement » et « décider » les propriétés des structures mathématiques, exactement comme les mathématiques de Laplace devaient « recouvrir » ou « prévoir » (décider dans l'espace et le temps) l'évolution des structures physiques. Les systèmes (axiomatiques) de signes pourront donc décrire complètement le monde (des mathématiques, la géométrie en particulier). Après avoir détaché le langage et ses signes du sens le siècle est prêt pour des machines à penser, manipulatrices de symboles sans signification.

La déduction effective et la calculabilité

Au cours des années 1930, les logiciens arrivent à préciser la notion hilbertienne de déduction formelle comme « procédure effective ». On donne dans ce but différentes notions de fonction calculable ou algorithmique et on code les formules du langage par les nombres entiers (la gôdélisation). Or, dans une théorie (formelle), les notions de formule et de démonstration, comme déductions pas à pas d'une formule à l'autre, sont métathéoriques, tandis que les nombres et les fonctions sont normalement décrits dans la théorie. Grâce à la gôdélisation, vraie percée de K. Gödel, toute démonstration (métathéorique) devient alors une fonction (théorique). Une fois fixé un langage formel, il faut d'abord coder par des nombres entiers les axiomes ; alors la transformation qui va des axiomes (codés) à la thèse (un autre énoncé formel codé), en fait la démonstration, est un algorithme ou fonction récursive (J. Herbrand et K. Gödel, 1930 et 1931) ou lambda-calculable (Church, 1932), qui va des axiomes aux thèses (codés), entièrement définie par les règles de déduction du système formel, sous forme d'équations et de règles de réécriture. Si l'entendement humain est déduction logique, on est presque arrivé à la mécanisation de la pensée : manquent seulement les machines pour réaliser pratiquement ces algorithmes. Toutefois, c'est exactement la puissance expressive du codage et de la déductibilité formelle comme calculabilité qui permet de démontrer les limites de la déduction formelle/mécanique. Dans le *Théorème d'incomplétude* de 1931, Gödel (voir Girard, 1989, pour le texte de Gödel et une discussion), grâce au codage, démontre que l'on peut transférer dans l'arithmétique elle-même toutes les procédures logiques et finitaires de preuve (comme fonctions calculables). En particulier, en codant dans la théorie la phrase métathéorique « cette phrase n'est pas démontrable » (G, disons), Gödel démontre que, si l'arithmétique est cohérente, on ne peut pas... démontrer G (ni sa négation). Par conséquent, l'arithmétique formelle, sur laquelle Frege et Hilbert avaient fondé l'édifice des mathématiques, n'est pas complète, ni décidable ; on ne peut pas en démontrer la cohérence non plus, car l'énoncé de la cohérence et le fait qu'elle implique G sont aussi codables. Le programme de Hilbert échoue ainsi que son rêve de mécanisation « en principe » des mathématiques. Toutefois, l'informatique moderne naît, car deux autres percées fondamentales voient le jour.

En 1936, A. Turing arrive à concevoir des machines qui manipulent des suites de symboles sans signification : les machines de Turing sont des machines mathématiques, pures abstractions conceptuelles sans contrepartie physique, mais bien plus « concrètes » des fonctions calculables. Il les construit en reprenant à l'intérieur de son système la distinction entre langage et métalangage et entre syntaxe et sémantique (symbole et signification) : elles se basent sur une distinction cruciale entre *hardware* et *software* (matériel et logiciel). Le matériel est une bande (potentiellement

infinie) sur laquelle une tête d'écriture/lecture inscrit/efface/lit des symboles. Dans son logiciel, fondé sur un langage très simple, Turing écrit des programmes, pour l'écriture/lecture de la tête et son mouvement, un pas à droite ou un pas à gauche. Il utilise aussi l'idée du codage de Gödel pour imaginer un programme qui exécute les calculs de n'importe quel autre programme, une fois codé comme nombre : sa machine universelle est un compilateur, dans la terminologie informatique contemporaine, elle reçoit comme argument un programme (codé) et un nombre, décode le premier et l'applique au deuxième. Encore une fois, ce travail est motivé par la logique : Turing étudiait dans son article le problème de la décidabilité des théories logiques posé par Hilbert.

L'autre grand résultat de 1936-1937, dû à Kleene et Turing, est l'équivalence entre toutes les différentes approches du calcul déductif. Résultat très surprenant, car rien ne pouvait garantir que des systèmes si divers auraient permis de définir exactement la même classe de fonctions. Si cela confirmait le caractère « absolu » du théorème d'incomplétude de Gödel (sa notion de preuve finitaire ou algorithmique était donc tout à fait générale, car invariante par rapport au formalisme), il convainquit les logiciens qu'ils avaient touché à un vrai absolu : la notion définitive de calcul et déduction effectifs. Les machines de Turing étaient enfin les vraies machines à penser dont on rêvait depuis des siècles ! Et, même si le théorème d'incomplétude de Gödel démontrait les limites de la déduction formelle, ces limites devaient être propres aussi à l'homme, le *human computer* dans l'acte de la déduction logique. C'est au moins ce que pensaient et pensent maints logiciens (les formalistes au moins), tandis que certains d'entre eux (Gödel, par exemple) et la plupart des mathématiciens ont préféré plutôt croire à l'existence de vérités mathématiques, inaccessibles aux systèmes formels, auxquelles l'esprit humain a un accès direct (un platonisme plus ou moins naïf, encore aujourd'hui très répandu).

Voilà donc un itinéraire possible de l'analyse de la rationalité humaine : de l'énumération pas à pas du raisonnement cartésien, développement de l'intuition spatiale, aux langages riches de signification géométrique ou logique de Leibniz, Boole et Frege, aux purs calculs de symboles sans signification de Hilbert et Turing, mouvement à gauche et à droite d'une machine pour écrire/effacer des 0 et des 1. La rationalité, une fois restreinte et codée dans le langage, ensuite détachée de la signification, est enfin réifiée dans une machine. Ces machines, les ordinateurs, qui ont changé notre vie.

Évidemment, d'autres parcours étaient possibles. Même à l'intérieur du débat sur les fondements des mathématiques, Riemann, Mach et Poincaré et d'autres, entre 1850 et le début de ce siècle, cherchent ces fondements dans notre action dans le monde sensible, dans la vision et le mouvement, bases de la géométrie, et dans l'intuition de l'ordre et de l'induction, fondements de l'arithmétique. Mais leurs intuitions philosophiques, aussi vagues que profondes, ont été

balayées, dans ce siècle, par la rigueur et la force de l'analyse conceptuelle de Frege, par la précision des propositions mathématiques de Hilbert. Les (méta)mathématiques de ce dernier ont su en fait nous donner une notion de rigueur mathématique bien solide, la rigueur formelle, indépendante de la signification, et des machines extraordinaires.

L'intelligence et les machines

Au cours des années 1940, Turing et un autre logicien, J. von Neumann, réaliseront les premiers ordinateurs électroniques. En 1950, Turing propose un « jeu de l'imitation », dans lequel on n'arriverait pas à distinguer un être humain d'un ordinateur (voir Turing-Girard, 1995) ; son article est considéré comme le point de départ de l'intelligence artificielle (IA). Turing fait de nombreuses hypothèses, avec beaucoup de prudence : le jeu comporte seulement des manipulations de symboles discrets, car sa machine est à « états discrets », donc même « si le système nerveux n'en est certainement pas une », le jeu compare ce qui est codable, dans l'intelligence humaine, par des systèmes finitaires (discrets). L'IA, dans sa version « forte », et le fonctionnalisme (dans sa forme logico-computationnelle) feront de l'hypothèse du codage le socle sur lequel construire machines et thèses philosophiques. En fait, pour les logiciens formalistes, les systèmes et calculs formels peuvent seulement « reconstruire », *a posteriori*, le corpus mathématique, bâti par les nombreux chemins possibles de la créativité ; en IA on va plus loin : c'est toute notre intelligence du monde qui procède par des calculs logiques, puisque « l'intelligence... est définie exactement comme ce qui peut se manifester par la communication de symboles discrets » (Hodges, in Herken, 1992), et on peut enfin « tirer au clair le fonctionnement de l'esprit en le considérant comme calcul » (Johnson-Laird, 1993).

D'autres philosophies de la connaissance ont en train de se préciser, autour ou au-delà des ordinateurs d'aujourd'hui. Pour les connexionnistes, les « réseaux de neurones » mathématiques (voir Hertz, 1991) simulent la plasticité, le continu, le flou du système nerveux, mais ces réseaux ne sont pas encore de vraies machines, même si des ordinateurs, les « connexions machines », en particulier, peuvent en réaliser certains modèles. D'autres encore envisagent plutôt une revivification des intuitions de Riemann, Mach ou Poincaré.

Les architectures et les algorithmes

Mais revenons à la structure physique des ordinateurs de Turing et von Neumann. Ces machines n'ont plus rien à voir avec les « automates » du passé, de Vaucanson à Babbage, car leur performance n'est plus entièrement inscrite dans les engrenages : la distinction entre logiciel et matériel les rend programmables, en fait « universelles » comme la machine de Turing. Deuxièmement, leurs circuits électroniques réalisent la logique binaire de Boole, en simplifiant grandement les

tâches trop élémentaires du « matériel » abstrait de Turing : les portes logiques des circuits sont exactement des combinaisons des « and » et « or » booléens. L'architecture de ces nouvelles machines se développe donc rapidement, en empruntant des outils de la physique, mais suivant d'abord les lignes directrices proposées par la logique : Boole (les circuits), Turing (la structure séquentielle), von Neumann (les « random access machines »). Dans les décennies suivantes, le mariage entre logique et physique continuera quant aux architectures, mais, tout récemment, la physique a posé des défis entièrement nouveaux : on y reviendra.

Un autre grand secteur disciplinaire de l'informatique concerne les algorithmes (voir Van Leeuwen, 1990). Encore une fois, les algorithmes pour la programmation et la solution des problèmes mécanisables se fondent sur les différentes classes de calculs formels définies dans les années 1930, auxquels se sont ajoutés d'autres systèmes (Post, Markov...), encore une fois formellement équivalents. Un problème crucial de l'algorithmique est celui de la complexité de calcul : quelle est la quantité de ressource (espace de mémoire ou temps, par exemple) nécessaire pour faire un calcul ? La théorie de la complexité computationnelle a utilisé quelques idées de la logique (les tableaux de vérité du calcul propositionnel, par exemple), mais surtout des outils des mathématiques discrètes ou combinatoires, souvent originaux. Même la théorie des nombres a fait son entrée massive dans le domaine, en raison surtout de la cryptographie, ou théorie de la « communication et mémorisation de données en présence d'adversaires », codage de messages rendus impénétrables par la complexité algorithmique du décodage.

Les langages

Les algorithmes qui fonctionnent sur des architectures ont besoin d'être décrits dans des langages. Dans le cas des langages de programmation, en fait formels, non seulement l'origine, mais aussi leurs développements sont marqués par la logique.

Les travaux de Curry (1929) et Church (1932) constituent le fondement de la programmation fonctionnelle. Curry propose un calcul logique ou combinatoire, la logique combinatoire : deux seuls symboles K et S, régés par deux axiomes (deux équations), engendrent une algèbre extrêmement puissante. Par ces manipulations sans signification on pourra calculer, modulo un codage des nombres par des suites de K et S, toutes les fonctions récursives (les résultats d'équivalence de 1936-1937). Church invente un système de notations logiques pour les fonctions mathématiques (le λ -calcul) : une règle explicite de réécriture (« dans $f(x,y)$, remplace la variable x par la lettre a ») suffit encore une fois à calculer toutes les fonctions Turing-programmables. En fait, l'équivalence entre machines de Turing et les fonctions récursives de Herbrand et Gödel sera démontrée en passant par le λ -calcul, par des méthodes qui en feront l'ancêtre du

LISP (1960), Scheme et ML, des langages fonctionnels de programmation bien connus. D'autre part, Herbrand, en 1930, définit un « modèle minimal » pour la quantification logique, fondé sur la syntaxe. Une démonstration devient alors un contrôle de vérité sur des « instances », dans ce modèle. Ce résultat a posé les bases mathématiques de la programmation logique.

Avec les machines de Turing on passe des notations mathématiques à la programmation d'un calcul sur un support « matériel ». Les règles qui constituent le « logiciel » sont des vraies instructions, les ordres de ce qui deviendra la programmation impérative : les « go to... », « do... until » du Fortran et de maints autres langages.

Parmi ces trois styles de programmation (fonctionnel, logique et impératif), qui ont caractérisé une grande partie de la programmation jusqu'à nos jours, les deux premiers ont continué à avoir des interactions importantes avec la logique. En programmation fonctionnelle, en particulier, si un programme prend comme arguments des éléments de l'ensemble A et donne des valeurs dans B, on dira qu'il est de « type » $A \rightarrow B$, ou qu'il calcule une fonction f de A dans B. Donc on peut considérer ce $A \rightarrow B$ comme un ensemble de programmes (ou de fonctions), mais aussi comme implication logique, « A implique B », car ces programmes, ces calculs en fait, sont des preuves de propositions logiques, on l'a vu. Autrement dit, f est aussi une preuve qui prend toute preuve de A, où A est maintenant à considérer comme un prédicat, et la transforme dans une preuve de B. Mais alors f est une preuve de l'implication logique $A \rightarrow B$ (cette interprétation fonctionnelle de l'implication « \rightarrow » est une version intuitionniste de la logique). Voilà donc comme A, B, ($A \rightarrow B$) sont des types (des ensembles de données informatiques), mais aussi des propositions. Et f est (le nom de) un programme, mais aussi une fonction et une preuve.

Mais il y a en mathématiques une autre « théorie des fonctions » qui intéresse les informaticiens : la théorie des catégories. Elle ne demande, pour commencer, que des objets, A, B, ... et des morphismes $f : A \rightarrow B$ entre objets, qui se composent et contiennent l'identité. Une autre « analogie », qui s'ajoute à la précédente, entre différentes structures logico-mathématiques. Ces analogies sont profondes et donnent en fait des « isomorphismes » bien précis entre types, propositions et objets, dans le sens de la théorie des catégories. En bref : système fonctionnel = système déductif = catégorie. Ces correspondances mathématiques permettent de démontrer ou utiliser des résultats dans un des systèmes et de les transférer dans un autre. Par exemple, des démonstrations sur les termes typés prouvent la terminaison pour certains calculs en programmation par des méthodes « d'élimination des coupures », une sorte de preuve de « pureté de méthodes » en logique : on peut éliminer, dans les preuves, tout ce qui n'est pas explicitement utilisé dans la thèse. En plus, les structures catégoriques donnent des modèles, c'est-à-dire des interprétations des systèmes formels qui enrichissent les

langages de structures et... d'idées. Une propriété des modèles, qui n'est pas démontrable dans le langage, peut suggérer des extensions du langage (par exemple les définitions récursives dans le langage M_L d'Édimbourg, suggérées ou permises par la sémantique sur des domaines « à la Scott »). Mais l'interprétation peut suggérer des variantes des systèmes de départ : en étudiant des modèles d'une extension du λ -calcul de Church, J.-Y. Girard a pu concevoir un système différent des logiques classiques et intuitionnistes (la logique linéaire), car ces modèles contiennent des fonctions « linéaires ». Et encore : puisque les preuves sont des programmes (et vice versa), alors une déduction, pas à pas, est une synthèse de programmes. À l'inverse, un programme développe une preuve : voilà un outil essentiel à la démonstration automatique. Si, en revanche, on part avec des termes ou des programmes sans types, c'est une déduction qui leur « donne » des types. Cette dernière technique fournit un contrôle efficace, quoique partiel, de la correction d'un programme, comparable au « contrôle de dimension » des équations en physique : si le programme est « typable », il est presque sûrement « correct », comme en physique, si dans une équation à la fin d'un calcul la dimension est préservée, le calcul a de bonnes chances d'être bien fait. Toutefois, en λ -calcul et dans certains langages de programmation (le LISP, par exemple), on peut considérer comme bien formés aussi les termes sans types, comme $x(x)$ ou l'auto-application, ce qui permet de donner dans le langage formel ou de programmation les définitions récursives ou définir une fonction en termes d'elle-même (par exemple, le « factoriel » : $n! = 1 \times 2 \times 3 \dots \times n = n \times (n - 1)!$ est une fonction (primitive) récursive). Mais, si on peut formellement appliquer une fonction ou programme f à soi-même et poser $f(f)$, quel est le sens mathématique de cette notion de « fonction » ? Voilà une notation symbolique sans signification mathématique : y a-t-il en fait un univers mathématique où les fonctions peuvent s'appliquer à elles-mêmes ? Il faut un espace X , une structure « géométrique », où l'on puisse identifier fonctions et arguments. Il suffit en fait que X satisfasse l'équation : $X = X \rightarrow X$ ou $X = X^X$ (X puissance X), où $X \rightarrow X$ est un ensemble ou « domaine » de fonctions de X dans X (dit domaine exponentiel). On sait, depuis Cantor, qu'aucun ensemble, fini ou infini, n'est égal ni isomorphe à son exponentiel (sauf pour X égale à un singleton ou $X = 1$, car $1 = 1^1$, un cas inintéressant, puisque dans X on doit pouvoir interpréter tous les nombres et les fonctions calculables). Une première solution a été donnée par D.S. Scott en 1970 : il construit une catégorie d'espaces topologiques tels que le domaine structuré $X \rightarrow X$ des fonctions continues sur X est isomorphe à l'espace X lui-même. Grâce à ces « domaines de calculabilité », la sémantique dénominative des langages de programmation permet de résoudre une large classe d'équations, bien plus complexes, qui sont souvent utilisées en théorie de la programmation.

Les systèmes distribués, interactifs et asynchrones

La physique permet aujourd'hui de distribuer les ordinateurs sur des grands réseaux de communication et leur donne une grande vitesse de calcul, grâce à une électronique et à des « chips » nouveaux. Or, pour que deux processus interagissent d'une façon fiable au cours d'un calcul distribué, il faut qu'ils communiquent dans un temps de l'ordre de grandeur de l'unité de temps de calcul (quelques nanosecondes). La vitesse de la communication électrique ou de la lumière, qui est limitée, et l'absence d'une mesure absolue du temps (asynchronie essentielle des différents systèmes de référence physique) posent des problèmes physiques (relativistes, en fait) tout à fait nouveaux. Les langages de programmation qui essaient de s'adapter à ces nouvelles données paraissent échapper aux paradigmes proposés par les pères fondateurs de la logique moderne : les langages orientés aux objets, par exemple, où concurrence et interaction jouent un rôle central. Toutefois, les informaticiens utilisent encore des systèmes logiques pour essayer de traiter mathématiquement les nouveaux problèmes. La logique modale, avec ses aspects de logique temporelle, permet de traiter des problèmes pointus concernant le temps dans des systèmes distribués et concurrents (*linear time*, *branching time*... pour la concurrence et le parallélisme). Le mu-calcul, qui s'ensuit, donne des points fixes « maximaux », strictement reliés aux structures de la théorie des ensembles « malfondés », c'est-à-dire des ensembles qui admettent des chaînes descendantes d'ensembles l'un inclus dans l'autre, comme certains processus infinis de calcul (les systèmes d'exploitation, par exemple). Les catégories fibrées sont utiles comme modèles des algèbres de processus (processus asynchrones). Souvent, ces systèmes logiques ou catégoriques servent juste pour une unification de la pluralité des langages utilisés, ce qui n'est pas un moindre succès. Parfois, on obtient de vraies percées, des extensions, des langages nouveaux et intéressants. De plus en plus, des méthodes géométriques paraissent essentielles, avec leur autonomie par rapport à la logique, historiquement centrée sur les langages séquentiels et ses structures finitaires : en logique linéaire, la géométrie fait désormais partie de la structure spatiale des preuves ; les mathématiques des systèmes dynamiques, les lieux du temps et de l'espace physique, font leur apparition en sémantique dénominative et dans l'analyse des systèmes distribués, concurrents et asynchrones.

► ASPERTI A. & LONGO G., *Categories, Types and Structures: an introduction to Category Theory for the working computer scientist*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1991. — GIRARD J.-Y., « Linear Logic », *Theoretical Comp. Sci.*, 50, 1987, 1-102. — HERTZ J. et al., *Introduction to the theory of neural computation*, Addison-Wesley, 1991. — MITCHELL J.C., *Introduction to Programming Language Theory*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1993. — TURING A. & GIRARD J.-Y., *La machine de Turing*, Paris, Le Seuil, 1995. — VAN HEIJENOORT J., *From Frege to Gödel*, Harvard Univ. Press, 1967.

— Coll. : *Handbook of logic in computer science*, éd. Abramsky et al. éd., Oxford, Clarendon Press, vol. 1-4, 1992-1995. — *Le Théorème de Gödel*, éd. Girard, Paris, Le Seuil, 1989. — *The Universal Turing Machine*, éd. Herken R., Springer Verlag, 1995. — *Handbook of Theoretical Computer Science vol. A: Algorithms and Complexity*, éd. Van Leeuwen J., Elsevier, 1990.

Giuseppe LONGO

→ Automate ; Cognition et sciences cognitives ; Complexité algorithmique ; Computation ; Information et codage ; Informatique ; Machine de Turing ; Monisme ; Réurrence ; Sciences cognitives.

LOI BIOGÉNÉTIQUE FONDAMENTALE

C'est le zoologiste allemand Ernst Haeckel (1834-1919) qui a donné la formule de cette loi selon laquelle « l'ontogenèse récapitule brièvement la phylogénèse » : le développement de chaque organisme individuel parcouru en accéléré les phases traversées au cours des âges par ses formes ancestrales. Les spécialistes discutent de savoir si Charles Darwin (1809-1882) a, ou non, accordé crédit à la « loi » de son supposé « disciple ». Jean Gayon a démontré qu'il n'en était rien ; et que l'on voit au contraire Darwin prendre fermement ses distances vis-à-vis de cette loi au fil des trois dernières éditions de *L'Origine des Espèces* (1866, 1869, 1872).

Ce que Darwin retient de ce qu'il observe, ce ne sont pas en effet les ressemblances, mais les différences en tant qu'elles manifestent des divergences entre espèces. Or, ce n'est pas l'hérédité qui produit ces divergences, mais la sélection. Lorsque donc des faits de ressemblance entre embryons sont portés à sa connaissance, il ne les néglige pas. Mais il les interroge dans cette perspective d'ensemble. Il lui est, par principe, impossible de se rallier à l'évolutionnisme haeckelien, même si — selon sa stratégie permanente — il ne le critique pas ouvertement. Darwin avait montré que, dans la Nature, il n'y avait pas de place pour tout le monde. Haeckel réencadre cette thèse dans un schéma de pensée où « chaque chose a sa place » et doit s'y tenir ou la rejoindre. Ce faisant, il a pu donner l'impression qu'il résolvait l'un des problèmes cruciaux de la biologie laissés en suspens par le naturaliste anglais : celui du rapport entre anatomie et embryologie. Haeckel subordonne la première à la seconde ; il ne peut le faire que parce qu'il subordonne la seconde au développement « historique » de l'espèce.

Mais, pour saisir l'immense portée de la loi biogénétique il faut s'arrêter sur une formule qui se trouve au début de *L'Anthropogénie* (1874) : Haeckel va plus loin et affirme que « la phylogénie est la cause mécanique de l'ontogénie ». Le développement individuel se trouve ainsi soumis à une norme absolue. Que cette version « forte » (Gayon) de la loi haeckelienne soit inscrite au début d'un ouvrage consacré à l'origine et à l'évolution de l'homme éclaire sans doute le sens général de l'évolutionnisme de l'auteur.

Il s'agit de vaincre la théologie chrétienne de la création sur son propre terrain — celui de l'origine — et d'en extirper tous les résidus métaphysiques dans les théories sociales. Cet objectif se trouve exprimé avec passion dans son célèbre pamphlet sur *Les énigmes de l'Univers*. Haeckel y célèbre d'abord les prodigieux progrès effectués au XIX^e s. dans la connaissance de la nature tant en biologie que dans des sciences psychochimiques et dans leurs applications pratiques. Le contraste est, à ses yeux, frappant lorsque l'on se tourne vers la vie sociale. Haeckel cite Alfred Wallace (1823-1913) : « Comparés à nos étonnants progrès dans les sciences physiques et leurs applications pratiques, notre système de gouvernement, notre justice, notre éducation nationale et toute notre organisation sociale et morale, sont restés à l'état de barbarie. »

À quoi cette situation déplorable tient-elle ? À ce que la « culture juridique », même dans les pays délivrés de l'absolutisme, demeure « presque toute formelle, aucunement réelle ». En quel sens ? En ce que « nos juristes n'apprennent à connaître que superficiellement l'objet propre et essentiel de leur activité : l'organisme humain et sa fonction la plus importante, l'âme ». On ne comprend pas l'état de la vie sociale, car les hommes politiques modernes sont pour la plupart des juristes et s'avèrent donc également « dénués de cette connaissance approfondie de la nature humaine qu'on ne puise que dans l'anthropologie comparée, et dans la psychologie moniste », mais aussi « dénués de cette connaissance des rapports sociaux dont les modèles nous sont fournis par la zoologie et l'embryologie comparées, la théorie cellulaire et l'étude des protistes ».

Le destin de l'humanité repose donc aux yeux de Haeckel sur l'École : qu'on y enseigne les sciences naturelles au lieu du « sport grammatical », et l'on n'aura plus à s'en remettre scandaleusement à l'Église pour ce qui est de la morale. On pourra enseigner et inculquer les fondements naturels de l'éthique...

On assiste ainsi dans cette œuvre à une véritable restauration de l'idée d'un ordre naturel absolu, lequel se présente comme anti-spiritualiste, matérialiste ou « moniste ». L'écologie, mot inventé par Haeckel, adossée à la « loi biogénétique fondamentale », apparaît porteuse d'une refonte de la politique dans un sens naturaliste, par le biais d'une psychologie biologisée. Il reforme la brèche qui avait été ouverte par Darwin dans la pensée naturaliste classique et qui permettait une nouvelle problématisation des rapports du vivant et de son milieu. Ce faisant, Haeckel a inauguré le malentendu épistémologique majeur qui a désormais affecté toute la pensée dite évolutionniste, il a, avec de nombreux disciples, ouvert la voie à l'« écologisme » en tant que conception du monde.

L'appel politique de Haeckel sera entendu au-delà sans doute de ce qu'il espérait. Il avait écrit : « L'âme humaine s'est développée avec le tube médullaire, dont elle est la fonction, et de même qu'aujourd'hui encore le cerveau et la moelle épinière de chaque homme dérivent du tube médullaire, ainsi « l'esprit humain »

l'activité psychique du genre humain tout entier s'est développée peu à peu, graduellement, à partir de l'âme des vertébrés inférieurs.» De ces lignes va naître presque immédiatement la psychologie de l'enfant sous les efforts conjugués de W. Preyer, G. Stanley Hall et de M. Baldwin. On conçoit désormais que l'enfant se développe à partir d'un stade qui correspond toujours « réellement aux premières périodes connues de l'histoire humaine », au plus proche de l'animalité. Le même schéma pénètre en philologie grâce à August Schleicher et Ludwig Noire et inspire la criminologie de Lombroso. Freud lui-même trouvera la clé de son analyse de « l'homme aux loups » dans une référence explicite à la loi de recapitulation.

Karl Marx (1818-1883) et Friedrich Engels (1820-1895), à la recherche des fondements historiques de la lutte des classes, emboîtent le pas. Ainsi, Engels n'hésite pas à écrire dans *Dialectique de la Nature* (p. 315) en 1874 : « En ce qui concerne toute l'évolution des organismes, il faut admettre la loi de l'accélération proportionnelle au carré de la distance qui sépare dans le temps cette évolution de son point de départ. Cf. Haeckel : *Histoire de la création et Anthropogénie*, les formes organiques correspondent aux différentes ères géologiques. Plus on s'élève, plus les choses vont vite. » Il aurait fallu encore citer William James, Pierre Teilhard de Chardin (1881-1955), et tant d'autres... E. Neresheimer avait parfaitement raison de déclarer lors du 70^e anniversaire du zoologue de Iéna : « On peut sans exagération dire qu'aucun savant (*Naturforscher*) n'a exercé une plus grande influence sur le développement (*Entwicklung*) de la vision générale du monde (*Weltanschauung*) de notre temps que Haeckel. »

Certains historiens ont fait, à juste titre, remarquer que ce vocable renvoyait à une histoire profonde. Ils en ont repéré les premières traces comme catégorie rhétorique chez Cicéron et comme concept théologique, depuis Irénée de Lyon (II^e-III^e s.), au point de contact de la théologie chrétienne de la révélation avec un certain néoplatonisme qui s'épanouit dans le mouvement hermétique de la Renaissance.

Récapituler, c'est répéter – ce qui suppose quelque mémoire – mais en ne retenant que les « têtes » (*caput*) de chapitres, donc en donnant de ce que l'on récapitule une image réduite à l'essentiel, une miniature, selon une démarche accélérée. Irénée (*Adversus haereses*, III, 8) écrit : « Dans le Christ toutes choses sont récapitulées parce que dans la nature humaine toutes choses, et les espèces et degrés des choses, sont contenues comme en une somme [*quasi in summa*]. » D'où l'accord possible, selon cette vue, entre la théologie révélée et la thèse hermétiste qui fait de l'homme-microcosme le miroir du macrocosme. On peut suivre cette thèse à travers tout le Moyen Âge, la voir s'épanouir au XV^e s. dans l'œuvre de Nicolas de Cues (*Docte Ignorance*, III, 3) puis de Ficin, qui s'en inspire.

D'autres historiens ont fait remarquer qu'il était pour le moins douteux que Haeckel, pourfendeur de l'Église, soit allé chercher son modèle chez saint

Irénée. Il y a plus proche – et plus cohérent : Gotthold Ephraïm Lessing (1729-1781). Daniel Teysseire a ainsi méticuleusement commenté l'ouvrage de ce dernier intitulé *L'Éducation du Genre Humain* (1780) comme « chaînon discret entre le moment théologique et le moment biologique de la recapitulation ». Ce texte tente de mettre en cohérence la théologie chrétienne et une philosophie du progrès qui met en parallèle celui de l'individu et celui de l'humanité – ce que n'a jamais fait Herder, toujours invoqué. *L'Éducation du Genre Humain* présente la recapitulation du cheminement de l'humanité vers la perfection morale, laquelle est condensée dans une formule : « Faire le bien parce que c'est le bien. » Mais il faut aussi évoquer l'opuscule de Kant paru fin 1784 *Qu'est-ce que les Lumières ?* et le 14^e *Discours à la Nation allemande* : « C'est vous qui, parmi tous les peuples modernes, conservez le germe de la perfectibilité humaine et qui êtes chargés de veiller au développement de l'humanité. »

Mais l'intérêt de ces deux ascendances tient à ce que Haeckel les combine dans un même dispositif de pensée. Il se présente agressivement comme un rationaliste, un homme des Lumières adepte du progrès ; mais en même temps, parce qu'il veut être radical et refuser toute référence à la révélation, il lui faut inscrire ce progrès dans la Nature, donc finaliser, sinon diviniser la Nature. Il retrouve donc explicitement les thèmes essentiels de la Naturphilosophie de Schelling et, par derrière eux, ceux de la mystique allemande qui joue du parallélisme « microcosmemacrocosme ».

D'où deux voies dans la descendance de l'œuvre de Haeckel : une voie rationaliste qui va s'employer avec succès en biologie à trouver les bases chimiques de l'hérédité au risque de refondre l'édifice darwinien. L'autre voie aura consisté à donner, si l'on peut dire, une version positiviste de la Naturphilosophie allemande. Ce qui s'inscrit très clairement dans le droit fil du discours prononcé à Altenbourg en 1892 et publié sous le titre *Le Monisme lien entre la religion et la science*, sous-titré « Profession de foi d'un naturaliste ». Le programme est clairement de biologiser la psychologie et d'écologiser les sciences de la société.

Ce discours retentissant a été traduit en français et préfacé en 1897 par G. Vacher de Lapogue. La lecture de cette Préface est instructive : tous les arguments y sont inscrits pour comprendre comment la Ligue moniste haeckélienne a pu devenir un foyer de la pensée national-socialiste et comment Maurras et l'Action française ont pu trouver dans l'œuvre de Haeckel les bases de leur « politique naturelle ».

▷ CANGUILHEM G., LAPASSADE G., PIQUEMAL J. & ULMANN J., *Du développement à l'évolution au XIX^e siècle*, 1962, rééd., Paris, PUF, 1985. – CICÉRON, *Œuvres complètes*, Paris, Les Belles Lettres, 1960. – DARWIN C., *L'origine des espèces*, trad. fr. Barbier, Paris, Reinwald, 1876. – ENGELS F., *La dialectique de la nature* (1874), trad. fr., Paris, Ed. Sociales, 1952. – GAYON J., *Darwin et l'après-Darwin*, Paris, Kimé, 1991. – HAECKEL E., *Anthropogénie, ou histoire de l'évolution humaine*, trad. fr. C. Letourneau, Paris, Reinwald, 1877 ; *Essais de psychologie cellulaire*, trad. fr. J. Soury, Paris, G. Baillière,

1880 ; *Histoire de la création des êtres organisés d'après les lois naturelles*, trad. fr. C. Letourneau, Paris, Reinwald, 1874 ; *Les preuves du transformisme*, trad. fr. Soury, Paris, Reinwald, 1879 ; *Les énigmes de l'univers*, trad. fr. C. Bos, Paris, Schleicher Frères, 1902. – KANT E., *Œuvres complètes*, rééd., Paris, Gallimard, 1980. – SCHELLING F.W., *Idees pour une philosophie de la nature. Introduction à l'étude de cette science*, 1797, trad. fr., Paris, Aubier-Montaigne, 1946.

Dominique LECOURT

→ Développement ; Écologie ; Embryogenèse ; Espace ; Évolutionnisme ; Monisme ; Naturphilosophie ; Vivant (Théorie du).

LOI DE LA NATURE

En février 1844 paraît le *Discours sur l'esprit positif* qu'Auguste Comte présente comme un préambule à un *Traité philosophique d'astronomie populaire*. On y trouve une vue d'ensemble du nouvel esprit philosophique que veut promouvoir le fondateur du positivisme, désormais adossé à l'impressionnant *Cours de philosophie positive*, dont le tome 6 a été publié deux ans plus tôt. Comte y rappelle, pour commencer, l'essentiel : la succession inévitable des trois « manières de philosopher » qui ont affecté chacun des grands domaines du savoir. On le voit s'attarder sur la seconde, la métaphysique, qui a eu pour mission de « dissoudre » la précédente – la recherche théologique, qui visait à identifier les causes surnaturelles des phénomènes observés par l'homme. De la même façon que le christianisme avec l'invocation d'un unique Dieu créateur, l'état métaphysique qui impute la production des phénomènes à des « entités abstraites » trouve son aboutissement dans l'invocation d'« une seule entité générale, la Nature, destinée à déterminer la faible équivalence métaphysique de la vague liaison universelle résultée du monothéisme ». Contre la persistance de cette philosophie purement négative qui représente « une sorte de maladie chronique, naturellement inhérente à notre évolution mentale, individuelle ou collective », il accentue alors les traits de la philosophie positive : elle renonce définitivement à la recherche des « causes », à cet infantilisme où l'esprit prétend s'emparer de l'absolu. « Toute proposition, écrit Comte, qui n'est pas strictement réductible à la simple énonciation d'un fait, ou particulier ou général, ne peut offrir aucun sens réel et intelligible. » Pour conclure : « En un mot, la révolution consiste essentiellement à substituer partout à l'inaccessible détermination des causes proprement dites, la simple recherche des lois, c'est-à-dire des relations constantes qui existent entre les phénomènes observés. » De là encore que « nos recherches positives doivent essentiellement se réduire, en tous genres, à l'appréciation systématique de ce qui est », et aussi que « cette étude des phénomènes, au lieu de pouvoir devenir aucunement absolue, doit toujours rester relative à notre organisation et à notre situation ». Chemin faisant, Comte exprime son accord

enthousiaste avec les thèses avancées l'année précédente à Londres par John Stuart Mill dans son *Système de logique (A system of logic, ratiocinative and inductive)*. Cet hommage, peut-être intéressé mais sincère sur le fond, Comte l'accroche à la phrase suivante : « Ainsi le véritable esprit positif consiste surtout à voir pour prévoir, à étudier ce qui est afin d'en conclure ce qui sera, d'après le dogme général de l'invariabilité des lois naturelles. »

De tels textes ont façonné un nouveau mode de penser la science qui a marqué l'aboutissement d'une longue discussion sur la mécanique et la cosmologie newtoniennes (de Locke et Leibniz, à d'Alembert puis à Kant, à Laplace, Ampère et bien d'autres) ; un mode de penser dont les bouleversements ultérieurs de la physique – la formulation du second principe de la thermodynamique (1850), le dénouement par Einstein (1905) de la « crise de la physique moderne », l'effraction de la théorie des quanta et les embarras de la mécanique quantique (1927) – n'ont fait qu'étendre l'emprise sur les esprits.

Mais ces textes témoignent aussi d'un embarras dont on peut repérer les traces aujourd'hui encore dans la pensée de certains physiciens lorsqu'ils sont conduits à prendre la mesure philosophique de leurs travaux. D'un côté, la Nature se trouve rangée au rang des mystifications métaphysiques dont il convient de se délier ; d'un autre côté, on continue à parler sinon de « lois de la nature » ou du moins, à l'anglaise, de « lois naturelles ». D'un côté on récuse comme d'ascendance théologique l'idée de « lois » qui exprimeraient la volonté d'un créateur, mais l'on conserve le même vocabulaire de « lois » pour désigner les « relations constantes » de succession et de similitude entre les phénomènes observés. Et pour aggraver encore l'équivoque, on fait de leur invariabilité « un dogme » ! De quelle autorité, demandera-t-on, ce dogme tient-il sa valeur de dogme, c'est-à-dire de vérité absolument normative ?

La généalogie de cet embarras nous met en présence d'une succession de subtils échanges métaphoriques qui ont décidé pour une part essentielle de l'allure qu'a prise la pensée occidentale. Ces échanges mettent en jeu la religion, la théologie, le droit, la politique et ce que nous appelons les sciences ; ils s'effectuent dans l'élément de ce discours de transactions qu'est la philosophie.

De l'Antiquité grecque on retiendra que le propre des « lois » (*nomoi*) consiste à être « écrites », et s'il arrive à Aristote (*Rhétorique* 1373 b) comme à Sophocle dans *Antigone* d'invoquer contre les lois écrites des « lois selon la nature » (*kata physin*), c'est comme recours – justifié ou non – à une justice supérieure dans une situation de litige. Si Platon se risque bien dans le *Timée* à donner une cosmogonie et à « décrire » un ordre de la nature, il recueille à son sujet de très anciennes rêveries pythagoriciennes ou la magie se nourrit de mythes orientaux. Si le monde est sphérique parce que parfait, s'il est un immense animal, l'animal parfait qui, par la grâce d'un Dieu, renferme

tous les autres, on aura beau faire, on n'y découvrira nulle esquisse de la conception moderne d'une législation s'exerçant sur la nature et s'exprimant dans la régularité de phénomènes observés.

On n'en trouvera pas davantage dans l'œuvre d'Aristote. Car si les mouvements des astres font apparaître de telles régularités, c'est le signe même à ses yeux que leur essence n'a rien de commun avec les êtres du monde sublunaire. Quant à la nature qu'il observe méticuleusement dans ce bas monde, il y cherche certes un ordre, mais c'est un ordre qui se définit par une tendance à la perfection et à la plénitude, une aspiration au repos dont chaque être se trouve comblé lorsqu'il atteint son « lieu » propre, absolument défini. Cet ordre se rapporte à un Dieu, mais ce Dieu n'apparaît ni comme un créateur – puisque le monde est éternel – ni comme un législateur. « Premier moteur immobile », il est plutôt le pôle d'un Éros universel. Robert Lenoble avait raison de le souligner : « La théorie des quatre causes (n'est) (que) la rationalisation de cette image : la Nature prend une matière (cause matérielle) et lui impose une forme (cause formelle) à l'aide d'un instrument (cause efficiente) : toute l'opération étant entreprise et conduite en vue du résultat (cause finale). » On attribue souvent aux stoïciens le mérite d'avoir, les premiers, par contraste avec Aristote, transféré au monde physique la notion juridicopolitique de « loi ». Si l'on se souvient qu'ils considèrent la nature (*physis*) comme une « force » qui maintient la cohésion du monde, mais que l'on doit considérer cette forme comme « souffle » (*pneuma*), assimilable à un « feu » artiste qui le sculpterait, on adhèrera difficilement à cette vue de l'histoire, quelles qu'aient pu par ailleurs être les positions du stoïcisme romain sur la question méta-juridique de la « loi naturelle » (Cicéron, *De Legibus* II, § 4).

La seule notion de « loi » qui pût en réalité s'appliquer à une telle nature, comme à celle de Platon ou à celle d'Aristote, et encore sous réserve de les remanier chacune sur quelques points essentiels, relève du commandement et du décret. Ce que, le premier, comprit saint Augustin (354-430) à propos du platonisme et du stoïcisme ; puis surtout, neuf siècles plus tard, saint Thomas, qui prend appui sur l'œuvre d'Aristote pour élaborer une nouvelle conception plus ample de la « loi naturelle ». Il avance l'idée que la loi est un principe extérieur qui gouverne le mouvement des êtres vers leur fin ; mais il fait reposer cette assertion sur une généalogie de la notion de loi et la prolonge par une théorie de l'ordre des lois.

La notion de loi, explique-t-il, nous la tenons de l'expérience d'une règle. « La loi est une certaine règle, et mesure des actes, selon laquelle on est poussé à agir ou retenu d'agir » (*S.T. Ia. Quæst. XC, art. 1*). L'exemple de l'architecture lui sert à le faire comprendre. Et il tente aussitôt d'arracher l'idée de loi au volontarisme qui en affectait la notion chez saint Augustin et les autres théologiens. La règle oblige. Et qui dit obligation dit fin. Or quelle est la faculté humaine qui découvre la fin ? C'est la raison. La raison

apparaît ainsi comme le processus qui mène à un acte de contemplation de la fin, lequel relève de l'intellect qui présente ladite fin à la volonté. La volonté apparaît donc tributaire de l'intellect. Mais l'intellect peut porter sur ce qui est, selon son usage spéculatif – il énonce alors des relations nécessaires ; il peut aussi porter sur ce qui est bien, selon son usage pratique, il juge alors l'être au nom de ce qui doit être en ce qu'il tend à être ce qu'il est et qu'il n'est pas encore.

Dans le prolongement de telles analyses, le docteur Angélique établit une hiérarchie des lois. Au premier rang s'inscrit la « loi éternelle » qui régit l'univers tout entier. L'univers n'est pas un amas sans ordre, c'est un tout organisé par un ordre des fins. Chaque être singulier, chaque espèce, remonte vers son principe et, d'acte d'être en acte d'être, jusqu'à un acte parfait qui est sa fin. Cette fin fonde l'ordre des lois qui doivent régir toute communauté humaine.

Ce point sera soumis à de rudes critiques de la part de Jean Duns Scot et Guillaume d'Ockham, qui lui reprochent de supprimer la liberté au profit de l'ordre. Première querelle du « déterminisme » au XIII^e s. ! L'ordre du cosmos et sa loi témoignent en effet de la dépendance de la créature à l'égard d'un ordre qui la dépasse.

Quoi qu'il en soit de ces critiques et de cette querelle, il faut remarquer que l'expression de « loi naturelle » s'applique, selon saint Thomas, à l'homme dans son lien avec l'ordre du cosmos, celui de la « loi éternelle ». Par l'élaboration de cette notion, le théologien répond par avance aux objections qui lui seront faites quant à la liberté de l'homme, être doué de raison. Mais il entreprend aussi d'absorber la notion augustinienne de la « loi naturelle » conçue comme illumination, lumière intérieure directement reçue de Dieu. Il montre que cette loi n'est nullement l'objet d'une intuition intérieure ; que la lumière naturelle se découvre à nous dans la perception que nous acquérons de la finalité de l'ordre universel. Dans la mesure où nous parvenons à cette perception, nous participons à cet ordre.

Pour Thomas, il n'y a nulle contradiction à insérer ainsi l'homme dans l'ordre cosmique parce que raison et volonté sont des « natures » déterminées par la fin dont elles ne peuvent se détacher. Ce n'est que sur des cas particuliers, en raison de l'imperfection de l'objet, que la volonté dispose de la liberté d'adhérer ou non au jugement de la raison qui discerne ce qui est en accord ou non avec cette fin (*S.T. Ia. quæst. X, art. 2*). Cette indétermination rend nécessaire l'existence de la « loi humaine », laquelle n'est pas conçue comme un mal nécessaire qui serait la conséquence de la chute ainsi que dans la doctrine de saint Augustin. Thomas montre l'activité du législateur humain comme une exigence de la « loi naturelle » elle-même.

Mais il est encore une autre loi, extérieure à cette hiérarchie, la surplombant bien qu'elle participe à la loi éternelle : la « loi divine ». Cette loi a pour origine un événement, la révélation, qui s'est réalisé dans le temps et se trouve consigné dans les textes de l'Ancien et du Nouveau Testament. On y adhère par la foi, ou non. On

la qualifie de « loi » parce qu'elle a sa nécessité, mais il s'agit d'une nécessité interne au plan divin du salut de l'homme pécheur. Nécessité théologique donc et non philosophique. Elle assigne à l'homme, depuis la révélation, une fin qui surpasse sa nature.

Cette loi vient s'insérer dans l'ordre éternel voulu par Dieu, elle participe donc à la loi éternelle même si elle résulte d'un événement particulier. En revanche, elle est supérieure à la loi naturelle et elle est le complément de la loi humaine. Revenons donc à la « loi éternelle » qui régit le cosmos. Sa *ratio* est avancée comme fruit d'une analogie entre Dieu entendu comme créateur et Dieu entendu comme gouvernant. D'où il apparaît que la « loi naturelle » ne concerne pas Dieu comme créateur, mais seulement comme gouvernant, en tant que par définition il gouverne sagement. En elle se définit la fin qui suscite le mouvement de tous les êtres.

On peut dire que l'idée moderne de « loi de la nature » n'a pu d'abord se formuler au XVII^e s. qu'en se dégageant à grand-peine de cette conception finaliste. On ne s'étonnera pas que ce soit Descartes qui emploie le premier l'expression grâce à un recours exprès à l'augustinisme contre lequel saint Thomas avait construit son édifice. Mais il lui faut alors assumer les conséquences de son geste ; il lui faut entériner l'inévitable retour d'un certain volontarisme du « législateur » qui ne peut s'incliner même devant la « vraie et immuable nature » des vérités mathématiques et ne trouve d'autres bornes que celle de sa « véricité » et donc de sa « souveraine bonté » en tant que créateur.

Francis Bacon en Angleterre se réfère lui aussi à une certaine tradition augustinienne contre l'aristotélisme. Il invite à distinguer nettement entre les « deux livres » que Dieu nous a légués : les Écritures, qui nous révèlent sa volonté, et le livre de la nature, qui nous montre sa puissance. Il apparaît ainsi tout aussi pieux de déchiffrer la nature – qu'il faut « interpréter » – que de lire les textes sacrés. Faisant subir à l'orthodoxie calviniste un notable infléchissement, il explique dans le *Novum Organum* que la « théologie naturelle » peut être définie comme la « Divine philosophie », laquelle délivre l'étincelle du savoir qui peut être obtenue par la lumière de la nature et la considération des choses créées ». Et ainsi « on peut très bien la tenir pour divine eu égard à son objet, et naturelle eu égard à la source de son information ». C'est la position de René Descartes strictement inversée : pour le philosophe français, la lumière dite naturelle est divine par sa source et naturelle par son objet. La « philosophie naturelle » se consacra à l'étude de la nature, laquelle doit postuler une Providence dont la « théologie naturelle » démontrera pour sa part l'existence et les bienfaits.

Bacon insistait pour qu'on ne mêlât surtout pas les deux démarches ; très vite, pourtant, on en vint à chercher dans la nature les traces d'un « dessein » divin. Une tradition de pensée se déploya dès lors qui sut mettre le prestige de Newton et la critique de l'innéisme par J. Locke à son compte pour rapporter les « lois » des phénomènes, c'est-à-dire les régularités

observées, au crédit d'une Providence mathématique. Empirisme épistémologique et théologie naturelle se trouverent intimement liés. Darwin en 1859 eut encore à affronter cette alliance.

Mais la réflexion philosophique ne s'est jamais contentée de faire « travailler » en vase clos les unes sur les autres des notions scientifiques et des notions théologiques. Entre 1620 et 1859, le vocabulaire de « loi » a été l'objet de réélaborations sémantiques profondes dans le champ de la philosophie politique. Dès 1625, l'homme d'État hollandais Hugo Grotius (1583-1645) publie un *Traité du Droit de la guerre et de la paix* qui marque les débuts officiels de l'école moderne dite du « droit naturel ». Il sera non sans raison célébré tantôt comme le Galilée, tantôt comme le Descartes du droit. Cette école fait apparaître une nouvelle notion de la « loi naturelle » qui se veut anti-thomiste aussi bien qu'anti-augustinienne ; et cet événement n'est évidemment pas sans relations avec le surgissement de nouvelles sciences mathématiques et physiques. Elle y trouve une part essentielle de son inspiration, et elle y provoque des contretemps philosophiques profonds.

Grotius, comme tant d'autres, dit emprunter à Euclide son mode d'exposition – ce qu'on appelle écrire *more geometrico*. Mais c'est surtout la pensée dite « résolutive compositive » de Galilée qui l'inspire comme elle inspirera Hobbes dans le *De cive* (1642) et encore Pufendorf dans le *De jure naturæ et gentium* de 1672. L'essentiel, c'est qu'on décide alors de traiter du droit et de l'État « dans l'abstraction des vérités révélées » (Pufendorf). Mais, dans le geste même par lequel on congédie toute conception théologique du droit, on recueille un « modèle » de science très particulier : la mécanique naissante qui sert à bâtir une idée nouvelle de la « nature humaine », en tirant d'ailleurs des arguments en faveur de conceptions politiques diverses, voire opposées.

Or, cette philosophie du droit naturel a connu, pour des raisons directement politiques, un destin historique bien différent selon que l'on se situe en Angleterre, en France, ou encore en Allemagne. Une version de cette philosophie s'installe en Angleterre avec Richard Hooker (1554-1600) et John Locke, qui ne craignent pas d'adosser leur conception de la « loi naturelle » avec celle de saint Thomas, sous réserve d'« éliminer son insistance sur l'autorité du Pape en la matière » ; cette doctrine de compromis tend à délimiter nettement le droit naturel et le droit divin positif et tourne le dos aussi bien au calvinisme strict, qui subordonne le premier au second, qu'à la voie radicale empruntée par Hobbes, qui, lui, veut chasser le droit divin positif comme tel de l'ordre juridique. Il s'ensuit des glissements incessants dans l'usage du mot « loi » entre une acception axiomatique, descriptive et normative. On voit en France Montesquieu l'assumer clairement pour réinscrire dans l'ordre juridique la notion de « loi » que lui avaient empruntée les sciences physiques et la repenser ainsi sur de nouvelles bases physico-mathématiques.

La persistance de l'expression « lois de la nature » dans la réflexion philosophique sur la physique est

largement imputable à ces transferts. Que l'idéal de la science en Angleterre ait été du coup fort différent de ce qu'il a été en France y trouve de plus un élément d'explication. Bacon, pourfendeur d'Aristote, eût été surpris de voir en son nom se constituer une manière de thomisme simplifié, dont Leibniz n'a pas manqué de débusquer les inconspicues dans *Les nouveaux essais sur l'entendement humain* (1696) en puisant quant à lui dans un néoplatonisme magique mâtiné de stoïcisme pour réduire la tâche du législateur au calcul initial effectué à l'instant de la Création, de l'harmonie préétablie. Il pouvait alors énoncer le « principe de raison suffisante » dans lequel Heidegger a cru pouvoir lire la vérité même de toute la science moderne. Il est vrai que, enrichi des leçons du calcul des probabilités, ce principe a achevé de façonner l'idéal de la science du XVIII^e s., résumé en termes inoubliables par Laplace dans un texte bien connu en 1795. Auguste Comte n'a fait que lui apporter un fondement philosophique qu'il croyait définitif en récusant la notion de « nature » comme métaphysique ; et en assignant pour tâche aux sciences positives de formuler des « lois » qui expriment avec certitude des rapports constants de succession ou de similitude. Mais peut-on chercher des lois sans les imputer à l'intelligence et à la volonté de quelque législateur ? Peut-on se contenter de récuser la question en lui opposant une simple fin de non-recevoir ? Laplace, au moment où il affirmait n'avoir « pas besoin de cette hypothèse », la réintroduisait en sous-main sous le couvert de la fiction d'une fameuse « intelligence » suffisamment vaste pour embrasser tous les états de l'univers. Comte ne consent pas à un tel aveu si aisément. Mais, en définitive, n'en vient-il pas au même point lorsqu'il écrit que l'étude positive des phénomènes « doit toujours rester relative à notre organisation et à notre situation » ? Le mot « organisation » porte en effet un sens biologique très lourd chez lui et désigne la « nature humaine » dont il croit avoir, à quelques retouches près, trouvé la science positive dans l'œuvre « phrénologique » de l'illustre F.J. Gall. C'est donc le cerveau qui devient législateur ! À des « entités » absolues imaginaires dont il se gausse, il substitue un absolu biologique qu'il donne pour un fait, comme la base de notre « logique naturelle ».

Sommes-nous depuis sortis de l'impasse ? Rien n'est moins sûr lorsque l'on voit Ernst Mach chercher dans la physiologie une réponse au même embarras entre-temps aggravé par la formulation du second principe de la thermodynamique ; puis, en 1929, les positivistes logiques accueillir la « logique mathématique » comme un « don du ciel » (Heidegger) pour renouveler la solution apportée par Mach sans toucher au problème lui-même ; lorsque l'on voit enfin Karl Popper essayer de fonder le caractère « normatif » des lois scientifiques sur un « darwinisme épistémologique » associé à la neurophysiologie de John Eccles !

» ARISTOTE, *Rhétorique*, trad. fr., Paris, Les Belles Lettres, 1973. — AUGUSTIN, *Œuvres complètes*, Paris, Desclée de Brouwer « Bibliothèque augustinienne », 1936 sq. — BACON F.,

Novum Organum (1620), rééd., Paris, PUF, 1986. — BASTIT M., *Naissance de la loi moderne*, Paris, PUF, 1990. — BOUTROUX E., *De la contingence des lois de la nature* (1874), Paris, PUF, 1998. — CICÉRON, *Œuvres complètes*, trad. fr., Paris, Les Belles Lettres, 1891. — COMTE A., *Œuvres*, Paris, Anthropos, 12 vol., 1968. — DESCARTES R., *Œuvres*, rééd., Paris, Vrin, 1964-1974. — EINSTEIN A., *Œuvres choisies* 5, Paris, Le Seuil/CNRS, 1991. — FEYNMAN R., *The Character of Physical law*, Cambridge, MA, The MIT Press, 1965. — GROTIUS H., *Traité du Droit de la guerre et de la paix*, rééd., Caen, Bibliothèque de philosophie politique et juridique, 1984. — HEISENBERG W., *La nature dans la physique contemporaine* (1955), Paris, Gallimard, 2000. — HOBBS T., *The English Works of Thomas Hobbes*, Londres, 11 vol., 1839-1945 ; rééd., Aalen, Scientia Verlag, 1962-1966. — LEIBNIZ G.W., *Les nouveaux essais sur l'entendement humain*, rééd., Paris, Flammarion, 1966. — LOCKE J., *Œuvres complètes*, trad. fr., nouv. éd., Paris, 7 vol., 1822-1825. — PLATON, *Timée*, trad. fr. L. Robin, Paris, Gallimard. — SCHRÖDINGER E., *Physique quantique et représentation du monde* (1935), Paris, Le Seuil, 1992. — THOMAS D'AQUIN, *Summa theologica*, Rome, Forzani, 1894.

Dominique LECOURT

→ Causalité (Principe de) ; Comte ; Crise de la physique moderne ; Nature ; Nature (Système de la) ; Phénoménisme.

LUMIÈRE

PHYSIQUE

La lumière a constitué depuis l'Antiquité un objet central de recherche. Ce n'est cependant qu'au XVII^e s. que les théories physiques de la lumière, c'est-à-dire l'étude de la lumière et des phénomènes lumineux au sens où nous l'entendons encore aujourd'hui, connurent leur véritable essor. En effet, si depuis l'Antiquité les travaux sur la lumière n'ont pas manqué, la plupart d'entre eux s'inscrivaient dans le cadre d'une réflexion centrée sur le problème de la vision et du regard plutôt que sur celui de la nature de la lumière.

C'est Johannes Kepler (1571-1630), prolongeant les remarquables études d'Ibn al-Haitham, connu en Occident sous le nom d'Alhazen (~ 965-1039 ?), de Robert Grosseteste (1175-1253), de John Pecham (~ 1230-1292) et de Witelo ou Vitellion (~ 1230-1285), qui assimile définitivement, dans ses *Paralipomènes à Vitellion* (Francfort, 1604), l'œil à un dispositif optique conduisant à la formation d'une image réelle sur la rétine. L'optique physique acquiert son autonomie ; l'analyse de la lumière devient, en se libérant du problème de la sensation visuelle, un véritable objet de recherche.

Une nouvelle distribution du savoir se met alors en place avec Johannes Kepler et René Descartes (1596-1650), amenant à retenir trois champs d'investigation : la nature physique de la lumière, la transmission de l'image rétinienne au cerveau (anatomie, physiologie) et la représentation mentale. Nous ne nous attacherons ici qu'au premier de ces trois champs d'investigation : l'histoire des théories physiques de la lumière.

La problématique mécaniste cartésienne

Le développement des théories physiques de la lumière au XVII^e s. est associé, le plus souvent, à la construction de modèles mécaniques : comment expliquer à l'aide des seuls concepts de la physique mécaniste les propriétés connues de la lumière comme la propagation rectiligne, la réflexion, la réfraction ou la genèse des couleurs ? Ce type d'approche a été véritablement initié par Descartes. Dans le monde plein cartésien, la propagation de la lumière est caractérisée par une inclination au mouvement, une poussée, un effort, c'est-à-dire qu'elle se fait sans transport de matière.

Il n'en reste pas moins que dans les premières pages de la *Dioptrique*, publiée en 1637 après le *Discours de la méthode* avec la *Géométrie* et les *Météores*, Descartes introduit trois « comparaisons » pour aider à concevoir la lumière « en la façon qui me semble la plus commode, pour expliquer toutes celles de ses propriétés que l'expérience nous fait connaître, et pour déduire ensuite toutes les autres qui ne peuvent pas si aisément être remarquées ». Or, dans la troisième comparaison (après celles du bâton de l'aveugle et de la cuve de raisin), consacrée à l'explication des phénomènes de la réflexion et de la réfraction, Descartes fait appel au mouvement d'une balle rencontrant une surface. C'est de l'étude de cette comparaison et de ce mouvement, dans le *Discours second*, que Descartes tire sa fameuse loi de la réfraction exprimant que le sinus de l'angle de réfraction et le sinus de l'angle d'incidence sont dans un rapport constant (l'expression de ce rapport, déjà présente dans un manuscrit arabe d'Ibn Sahl au IX^e s., a été retrouvée également au début du XVII^e s. par divers savants comme Thomas Harriot et W. Snell) et que, de cela, il conclut que la lumière se déplace plus « aisément » dans les corps durs comme le cristal que dans les corps mous comme l'air.

Ce résultat est contesté dès 1657 par Pierre Fermat dans sa correspondance avec Marin Cureau de La Chambre. Fermat, en s'appuyant à la fois sur le principe affirmant que la lumière suit toujours la trajectoire qui minimise le temps du déplacement ainsi que sur sa nouvelle méthode mathématique de l'« adégalisation », parvient à retrouver la loi de la réfraction mais en considérant que la vitesse de propagation de la lumière est plus grande dans les milieux rares que dans les denses.

Si la propagation de la lumière est bien considérée par Descartes comme une inclination au mouvement, sans transport de matière, la troisième comparaison de la *Dioptrique*, celle de la balle, ouvre cependant la voie à une conception qui pourrait être corpusculaire de la lumière. Ainsi, tant chez Descartes que dans les discussions engagées par Fermat, se fait déjà jour le grand débat qui va gouverner le développement des théories physiques de la lumière : celle-ci est-elle une onde, c'est-à-dire un mouvement sans transport de matière ou un déplacement de matière (corpuscules, fluides, etc.) ? Avant d'en venir à l'analyse et aux enjeux épistémologiques de ce débat, débat qui prend sa forme

définitive avec les travaux de Christiaan Huygens (1629-1695) et d'Isaac Newton (1642-1727), il importe tout d'abord de faire le point sur les principales découvertes expérimentales qui ont marqué la deuxième moitié du XVII^e s.

Découvertes expérimentales

La diffraction. — Les premières expériences de diffraction de la lumière ont été réalisées par Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) et présentées dans son gros ouvrage intitulé *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride* (Bononiae, 1665). C'est d'ailleurs Grimaldi qui introduit le terme de diffraction pour caractériser les nouveaux phénomènes qu'il vient de découvrir. Utilisant un faisceau très étroit de lumière naturelle, Grimaldi observe, par exemple dans une pièce sombre, que lorsqu'un petit objet est placé dans un cône lumineux émergeant d'une petite ouverture, l'ombre portée sur un écran blanc n'est pas, comme le suggère l'optique géométrique, nettement séparée de la zone lumineuse, mais que l'ombre est bordée par trois traînées lumineuses (*series lucidae*) et colorées. Grimaldi multiplie les expériences et, à l'issue de ces travaux, rejette l'idée que les *series lucidae* pourraient être dues à la lumière directe, ou à de la lumière réfractée (les *series* ne dépendent pas de la nature de l'obstacle), ou bien encore à de la lumière réfléchie (les *series* ne dépendent pas du bord de l'obstacle). Grimaldi en conclut que la lumière doit se propager d'une autre façon bien distincte des trois précédentes et à laquelle il faut donner un nom : la diffraction.

L'observation de phénomènes d'« interférence ». — Les premiers travaux véritablement coordonnés sur ces phénomènes se rapportent aux observations des couleurs à la surface des lames minces. Ils furent l'œuvre de Robert Boyle (1627-1691) et apparurent dans les *Experiments and Considerations Touching Colours* (Londres, 1664). Ces études sont prolongées par celles de Robert Hooke (1635-1703) dans son ouvrage consacré en particulier à des observations microscopiques intitulé *Micrographia* (Londres, 1665). Ce dernier remarque qu'une coloration apparaît sur une lame transparente limitée par deux surfaces réfléchissantes, de réfringence différente de celle de la lame, lorsque son épaisseur est comprise entre une limite supérieure et une limite inférieure au-delà desquelles ne peut être perçue aucune couleur, la lame devenant transparente. Dans le prolongement de ces expériences, il réalise, entre autres, en plaçant deux lentilles l'une contre l'autre, celle dite aujourd'hui des anneaux de Newton. Ces phénomènes s'interprètent aisément depuis le début du XIX^e s. en termes d'interférence.

La biréfringence. — En 1669, Érasme Bartholin (1625-1698) découvre la biréfringence en manipulant des cristaux de spath d'Islande (calcite). Il publie ses observations dans un petit mémoire intitulé

Experimenta crystalli Islandici diadastastici (Copenhague, 1669). Il y décrit en particulier comment ces cristaux dédoublent les images des objets ou des écrits sur lesquels ils sont placés et introduit les termes, utilisés encore aujourd'hui, de réfraction ordinaire et de réfraction extraordinaire.

La vitesse de la lumière. — En 1676, l'astronome Ole Römer (1644-1710), alors qu'il séjourne à l'Observatoire de Paris tout nouvellement bâti, déduit des irrégularités apparentes de la période des satellites de Jupiter une méthode de mesures de la vitesse de la lumière. Ses résultats sont publiés dans le *Journal des Sçavans* du lundi 7 décembre 1676. Römer parvient à une valeur approximative de la vitesse de la lumière de 215 000 kilomètres par seconde. Il montre ainsi que l'hypothèse cartésienne de la propagation instantanée n'est pas fondée. L'ensemble de ces mesures et observations impose une refonte complète de l'optique cartésienne. La mise en place d'une nouvelle théorie cohérente de la nature de la lumière, susceptible de rendre compte de tous les nouveaux résultats, devient alors une tâche d'une extrême difficulté. Elle va occuper les savants jusqu'au milieu du XIX^e s.

Ondes ou corpuscules

Très rapidement, au cours du XVII^e s., deux grands courants se dessinent parmi les savants, suivant que ceux-ci considèrent que la lumière est un corps ou bien le mouvement d'un corps sans transport de matière. Dans le premier cas, il s'agit des théories dites de l'émission, dont le principal représentant est Isaac Newton et, dans le second cas, des théories dites des milieux, dont le principal représentant est Christiaan Huygens.

Newton et les conceptions corpuscularistes. — La théorie newtonienne, présentée pour la première fois en 1672 dans les *Philosophical Transactions*, puis formulée définitivement en 1704 dans l'*Optique*, est inséparable des expériences sur la dispersion de la lumière par un prisme : à chaque couleur correspond un certain degré de réfrangibilité de telle sorte que s'instaure entre la réfrangibilité et la couleur une relation biunivoque. La couleur ou le degré de réfrangibilité d'un rayon donné sont inaltérables, soit par réfraction, soit par réflexion. Tout se passe donc comme si préexistait dans la lumière blanche arrivant sur le prisme une multiplicité de rayons de différente réfrangibilité et susceptible d'engendrer des sensations différentes de couleur. Le prisme, dans cette perspective, a seulement pour effet de séparer ces différents rayons que nous appelons aujourd'hui rayons monochromatiques.

Tout en restant extrêmement prudent sur la nature de la lumière, il apparaît rapidement, tant par la lecture des textes publiés que par celle de ses manuscrits, que la pensée newtonienne est gouvernée par une conception corpusculaire de la lumière. Les sources lumineuses, par exemple le Soleil, émettent des corpuscules qui se propagent à travers le vide jusqu'à nos yeux. Une telle

théorie permet d'expliquer assez facilement, comme Newton le montre dans la section XIV du livre I des *Philosophiæ Naturalis principia mathematica* (Londres, 1687), la propagation rectiligne, la réflexion, la réfraction et la vitesse finie de la lumière. En revanche, elle reste pour l'essentiel inopérante dans le cas des autres phénomènes, en particulier lorsque interviennent des aspects périodiques. Ainsi, dans le cas des lames minces, Newton imagine sa théorie des Accès qui réintroduit d'une certaine façon la considération d'un milieu interagissant avec les rayons ou, dans un esprit plus strictement corpusculaire, de nouvelles propriétés intrinsèques du rayon comme en témoigne, par exemple, son interprétation du phénomène de la réflexion partielle dont le rôle est si important, aujourd'hui, dans l'étude des phénomènes d'interférence. En effet, comment Newton peut-il interpréter le fait que des rayons soient ou bien transmis ou bien réfléchis en rencontrant une surface réfringente ? La réponse est donnée dans la Proposition XIII de la partie III du livre II de l'*Optique* (trad. J.-P. Marat) : « La raison pour laquelle les surfaces de tous les corps transparents épaïs réfléchissent une partie des rayons incidents et réfractent le reste, est qu'au moment de leur incidence, ces rayons se trouvent, les uns dans des Accès de facile réflexion, les autres dans des Accès de facile transmission [...] la lumière a ses Accès de facile réflexion et de facile transmission, avant de tomber sur les corps transparents : et il est à croire qu'elle les a dès qu'elle commence à émaner des corps lumineux, et qu'elle les retient durant tout son trajet. »

Ainsi, d'après Newton, les Accès appartiennent probablement (« il est à croire [...] ») aux divers rayons dès leur origine de telle sorte qu'en rencontrant une surface réfringente ceux qui sont dans un Accès de facile réflexion sont réfléchis (réflexion partielle), et ceux qui sont dans un Accès de facile transmission, transmis, de façon à donner ensuite naissance, par exemple, aux anneaux colorés. La surface réfringente a donc pour rôle non pas d'engendrer l'Accès de facile transmission mais de sélectionner parmi l'ensemble des rayons l'atteignant ceux qui sont dans un état de facile transmission. De ce point de vue, la surface ne joue qu'un rôle d'analyseur (au même titre que le prisme vis-à-vis de la lumière blanche), chaque rayon possédant originellement tel ou tel état. Nous retrouvons dans cette saisie du phénomène le mode caractéristique d'appréhension de l'atomiste Newton.

L'interprétation du phénomène de la diffraction, que Newton appelle de façon significative phénomène d'inflexion, est de même extrêmement délicate dans le cadre des théories de l'émission. En effet, contrairement à Grimaldi, mais aussi à Robert Hooke, qui vient de réaliser des expériences sur cette question au cours des réunions de la Royal Society, Newton n'introduit pas dans ce contexte expérimental l'idée d'un mode spécifique de propagation de la lumière. Pour lui, ces phénomènes résultent simplement d'une multiplicité de réflexions se produisant à proximité de la partie extrême de l'obstacle, soit en raison de la présence

d'un milieu éther de densité variable entourant et pénétrant l'extrémité de l'objet placé sur le trajet de la lumière (Lettre de Newton à Oldenburg du 7 décembre 1675 ; *Correspondence*, I, 362 et sq.), soit, comme dans les *Principia*, en faisant intervenir l'action attractive des corps frôlés sur les particules constituant les rayons (livre I, section XIV).

Newton réalise au cours des années 1690 d'intéressantes observations, sans signaler néanmoins la présence de franges à l'intérieur de l'ombre, lorsqu'il présente ses résultats sur la diffraction-inflexion dans la troisième partie de l'*Optique*.

Christiaan Huygens et les conceptions ondulatoires. — À l'inverse de la théorie newtonienne, celle de Huygens s'inscrit pleinement dans le cadre des théories des milieux. Cependant, par son approche très subtile du mode de propagation de la lumière, Huygens renouvelle l'ancien concept géométrique de rayon et dépasse très largement les travaux antérieurs de Thomas Hobbes (1588-1679), Robert Hooke (1635-1703), Isaac Barrow (1630-1677) ou Ignace-Gaston Pardies (1636-1673). En effet, dans le *Traité de la lumière* (Leyde, 1690), dont les premières rédactions datent de 1677-1678, Huygens compare la lumière au son et, en conséquence, assimile la lumière à la propagation, dans le temps, d'une vibration longitudinale, c'est-à-dire parallèle au rayon, à travers un milieu ou éther matériel. L'analyse du mouvement se produisant dans la matière étherée conduit Huygens à considérer que tous les points d'une onde — il ne fait pas d'hypothèse sur sa périodicité — peuvent être le siège d'un nouvel ébranlement. Leur enveloppe constitue alors une nouvelle surface d'onde susceptible de se propager indéfiniment : « Il y a encore à considérer dans l'émanation de ces ondes, que chaque particule de la matière, dans laquelle une onde s'étend, ne doit pas communiquer son mouvement seulement à la particule prochaine, qui est dans la ligne droite tirée du point lumineux ; mais qu'elle en donne aussi nécessairement à toutes les autres qui la touchent, et qui s'opposent à son mouvement » (*Traité de la lumière*, p. 17).

Huygens dégage ainsi le cadre général du célèbre « Principe de Huygens-Fresnel » ou principe de l'enveloppe des ondes élémentaires dont le rôle est si important dans la construction de l'optique de Fresnel et dans la compréhension des phénomènes de diffraction au XIX^e s., lorsque le développement de l'analyse mathématique permet enfin d'utiliser ce principe de façon pertinente. En effet, le modèle proposé par Huygens rend déjà très difficile, à strictement parler, l'interprétation de la propagation rectiligne si l'on ne possède pas une conceptualisation mathématisée adéquate. Newton, dans la huitième section de ses *Principia* intitulée « De la propagation du mouvement dans les fluides », avait déjà soulevé les difficultés liées à la diffusion du mouvement lorsque celui-ci s'effectue dans un fluide ou plus exactement lorsque le fluide sert de support à la transmission du mouvement. Le titre de la Proposition XLII est à cet égard tout à fait révélateur :

« Tout mouvement propagé dans un fluide s'éloigne de la ligne droite dans des espaces immobiles. »

S'appuyant toujours sur son modèle théorique Huygens s'attache ensuite à rendre compte de la réfraction. Il est, contrairement à Newton et aux tenants des théories de l'émission, conduit à démontrer, comme Pierre Fermat, que la lumière dans le cadre de sa théorie se propage plus vite dans l'air que, par exemple, dans le verre. Ces conséquences divergentes des théories de l'émission et des milieux seront mises à profit dans la première moitié du XIX^e s. pour rejeter, à la suite des expériences d'Hippolyte Fizeau (1819-1896) et de Léon Foucault (1819-1868), les théories de l'émission. En outre, dans la réfraction de Huygens et contrairement par exemple à l'approche hookienne dans la *Micrographia*, le front d'onde reste perpendiculaire à la direction de propagation.

Huygens consacre le chapitre V de son *Traité de la lumière* à étudier très longuement, avec beaucoup d'élégance, le phénomène de la double réfraction du spath d'Islande. À cette fin, il suppose que deux ondes se propagent avec des vitesses différentes à l'intérieur du spath : l'une ordinaire ou sphérique, l'autre extraordinaire ou elliptique (ellipsoïde de révolution). Il montre alors que la répartition régulière des parties constitutives du spath (réseau rhomboédrique) permet le dédoublement de la vitesse à l'intérieur du cristal et la réfraction des deux ondes conformément aux observations d'Érasme Bartholin.

À la fin de son analyse de la biréfringence Huygens remarque, sans en donner d'interprétation, que les deux rayons issus d'un premier spath n'ont plus relativement à un second les mêmes comportements, et que, suivant les orientations respectives des deux cristaux, le nombre des rayons émergents comme leurs intensités varient.

Quoique Newton ne traite pas du spath d'Islande dans les grandes parties de son *Optique*, il y consacre cependant, dans le Troisième livre, les Questions 25 et 26. L'opposition existant entre le style de l'optique newtonienne et le style de l'optique hugonienne est saisissante. Newton conclut en effet : « Chaque rayon de lumière a donc deux côtés opposés doués d'une propriété essentielle, d'où dépend la réfraction extraordinaire, et deux autres côtés qui n'ont pas cette propriété [...] » (*Optique*, trad. J.-P. Marat).

Ainsi, de la réflexion partielle à la double réfraction, le rayon lumineux acquiert progressivement de nouvelles propriétés et devient bien complexe.

C'est Étienne-Louis Malus (1775-1812) qui introduit au tout début du XIX^e s., dans le cadre de sa théorie corpusculaire, le terme de polarisation. Cette théorie, développée quelques années plus tard par Jean-Baptiste Biot (1774-1862), est rapidement supplantée par l'optique ondulatoire fresnelienne reposant sur l'hypothèse de la transversalité des vibrations lumineuses.

Si Huygens a magnifiquement traité de la double réfraction du spath d'Islande, il a, en revanche, laissé de côté l'analyse des phénomènes de la diffraction et des lames minces. Il est remarquable de constater que

ces phénomènes, qui seront centraux dans l'élaboration des théories ondulatoires de la lumière au XIX^e s., sont absents des écrits de Huygens. Il n'a pu, tout simplement, dans le cadre de sa théorie, en donner une analyse cohérente et pleinement satisfaisante. Il a donc préféré ne rien présenter à la postérité.

Le dépassement du double aspect de la lumière

Au XVIII^e s. newtonien et corpusculariste succède, après les expériences de Fizeau et Foucault et les splendides travaux théoriques d'Augustin Fresnel (1788-1827), un XIX^e s. ondulatoire. Celui-ci, tout d'abord marqué par l'hypothétique éther de Fresnel aux propriétés mécaniques difficilement conciliables, est ensuite investi, à partir des années 1870, par la théorie électromagnétique de James Clerk Maxwell (1831-1879).

Maxwell conclut, sur la base de ses fameuses Équations, que dans le cas d'un signal électromagnétique variable le milieu diélectrique peut être le siège d'ondes transversales dont la vitesse de propagation est analogue à celle de la lumière. Ainsi se trouvent rapprochés l'éther lumineux de Fresnel et l'éther des actions électromagnétiques. Cette intégration de la lumière dans les phénomènes électromagnétiques oriente alors Maxwell vers le délicat problème du mouvement relatif de la Terre et de l'éther. Ce problème culmine avec la mise en place en 1887 de la célèbre expérience de Michelson et Morley, expérience qui conduit finalement à conclure qu'il est impossible, au moyen d'une expérience physique quelle qu'elle soit, de détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'éther. La voie est ouverte pour les théories einsteiniennes.

En 1905, Albert Einstein (1879-1955) publie simultanément son mémoire sur l'électrodynamique des corps en mouvement, qui pose les bases de la théorie de la relativité, et celui sur l'effet photoélectrique qui introduit, en fait, l'hypothèse des quanta de lumière. Ce dernier mémoire remet donc en question la nature strictement ondulatoire et continue de la lumière défendue au XIX^e s.

C'est cette « double nature » de la lumière que Louis de Broglie (1892-1987) tente de comprendre et d'interpréter dans ses *Recherches sur la théorie des quanta* de 1924. Dans sa thèse, il émet l'hypothèse que la dualité onde-corpuscule est une propriété générale des objets microscopiques et que la matière présente, comme la lumière, un double aspect ondulatoire et corpusculaire. Cette hypothèse se trouvera très vite confirmée par l'observation de phénomènes de diffraction avec des électrons (expériences de Davisson et Germer en 1927, de G.P. Thomson en 1928 et de Rupp la même année).

En généralisant la notion d'ondes de matière, Erwin Schrödinger (1887-1961) parvient à l'équation bien connue de propagation de la fonction d'onde représentant un système quantique donné. Finalement, l'élégant formalisme de la théorie quantique est mis en place autour des années 1925-1930 par Paul Dirac (1902-1984), Niels

Bohr (1885-1962) et Werner Heisenberg (1901-1976). Une page de l'histoire des théories physiques de la lumière est tournée.

► CROMBIE A.C., *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science, 1100-1700*, Oxford, Clarendon Press, 1971 (1^{re} éd., 1953). – HALL A.R., *All was light. An Introduction to Newton's Optick*, Oxford, Clarendon Press, 1993. – MAITTE B., *La lumière*, Paris, Le Seuil, 1981. – RASHED R., *Géométrie et Dioptrique au X^e siècle. Ibn Sahl, Al-Qūhī et Ibn Al-Haytham*, Paris, Les Belles Lettres, 1993. – RONCHI V., *Histoire de la lumière*, Paris, A. Colin, 1956. – SABRA A.I., *Theories of Light from Descartes to Newton*, Cambridge Univ. Press, 1981 (1^{re} éd., 1967). – SIMON G., *Le regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'Antiquité*, Paris, Le Seuil, 1988.

Michel BLAY

→ Chaleur ; Corps noir ; Corpuscule ; Couleur ; Cristal ; Éther ; Expansion de l'univers ; Image ; Masse cachée ; Matière [PHYSIQUE] ; Maxwell ; Michelson ; Probabilité [PHYSIQUE] ; Propagation ; Quantique ; Vision.

LWOFF André, 1902-1994

Biologiste et médecin français. André Lwoff est né le 8 mai 1902 à Ainay-le-Château. En 1921, il entre à l'Institut Pasteur, où il fera toute sa carrière. En 1938, il y est chargé de diriger un programme de recherche sur la physiologie bactérienne. Il développera, dans ce cadre, des travaux engagés plusieurs années auparavant en collaboration avec Eugène et Elisabeth Wollman portant sur la lysogénie. Le phénomène connu sous le nom de lysogénie désigne la capacité qu'ont certaines souches bactériennes de produire, en réponse à une activation réalisée soit par des produits chimiques, soit par une irradiation aux rayons ultraviolets, des particules de phage (les phages sont des agents infectieux de la bactérie dont Lwoff montrera l'analogie avec les virus d'organismes supérieurs). Sous l'effet de cette activation, on observe une lyse (destruction) de la bactérie et une libération de particules infectieuses. En l'absence d'activation, le facteur infectieux, qui reste silencieux, se transmet à la descendance de la bactérie (les descendants de bactéries lysogènes sont lysogènes). Lwoff interprétera ces données comme indiquant que les déterminants génétiques du phage se comportent comme des gènes bactériens dans la bactérie lysogène. Le phénomène ne recevra un éclairage décisif qu'avec le modèle de régulation de l'expression génétique imaginé par F. Jacob, puis développé en collaboration avec J. Monod. Ce modèle permet de fournir aux observations réalisées sur les bactéries lysogènes l'interprétation suivante : le génome du phage est intégré dans le génome bactérien sous forme de prophage. Les gènes du prophage sont inactifs en raison de la présence, en certains sites régulateurs de l'expression de ces gènes, de protéines bloquant son expression. Sous l'effet de facteurs externes (en particulier rayons ultraviolets), le blocage de l'expression des gènes du phage est levé : le prophage se met alors à produire les protéines de structure du phage, ce qui

conduit à la production de particules de phage à l'intérieur de la bactérie qui finit par éclater (lyse). L'élucidation complète du phénomène de lysogénie constitue ainsi un fil directeur important de l'œuvre de Lwoff. Celle-ci comporte également plusieurs contributions sur des sujets reliés à ce thème central (classification des virus en particulier). André Lwoff a reçu avec F. Jacob et J. Monod le prix Nobel de physiologie et de médecine en 1965.

● « Lysogeny », *Microbiological Review*, vol. 17, 1953, p. 269. – « From protozoa to bacteria and viruses. Fifty years with microbes », *Annual Review of Microbiology*, vol. 25, 1971, p. 1. – *Jeux et combats*, Paris, Fayard, 1981.

Pascal NOUVEL

→ Bactériophage ; Micro-organisme ; Régulation moléculaire.

LYELL Charles Antony, 1797-1875

Le géologue Charles Antony Lyell, né en Écosse, à Kinnordy, mort à Londres, fit paraître le premier volume de son œuvre majeure, les *Principles of geology*, en 1830. Il est reconnu comme le fondateur de l'uniformitarisme, ou actualisme, qui influença Darwin à ses débuts. Attaché à la notion de temps cyclique, il pense que le passé est identique au présent, et qu'il faut expliquer les phénomènes anciens en ayant recours aux mêmes agents que ceux qui s'exercent encore aujourd'hui, en renonçant à l'explication par les catastrophes. Les causes actuelles agissent uniformément depuis toujours.

Darwin et Wallace lurent attentivement le volume II des *Principles* (1832), essentiellement consacré à la réfutation, dans une perspective fixiste, de la théorie lamarckienne. Paradoxalement, les objections anti-évolutionnistes de Lyell sont ainsi à l'origine de leurs contre-arguments spécifiques, et donc de la théorie de la descendance modifiée par le moyen de la sélection naturelle. En 1855, Lyell, convaincu par un article de Wallace, reconnaît le bien-fondé du transformisme. Il presse Darwin d'écrire un ouvrage exposant sa théorie de la transformation des espèces. Lyell accepte les conclusions de Darwin, les assimilant cependant à une « amélioration » des thèses de Lamarck. Il demeure réticent à entendre à l'homme les effets de l'évolution. En développant l'hypothèse de l'intervention perpétuelle d'un « Esprit dirigeant », il laisse paraître, juge Ernst Mayr, la persistance de son attachement au créationnisme.

► DEVILLERS C. & TINTANT H., *Questions sur la théorie de l'évolution*, Paris, PUF, 1996. – JACOB F., *La logique du vivant. Une histoire de l'hérédité*, Paris, Gallimard, 1970. – LAURENT G., « Lyell », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996. – MAYR E., *One long argument. Charles Darwin and the Genesis of Modern Evolutionary Thought*, Harvard Univ. Press, 1991. – MOLINA G., « Le savant et ses interprètes », in TORT P. dir., *Darwinisme et société*, Paris, PUF, 1992.

Jean Paul THOMAS

→ Actualisme ou uniformitarisme ; Darwinisme ; Développement ; Lamarckisme ; Métamorphisme ; Sélection ; Subsidence.

LYSSENKISME

L'« affaire Lyssenko » restera dans les mémoires comme le cas le plus spectaculaire d'une mystification politique qui ait affecté la communauté scientifique au XX^e s. On la présente le plus souvent comme le fruit d'une machination montée par Staline et comme le symptôme éclatant de la perversité intrinsèque du régime « totalitaire » qui s'était installé en Union soviétique.

Le début de la « carrière » de Trofim D. Lyssenko se situe en 1926-1927 en Ukraine à Gandja ; il y promeut une technique agronomique, la « vernalisation », qui consiste à transformer des variétés de blé d'hiver en variétés de printemps. Cette technique, qu'il présente comme une nouveauté, était en réalité connue depuis longtemps. Elle avait été décrite par le savant américain J.H. Klippart dès 1857 sous le nom de « printanisation ». Plantées au printemps et non en automne, les graines vernalisées peuvent produire des épis ; ce qui permet de réaliser deux récoltes par an et d'élargir la production des céréales aux zones septentrionales.

Dès ce moment, Lyssenko obtient un soutien puissant de la part des autorités politiques : la « vernalisation » devient une technique officielle qu'on impose sur un territoire de plus en plus étendu : 2,1 milliards d'hectares en 1935. Mesure absurde, car elle ne tient pas compte des conditions climatiques et pédologiques qui assureraient son efficacité limitée.

Même constat en 1935 lorsque Lyssenko, devenu directeur de l'Institut agronomique d'Odessa, promeut deux nouvelles techniques : celle des hybrides végétatifs – une technique de greffe empruntée au jardinier de Tambov, Ivan Mitchourin, qui consiste à prendre une plante d'une lignée donnée et à greffer sur elle un greffon d'une autre lignée – et le croisement de formes végétales différant nettement par l'« habitat ou l'origine ».

Lyssenko fonde alors, avec l'académicien philosophe I. Prezent, la revue *Vernalisation*, qui va lui servir à propager sa pensée. L'attaque contre la génétique « néo-mendélienne » commence. Nicolai I. Vavilov se trouve en point de mire. Lyssenko, nommé directeur de l'Institut de génétique d'Odessa, prend la parole à l'Académie Lénine des sciences agronomiques en décembre 1936 pour attaquer la notion de mutation et celle de lignée pure. Il en vient à mettre en question le rôle des chromosomes et des gènes dans l'hérédité. Ces critiques et ces remises en cause, il les présente comme conformes à la philosophie marxiste, au « matérialisme dialectique ».

Staline en personne lui prodigue des encouragements publics. Cette approbation permet à Lyssenko de placer ses hommes aux postes-clés. Plusieurs d'entre

ses adversaires sont arrêtés ou fusillés en 1937. En 1938, le Congrès international de génétique prévu à Moscou est annulé. La même année, Lyssenko est nommé par décret du Conseil des commissaires du peuple à la tête de l'Académie Lénine des sciences agronomiques de l'URSS. En 1940, Vavilov est arrêté. Il meurt de faim à Saratov le 26 janvier 1943. Ses proches collaborateurs sont tous emprisonnés. Dès le lendemain de la guerre, en 1945, Lyssenko reprend l'offensive. Son triomphe a lieu en 1948, au cours d'une session spéciale de l'Académie qui bannit la génétique d'Union soviétique au bénéfice de la « science prolétarienne » de l'hérédité.

Avec Lyssenko, Staline et le Parti avaient cru trouver dès le début des années 1930 une solution unique – de caractère technique – à deux des problèmes majeurs sur lesquels butait leur « construction du socialisme » : la résistance des paysans, qui, soumis à la collectivisation forcée, firent chuter brutalement la production agricole ; celle des intellectuels, qui refusèrent l'embarquement dans un Parti de plus en plus dogmatique.

Le triomphe de Lyssenko en 1948 ne représente pourtant pas le point d'orgue d'une ascension continue commencée vingt ans auparavant. Malgré les truquages statistiques, les résultats déplorables de l'application massive de la plupart des techniques qu'on avait imposées en son nom avaient fait l'objet de dénonciations publiques en 1947-1948. L'occasion avait été fournie par l'échec, qui allait provoquer un désastre agricole à partir de 1949-1950, de la dernière méthode que Lyssenko avait proposée en 1945 sur la base de la critique « de classe » de la génétique mendélienne : la plantation « en nids » du kok-saghiz (« pissenlit à caoutchouc ») et des arbres.

Seule la « biologie bourgeoise », expliquait-il, soutient qu'il existe une lutte à l'intérieur de la même espèce, parce qu'elle transpose dans la nature la conception qu'elle se fait d'une société en perpétuel conflit. En réalité, « dans la nature il n'y a pas de concurrence au sein de la même espèce ». La formule de Lyssenko fera le tour du monde : « La concurrence n'a lieu qu'entre espèces : le loup mange le lièvre, les lièvres ne se mangent pas entre eux ; le lièvre broute l'herbe. Le froment n'étouffe pas le froment [...] ». D'où l'idée que les individus de différentes variétés végétales « s'assistent mutuellement » pour assurer le développement harmonieux de la nature. Il faut donc planter les arbres en nids et attendre que les moins forts « se sacrifient » pour le bien de l'espèce.

La théorie de Lyssenko forme un système bien agencé. La génétique « bourgeoise » est qualifiée de mendélienne pour l'insinuation que permet l'état ecclésiastique du fondateur – « le moine autrichien (!) Gregor Mendel » (Aragon en France). De plus, il applique les mathématiques au vivant : sa génétique est dénoncée comme formaliste.

La génétique bourgeoise n'est pas seulement « mendélienne », elle est dite « weismanno-mendélienne ».

Nouvelle insinuation : la théorie de l'hérédité élaborée par August Weismann (1834-1914) au fil des travaux menés de 1876 à 1885 n'avait-elle pas été exploitée par les nazis dans un sens raciste ? Lyssenko tire sur cette corde politique. Weismann soutenait qu'il existait un « plasma germinatif » ayant une composition chimique et une nature moléculaire bien précise, lequel se transmettrait inchangé de génération en génération, inaccessible aux conditions externes dans lesquelles vit le « soma » (le corps de l'individu). Lyssenko commente : le formalisme du moine Mendel se complète par un substantialisme mystique. Et il ajoute que cette théorie de l'hérédité se trouve en contradiction flagrante avec la théorie darwinienne de l'évolution.

Circonstance aggravante : la doctrine weismannienne a débouché sur les travaux de l'Américain Thomas Morgan, grâce auquel la notion de « mutation » a fait son entrée dans la biologie (« Chromosomes and heredity », *Amer. Nat.*, 44, 1910). On sait que le génie de Morgan avait été notamment d'identifier un matériel expérimental exceptionnellement favorable à l'étude de l'hérédité, la fameuse drosophile. Les lyssenkistes ne se lassent pas de se gausser : les généticiens américains s'acharnent à étudier des mouches par millions ! Ils ne se soucient visiblement guère des rendements agricoles. Face à eux, les tenants de l'agrobiologie soviétique se mobilisent pour accroître le bien-être du peuple : ils travaillent sur l'hérédité non des mouches mais des céréales, des tomates et des vaches ! Au moment où commence la « guerre froide », la génétique mendélienne sera dénoncée comme « weismanno-morganienne », c'est-à-dire en définitive tout à la fois « cléricale, nazie-mystique et américaine ».

Lorsqu'en 1948, ils virent Lyssenko nier la réalité du gène et du chromosome, les généticiens ne pouvaient être que stupéfaits et indignés. Ce fut le cas de tous ceux qui en Occident découvrirent alors la théorie de Lyssenko : la réalité expérimentale de ces objets scientifiques était en effet massivement attestée dans les laboratoires du monde entier depuis des décennies.

Mais depuis 1935, Lyssenko détournait l'essentiel de la discussion sur deux autres points sur lesquels les généticiens se trouvaient beaucoup moins à l'aise. Le « raccord » entre théorie de l'hérédité et théorie darwinienne de l'évolution ne s'effectue, par l'intermédiaire de la biologie moléculaire, qu'au cours des années 1940 dans le cadre de la « théorie synthétique de l'évolution ». Le grand livre de Julian Huxley qui en constitue le manifeste *The New Synthesis* date de 1940. Elle ne s'imposera en Occident qu'à la fin de la décennie qui s'ouvre alors.

Les lyssenkistes s'emploient donc à se présenter comme les défenseurs du darwinisme contre les généticiens. Weismann n'a-t-il pas fait du rejet de l'« hérédité des caractères acquis » le centre de sa doctrine ? Or, ils n'ont aucun mal à montrer que Darwin l'admettait. Mais ils poussent plus loin l'argumentation : ils vont jusqu'à reconstruire l'ensemble de la théorie

darwinienne autour de cette thèse qui n'y jouait pourtant qu'un rôle annexe. Résultat : le « darwinisme » tel qu'ils l'entendent apparaît comme une théorie de l'évolution dont l'essentiel consisterait à affirmer la modification des formes vivantes par le milieu – par « adaptation » – moyennant quoi, ils peuvent établir un lien direct entre Darwin et Lamarck, alors qu'il existe un abîme philosophique entre le concept lamarckien d'adaptation – qui répond à une conception finaliste de l'économie naturelle – et le concept darwinien, puisque le milieu s'y trouve redéfini en fonction de la « lutte pour l'existence ».

Deuxième sommation des lyssenkistes à l'endroit des généticiens : vous n'êtes pas capables de modifier les espèces dans un sens utile à l'homme ; et vous ne pouvez même pas rendre compte des résultats que nous obtenons sur ce terrain.

De fait, en 1948, le « génie génétique » se trouvait encore hors de portée. Mais les généticiens n'osent pas reconnaître franchement la situation. Ils ne font pas valoir qu'on ne passe jamais, dans les sciences, directement de la recherche fondamentale à l'application ; et que l'absence d'application ne prouve rien quant à la valeur de vérité des résultats obtenus. Ils croient pouvoir s'en tirer par des esquives et des annonces.

Cette explication reste encore insuffisante. Le lyssenkisme, loin d'avoir décliné dans les années 1950 en Union soviétique, est en effet resté doctrine officielle jusqu'en... 1965 ! Et Khrouchtchev soutint l'agronome ukrainien peut-être plus vigoureusement encore que ne l'avait fait Staline. Khrouchtchev, paysan ukrainien, ne pouvait manquer d'avoir de la sympathie pour le petit agronome de Gandja. On peut encore évoquer le poids désormais très lourd des cadres lyssenkistes dans l'appareil du Parti et de l'État.

Mais le motif le plus sérieux de cette faveur persistante tient à la « philosophie » officielle de l'État soviétique, laquelle s'est installée à l'issue d'un long débat en 1931 : le matérialisme dialectique. Or, cette philosophie s'est trouvée tout entière engagée du côté du lyssenkisme, en même temps qu'elle constituait l'« âme » du régime soviétique. Et le plus grave, dans un pays où l'on ne badinait pas avec la référence aux pères fondateurs, c'est que Marx et Engels eux-mêmes avaient amorcé sur la question du darwinisme la série des contre-sens qui cadrent avec cette philosophie.

Lorsque Lyssenko et Present, en 1935, veulent s'afficher darwiniens, ils prennent soin de se référer à Marx pour justifier la manipulation qu'ils font subir au concept d'adaptation. Marx n'avait-il pas dénoncé dans la théorie de la lutte pour l'existence une transposition dans la nature de la théorie économique bourgeoise et réactionnaire de T.R. Malthus (1766-1834) ? Darwin lui-même n'avait pas caché que la lecture de l'*Essai sur*

le *Principe de Population* (1798) lui avait ouvert la voie. Dans le vocabulaire du temps, les lyssenkistes disent qu'il y a deux versants dans l'œuvre de Darwin : le versant matérialiste, qui correspond à la doctrine de l'évolution des formes vivantes par adaptation au milieu extérieur ; le versant idéaliste et réactionnaire, qui correspond au concept de lutte pour l'existence emprunté à Malthus. Ils entendent n'en retenir que le second, pour développer et appliquer les thèses qui peuvent y être établies.

Comment Marx et Engels ont-ils été amenés à commettre une pareille bêtise ? Leur correspondance à ce sujet révèle que l'enthousiasme – mitigé – de Marx pour *L'Origine des Espèces* répond au projet de trouver « des bases naturelles » pour la théorie matérialiste de l'histoire. À travers la lecture de Hegel, l'un et l'autre retiennent l'idée d'une « philosophie de la Nature ». D'où les textes nombreux et attentifs rédigés par Engels et justement publiés en 1931 en Union soviétique sous le titre de *Dialectique de la Nature*. Ils recueillent ainsi la conception téléologique de la Nature que partageaient les philosophes romantiques allemands. Une conception qui, contre le mécanisme newtonien, annonçait, sous une forme ou sous une autre, la réconciliation de l'homme et de la Nature, et l'apparition corrélatrice d'une « nouvelle science ».

Le lyssenkisme faisait corps avec l'être même du régime soviétique. L'abandonner, c'était remettre en question ce qui constituait la justification métaphysique de cette société.

- CHRISTEN Y., *Marx et Darwin*, Paris, Albin Michel, 1981.
 – HALDANE J.B.S., *La philosophie marxiste et les sciences*, Paris, Éd. Sociales, 1946 ; *Science en marche*, Paris, PUF, 1952.
 – HUXLEY J., *La génétique soviétique et la science mondiale*, Paris, Stock, 1950. – JEU B., *La philosophie soviétique et l'Occident*, Paris, Mercure de France, 1969. – JORAVSKY D., *The Lyssenko Affair*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1970. – KOTEK J. & KOTEK D., *L'affaire Lyssenko*, Paris, Complexe, 1986. – LECOURT D., *Lyssenko, histoire réelle d'une « science prolétarienne »* (1976), rééd., Paris, PUF « Quadrige », 1995 ; « La « science » de Lyssenko », *Revue des deux mondes*, fév. 1995. – MEDVEDEV J., *Grandeur et chute de Lyssenko*, Paris, Gallimard, 1971. – PRENANT M., *Toute une vie à gauche*, Paris, Encre, 1980. – ROSTAND J., *Science fausse et fausses sciences*, Paris, Gallimard, 1958. – TAGLIAGAMBE S., *Scienza, Filosofia, Politica in Unione Sovietica 1924-1939*, Milan, Feltrinelli Editore, 1978. – WETTER G., *Le matérialisme dialectique*, Paris, Desclée de Brouwer, 1962. – ZAPATA R., *Luttes philosophiques en URSS (1922-1931)*, Paris, PUF, 1983 ; *La philosophie russe et soviétique*, Paris, PUF, 1988. – ZINOVIEV A., *L'avenir radiieux*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1978.

Dominique LECOURT

→ Biotechnologies ; Empirionisme ; Marx et Darwin ; Morgan ; Technique ; Théorie.

M

MACH Ernst, 1838-1916

Physicien et philosophe autrichien. Originaire de Moravie, Mach étudia les mathématiques et la physique à l'université de Vienne. Il enseigna ces disciplines d'abord à l'université de Graz, puis a occupé la chaire de physique expérimentale à l'université de Prague (1867-1895) où il a rédigé ses œuvres majeures consacrées à l'histoire de la mécanique et à l'analyse des sensations. Appelé à la chaire de philosophie et histoire des sciences inductives créée pour lui à l'université de Vienne en 1905, il dut abandonner progressivement l'enseignement auquel il renoncera définitivement en 1901 pour raisons de santé.

Si c'est la lecture des *Prolegomènes* de Kant qui ouvrit Mach à la philosophie, pour la formation de ses idées, c'est celle de Hume qui fut décisive.

Bien qu'il se défende d'être un philosophe, à l'instar d'Avenarius et de Husserl, son projet de retrouver l'image originelle, préthéorique, du monde tel qu'il se révèle dans l'expérience pure, avant toute distinction entre l'âme et le corps, entre le psychique et le physique, avant toute construction théorique ou scientifique, est proprement philosophique. Seule l'expérience nous est donnée : des complexes de sensations. Dans ce tissu mouvant de couleurs, de sons, d'odeurs, de pressions, de durées, d'éléments étendus apparaissent des régions plus ou moins stables qui s'impriment dans la mémoire et trouvent leur expression dans le langage. Nous appelons corps ces complexes relativement stables de sensations lumineuses et tactiles associées aux mêmes sensations spatiales et temporelles. Le monde, y compris le moi, n'est qu'une « masse cohérente de sensations, un peu plus cohérente seulement dans le moi ». Par la suite, Mach remplacera le terme de sensation qui souligne l'aspect subjectif de notre expérience par le terme neutre d'élément.

Dans notre expérience, un complexe particulier d'émotions et de souvenirs est associé à un corps particulier (un complexe d'autres éléments) : c'est le moi. Le moi n'est pas une âme, substance indestructible ; il est « impossible de sauver ». Son unité est pratique : la cohésion de ses éléments l'emporte sur leurs relations avec d'autres éléments.

Les mêmes idées permettent de dépasser la division entre la physique et la psychologie. Les deux ne diffèrent pas par leur objet, constitué de phénomènes du

même ordre, mais seulement par le mode d'approche. La tâche des théories physiques consiste à organiser notre expérience conformément au postulat de l'économie de pensée. Une loi physique est un condensé d'expériences permettant de faire l'économie d'innombrables expériences, une théorie scientifique est une construction coordonnant nos sensations en vue de la prédiction d'expériences futures. Mach, lecteur de Darwin, tient les concepts et les théories scientifiques pour des instruments de la survie de l'espèce.

Une analyse « historique et critique » des concepts et des principes de la physique, en particulier ceux de la mécanique, l'a amené à critiquer les ingrédients métaphysiques dans la science. Le principe de causalité qui choisit plus ou moins arbitrairement tel événement comme cause et tel autre comme effet doit être remplacé par une dépendance fonctionnelle entre les phénomènes observables, exprimée en termes de quantités mesurables. L'espace absolu et le temps absolu doivent être rejetés. Comme, à l'époque de Mach, aucune observation ne saurait nous montrer les atomes, l'hypothèse atomique n'est, dans le meilleur des cas, qu'un « modèle mathématique pour représenter les faits » sans prétention à attendre la réalité ultime de la matière.

L'examen auquel Mach a soumis les principes de la physique portera bientôt ses fruits. Malgré d'ultérieurs malentendus entre Mach et Einstein, la théorie de la relativité doit beaucoup à la critique de Mach. Après la Première Guerre mondiale, un groupe de savants et de philosophes qui forment le Cercle de Vienne commence ses discussions dans le prolongement des idées de Mach qui fut, selon Philipp Frank, « le vrai maître du Cercle de Vienne ».

● *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt* (1883), trad. fr., *La mécanique, exposé historique et critique de son développement*, Paris, Hermann, 1904. — *Die Analyse der Empfindungen...* (*Analyse des sensations*), Iéna, Fisher, 1886, 9 éd. jusqu'en 1922. — *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung* (1905), trad. fr., *La Connaissance et l'erreur*, Paris, Flammarion, 1908. — *Die Prinzipien der Wärmelehre. Historisch-kritisch entwickelt*, Leipzig, Barth, 1896. — *Populär-wissenschaftliche Vorlesungen*, Leipzig, Barth, 1896.

► BLACKMORE J.T., *Ernst Mach. His Work, Life, Influence*, Berkeley 1972. — BOUVIER R., *La pensée d'Ernst Mach*, Paris, 1923. — MUSIL R., *Pour une évaluation des doctrines de Mach*

(1908), trad. partielle, Paris, PUF, 1985. — STADLER F., *Vom Positivismus zur Wissenschaftlichen Weltanschauung*, Vienne-Munich, Löcker, 1982.

Jan SEBESTIK

→ Cercle de Vienne ; Crise de la physique moderne ; Déterminisme ; Empirionisme ; Énergétisme ; Espace ; Maîtrise de l'erreur ; Masse ; Positivism ; Réel ; Statistique.

MACHINE DE TURING

L'avènement de la métamathématique

La machine de Turing n'est pas seulement une « machine logique » permettant une autre formalisation de la notion de calculabilité. Elle apparaît dans le mémoire d'un étudiant de 23 ans ayant suivi le cours de logique mathématique de M.H.A. Newman donné au King's College de Cambridge en 1935. Dans la veine des résultats d'indécidabilité qui suivront, elle porte un coup fatal au programme de Hilbert, en donnant, de manière négative, une réponse définitive au problème de décision (*Entscheidungsproblem*). Ce programme, du nom du fondateur de l'école de Göttingen, projetait de résoudre tous les problèmes de mathématiques en faisant appel à une formalisation axiomatique dont D. Hilbert espérait pouvoir prouver la non-contradiction, et ce s'appuyant sur des méthodes « finitistes ». En effet, lors de la conférence des mathématiciens à Paris en 1900, Hilbert posait clairement dans son célèbre discours sur les problèmes futurs des mathématiques, le statut particulier qu'il accordait à la non-contradiction — en tant que condition *a priori* pour le développement de toute théorie mathématique — ainsi qu'à la question de la décidabilité dans les théories axiomatiques. C'est-à-dire à la possibilité de compter avec une procédure pour déterminer, en un nombre fini d'étapes (ce qu'on appelle procédure effective), la validité d'une expression dans la logique des prédicats du premier ordre. D'autres formulations équivalentes sont possibles, nous prenons ici celle donnée par Hilbert et Ackermann en 1928, à laquelle se réfèrent les articles de 1936.

Le positivisme affiché, en mathématiques, à la fin du XIX^e s., accompagne des bouleversements majeurs, dont on citera l'annexion de la logique, et avec elle, l'abandon de la notion de vérité au profit de celle de raisonnement valide dans un système formel. La preuve d'un énoncé mathématique devient alors objet mathématique : c'est l'avènement de la métamathématique. Les systèmes formels créent le mirage d'une mathématique cohérente et complète, engendrée par le « jeu défini par les axiomes », au dire de H. Poincaré. Désormais on ne fera plus appel à l'intuition pour définir les objets de base, comme par exemple une droite ou un ensemble, mais on les posera — de manière plus ou moins arbitraire — par des axiomes. Les efforts colossaux dont témoignent, par exemple le *Grundgesetze* de Frege, ou les *Principia Mathematica* de

B. Russell et A.N. Whitehead, allaient révéler les limitations intrinsèques à l'entreprise de formalisation en seulement trois décennies : paradoxes (Burali-Forti, 1897 ; Russell, 1902), puis la fameuse incomplétude mise en évidence par Gödel (1931), et enfin la réponse négative au problème de décision (1936).

Dans ce contexte, la machine de Turing n'est qu'une définition utilisée pour formuler des idées (calculabilité, décidabilité) identifiées comme essentielles de part et d'autre de l'Atlantique, comme nous le montrons dans le paragraphe suivant. Néanmoins, la démarche exceptionnelle de Turing pour introduire ce concept, ainsi que sa postérité, concrétisée par l'apparition de l'informatique, lui confèrent une importance particulière.

1936 : la confluence des idées

En 1936 sont publiés de manière indépendante, par A. Church, E.L. Post, et A.M. Turing, trois articles proposant une définition formelle de la notion intuitive de calculabilité effective. Très rapidement l'équivalence entre ces définitions est établie. Cependant, le contexte dans lequel chacun de ces auteurs est arrivé à les énoncer diffère.

Church et Post partent de l'étude des systèmes axiomatiques, et aboutissent à des définitions différentes et fondamentales. Pour Church qui a réalisé ce travail avec son étudiant S. Kleene, la notion fondamentale est celle de fonction. Ainsi il définit, en 1932, ce qu'aujourd'hui nous appelons le lambda-calcul non typé. Le pouvoir d'expression de cette théorie impressionne ses propres découvreurs : en 1933 Kleene montre qu'elle capture les nombres naturels et toutes les fonctions habituelles sur les entiers, puis à la fin de 1933, Kleene et Rosser (un autre étudiant) soupçonnent que la théorie est inconsistante. Dès février 1934 Church propose sa « thèse », en identifiant la notion de calculabilité effective avec la lambda-calculabilité (ou de fonction lambda-définissable). Notons aussi que le groupe de Princeton — Church, Kleene et Rosser — avait montré l'équivalence entre lambda-définissable et les fonctions récursives de la théorie Herbrand-Gödel (voir Davis, 1982, p. 8).

La voie empruntée par Post est celle des systèmes formels, dont il avait donné une théorie générale en 1920. Dans ces travaux, il pose la question épistémologique centrale de la délimitation des résultats mathématiques obtenus de manière « purement formelle » de ceux qui relèvent de la compréhension et de la sémantique. Il aboutit à une théorie de ce qu'il nomme les systèmes formels canoniques et normaux, et énonce ce qu'*a posteriori* Davis identifie comme la « thèse de Post », où la notion de calculable se trouve formalisée dans le cadre de cette théorie. Remarquons que malgré le résultat qu'il avait obtenu en 1921 montrant que les systèmes canoniques peuvent être axiomatisés dans le calcul des prédicats du premier ordre, Post ne réalisa pas leur application au *Entscheidungsproblem*.

La démarche de Turing est exceptionnelle en

mathématiques. Pour justifier et poser la définition formelle de sa machine, il s'appuie sur une modélisation d'une activité humaine : le calcul. En opérant une décomposition en étapes simples du calcul humain il arrive à discrétiser le processus et à formuler la notion d'état de la machine — modèle du cerveau humain à une étape d'un calcul.

Avant d'explicitier le fonctionnement de la machine, remarquons que les articles de Church et de Turing mettent en jeu trois notions distinctes : (i) la notion intuitive de calculabilité, (ii) la définition formelle de lambda-définissabilité, et (iii) la définition de « calculable avec une machine de Turing » issue d'un modèle du mode de calcul humain. Nous distinguons donc la thèse de Church, qui consiste à identifier (i) avec (ii), de la thèse de Turing, d'une portée philosophique bien plus importante, identifiant (i) avec (iii).

D'une machine à calculer à la théorie de la calculabilité

Turing dans son article, dont le titre est « On Computable Numbers with an application to the Entscheidungsproblem », part d'une étude de la classe de réels qu'il nomme « calculables » et qu'il définit comme étant les réels de l'intervalle (0,1) tels que leur développement binaire (la suite infinie de 0 et 1 qui les définit) est imprimé par une certaine machine. Une machine qui, en tant que dispositif mimant les manipulations symboliques qu'opère un humain qui réalise un calcul, prétend modéliser la notion intuitive de calculabilité.

La description qui en résulte est simple. Étant donné un ensemble fini de symboles, une machine se compose : premièrement d'un ruban comportant des cases pouvant contenir un symbole, ayant une extrémité et une longueur potentiellement illimitée, et pouvant se déplacer à gauche ou à droite ; deuxièmement d'une tête de lecture capable de lire, d'effacer ou d'écrire un symbole sur le ruban. En outre, la machine peut se trouver dans un nombre fini d'états, de sorte qu'à chaque étape le comportement de la machine est déterminé par l'état courant et le symbole inscrit sur le ruban qui se trouve face à la tête de lecture. La définition formelle d'une machine de Turing peut donc s'énoncer comme étant la liste finie de quintuplets de la forme : $pxyRq$ ou $pxyGq$ ou $pxyDq$. Chaque quintuplet représente la « configuration » de la machine se trouvant dans l'état p , avec le symbole x face à la tête de lecture, et dont l'action sera de remplacer le symbole x par le symbole y dans cette case, soit rester sur la même case (R) ou soit se déplacer vers la case à gauche (G) ou à droite (D), et passer à l'état q . De plus, la liste de quintuplets doit définir un comportement déterministe de la machine, c'est-à-dire que pour chaque symbole x et chaque état p il n'y aura au plus qu'un quintuplet commençant par px . Par convention l'arrêt de la machine correspond à la configuration dans laquelle aucun quintuplet ne peut s'appliquer. La notion de nombre calculable se formalise à son tour en distinguant, parmi les machines qui impriment les symboles

« 0 » et « 1 », celles qui n'en impriment qu'un nombre fini que Turing nomme cycliques (*circular*), des autres, qui produisent un nombre calculable, et qui sont dites acycliques (*circular-free*). Pour montrer l'impossibilité de faire une liste des nombres calculables, Turing introduit la notion fondamentale de *machine universelle*. En utilisant un codage numérique pour représenter chaque quintuplet, il est possible d'associer à chaque machine M un nombre descriptif unique. Turing montre par la suite — en la définissant — qu'il existe une machine particulière, dite universelle et notée U , telle que si on lui fournit en entrée (inscrit sur la bande), le nombre descriptif de M , elle calcule la séquence que M calculerait, si elle était construite. L'application au problème de décision se fait en deux temps. Dans un premier temps en montrant que le *problème de l'arrêt* de la machine n'est pas calculable, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de définir une machine A telle que si on lui fournit en entrée le descriptif de M , elle imprime un certain symbole x si M est acyclique et un symbole y si elle est cyclique. L'argument est simple : quel symbole inscrirait-elle si on lui donnait en entrée le descriptif de A elle-même ? Dans un deuxième temps, Turing montre que le problème de décision se ramène à celui de l'arrêt : il n'existe donc pas de machine capable de décider de la validité d'une formule logique du premier ordre.

Postérités de la machine de Turing

Si les machines de Turing fermaient définitivement la porte au positivisme naïf du programme de Hilbert, la notion de machine universelle laissait entrevoir la possibilité de construire un dispositif capable de calculer tout ce qui est calculable, ou disons-le dans les termes de la thèse de Turing, tout ce qu'un calculateur humain peut faire. Les bases formelles étaient posées pour la quête du « cerveau artificiel ».

La barrière entre mathématique et physique fut franchie par Turing durant son séjour à Princeton (sept. 1936-juill. 1938), lorsqu'il appliqua certaines de ses idées sur le calculateur universel pour construire un calculateur électrique binaire. Durant la Seconde Guerre mondiale, Turing fut affecté au centre anglais de décryptage basé à Bletchey Park où, avec nombre d'autres scientifiques, il se consacra à la cryptanalyse du système de chiffrement allemand fondé sur la machine Enigma. A cette période (1943), fut construit le calculateur à tubes électroniques Colossus, prédécesseur de l'ordinateur ENIAC (1944), construit à Philadelphie sous la direction de J. von Neumann, qui sut comprendre l'intérêt pratique des idées de Turing, et les mettre en application.

Les idées très en avance de Turing (nous sont connues en détail grâce au rapport ACE (1945) où le paradigme d'ordinateur fondé sur le modèle dit de Turing-von Neumann, est explicité depuis les diagrammes des circuits logiques jusqu'aux possibles applications (numériques, jeu d'échecs, etc.), avec une évaluation des coûts de réalisation. Ses idées

n'obtinrent pas de concrétisation immédiate, non seulement à cause des difficultés techniques de mise en œuvre, mais aussi par des problèmes propres à sa situation personnelle (voir Hodges, 1988). Néanmoins, le rapport parvint aux États-Unis et fut une des sources d'inspiration pour celui du projet EDVAC, dont J. von Neumann était responsable, qui marque la naissance de l'informatique moderne.

Ces premiers calculateurs étaient encore loin du paradigme de la machine universelle. Cependant, la distinction essentielle entre programme (*software*) et le dispositif matériel qui l'exécute (*hardware*) apparaît déjà clairement. Notons que cette distinction n'a rien d'évident, car elle suppose l'identification des opérations de base permettant de définir par composition tout calcul. Par exemple, dans les écrits de Babbage, cette distinction n'est pas clairement posée concernant sa machine analytique (voir Gandy, 1988).

C'est à partir des années 1960 que la machine de Turing trouva une nouvelle application théorique en permettant l'élaboration d'une théorie de la complexité algorithmique. Cette théorie répond au problème posé par la nécessité pratique et théorique de comparer des algorithmes de manière indépendante de la technologie utilisée pour leur mise en œuvre. Pour cette théorie, la machine de Turing joue le rôle de mètre-étalon en vertu du résultat qui assure que les bornes de la complexité d'un algorithme ne sont transformées, lors d'un changement de machine, au plus que par une fonction polynomiale. Il en résulte la construction mathématique d'une hiérarchie de classes de complexité.

Le deuxième grand legs du travail de Turing, lié aux présupposés matérialistes de la thèse de Turing, et plus généralement à la tradition identifiant calcul et pensée, est aujourd'hui perpétué par ceux qui, au sein de la recherche en Intelligence artificielle, considèrent les thèses avancées par Turing en 1950 (voir Turing, 1950) comme leur programme. Leurs réponses, aujourd'hui encore, sont pour le moins insuffisantes. Si calculer est une manière de penser, la pensée en est-elle calculable ?

» DAVIS M., *The Undecidable : Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolved Propositions, Unsolvable Problems and Computable Functions*, éd. M. Davis, New York, Raven-Press, 1965 (contient la reprod. des articles de 1936 cités) ; « Why Gödel didn't have Church's thesis », *Information and Control*, vol. 54, 1982 (tentative d'explication de la raison pour laquelle Gödel n'a pas énoncé la thèse de Church). — GANDY R., « The confluence of ideas in 1936 », *The Universal Turing Machine - A Half Century Survey*, éd. R. Herken, New York, Springer-Verlag, 1988. — GIRARD J.Y. & TURING A.M., *La machine de Turing*, Paris, Le Seuil, 1995 (trad. fr. de Turing 1936 et de Turing 1950). — HODGES A., *Alan Turing ou l'énigme de l'intelligence*, Paris, Payot, 1988. — TURING A.M., « Computing machinery and intelligence », *Mind*, LIX, 236, 1950.

Pablo ARGON

→ Cognitivisme ; Complexité algorithmique ; Computation ; Information et codage ; Informatique ; Logique et informatique ; Monisme ; Réurrence ; Sciences cognitives ; Turing.

MAÎTRISE DE L'ERREUR

« On se trompe si souvent », disait Stieltjes. Le plus petit calcul révèle sans tarder la place constitutive de l'erreur dans la condition humaine. Condition libre : la liberté de l'homme est engendrée par sa capacité d'erreur, la possibilité de se tromper ouvre des plages de l'autonomie. Bien plus, la nature, la vie elle-même est ce qui est capable d'erreur : anomalies, mutations, accidents confèrent une variabilité erratique aux phénomènes. Fruit de cette errance, l'homme est « un vivant qui ne se trouve jamais tout à fait à sa place » (M. Foucault, *Dits et écrits*, vol. 4, p. 774). Le souci de l'erreur est le critère de scientificité le plus simple. Les dimensions et conceptions de ce souci de l'erreur témoignent de l'apport des « Maîtres de l'erreur » du XIX^e s. (§ 1). Depuis, les pratiques scientifiques s'inscrivent dans une pluralité de compréhension de l'erreur (§ 2). Enfin, la place accordée à ce souci de l'erreur dans la vie civile conditionne de grandes options morales et politiques (§ 3).

Les « Maîtres de l'erreur »

Dans l'histoire de l'analyse mathématique et de la théorie des probabilités, la période des « Maîtres de l'erreur » succède à l'âge classique des probabilités, le XVIII^e s., où « l'analyse des hasards » découlait d'un « art de conjecturer ». Cette période est à peu près le XIX^e s. Les mathématiciens ne sont plus, depuis lors, des « Maîtres de vérité », constate Morris Kline (*Mathématiques : la fin de la certitude*, Paris, Bourgois, 1989). Autour de la théorie des erreurs, la recomposition d'un nouveau type d'adéquation au « réel » a apporté des exigences de rigueur tout à fait inconnues auparavant, tant et si bien qu'il n'y a aucune larme à verser sur cette « fin de la certitude ».

Un ouvrage de Gauss consacre l'avènement de la théorie des erreurs. Cet exposé de mécanique céleste édité en 1809, *Théorie du mouvement des corps célestes parcourant des sections coniques autour du soleil* (trad. fr. E. Dubois, Paris, A. Bertrand, 1864), constitue la « révolution des erreurs », la transformation radicale du corpus statistico-probabilitaire lui faisant quitter l'âge classique de « l'art de conjecturer ». Dans cet ouvrage, il est beaucoup plus question de l'ordre des calculs que de l'ordre du monde. L'exposé de Gauss n'est pas un système du monde, une philosophie naturelle, une mise en ordre hypothétique du monde. Le lecteur auquel s'adresse l'exposé de Gauss est un homme de calcul, et non l'élément d'un public devant lequel se dévoile l'ordre supposé du monde. Ce qu'il faut viser à stabiliser c'est l'enchaînement des calculs dans leur réalité opératoire. Dès le début de son exposé Gauss introduit l'erreur ; l'introduction de la notion d'erreur lui fournit des règles générales sur la stabilité numérique des algorithmes, et aussi un moyen de comparer la précision des algorithmes par le calcul des formules d'erreur. L'erreur restait, chez Jacques Bernoulli, dans une définition logique et juridique de

mauvaise conclusion, ou de mauvaise procédure. Elle était synonyme d'échec, d'égarement méthodologique. Chez Gauss, l'erreur est omniprésente. Un même enchaînement de formules peut donner un résultat excellent ou totalement erroné selon la valeur intermédiaire d'une variable dans le calcul. La procédure à rejeter est maintenant celle qui ne peut atteindre un certain degré de précision. L'autonomie par rapport aux modèles logico-judiciaires de progression argumentaire est ainsi pleinement acquise. L'erreur s'intercale toujours et barre même l'accès à une vérité aussi assurée que la circulation des corps célestes. Son omniprésence conduit à une philosophie de l'approximation : il s'agit de s'approcher en réduisant au maximum l'impact des erreurs. Bernoulli en restait à une définition quasi juridique de l'erreur, où les pièges étaient le document inauthentique, le faux témoignage, la mauvaise pondération d'une procédure. Pour Gauss, le piège c'est le modèle inadéquat, ou la propagation explosive des erreurs numériques.

S'adapter à une situation, ajuster une épure schématique à une forme distincte, marquer par des évaluations un environnement naturel et social, progresser dans une argumentation : dans le creuset de toutes ces interrogations pratiques, les « Maîtres de vérité » proposaient un type d'affirmation de la vérité pour une culture orale et rhétorique (M. Detienne, *Les Maîtres de vérité dans la Grèce archaïque*, Paris, Pocket, 1967). La mise en parallèle des « Maîtres de vérité » et des « Maîtres de l'erreur » oppose ce cadre d'une culture orale, à celui d'une culture écrite, par excellence, celle des calculs. Les « Maîtres de vérité » ont fait que l'efficacité magico-religieuse de la parole royale se transfère aux décisions d'assemblées et à l'application de règles définies. Les « Maîtres de l'erreur » vont apporter des solutions novatrices, et donnent un contenu à un programme de sciences sociales, où l'exigence de précision et d'efficacité remplace les certitudes doctrinaires. Dans ce creuset d'interrogations, les « Maîtres de l'erreur » font jouer ce qu'Emile Borel a désigné par la « valeur pratique du calcul des probabilités ». Le calcul n'est opératoire que pour un contexte déterminé. Mais le calcul transforme une définition très vague de la vérité, comme adéquation au « réel », en des stratégies efficaces d'approche, où le « réel » peut même être rigoureusement inaccessible et le rester, sans que cela soit dommageable.

La réception de la « révolution probabilitaire » du XIX^e s. est marquée par les vives oppositions qu'elle suscite chez les positivistes et les expérimentateurs. L'erreur serait domestique, proche par sa capacité de séduction, et même entièrement domesticable au laboratoire, avec des conditions d'existence « déterminées d'une manière absolue », comme le dit Claude Bernard. L'erreur aurait une origine toujours connaissable (« il n'est pas d'erreur qu'on ne puisse expliquer »), et des routines de méthode permettraient de s'affranchir de la puissance de séduction de l'erreur, de corriger « l'induction défectueuse » (Victor Brochard, *De l'erreur*, 1879). L'utilitarisme de John Stuart Mill

réclame « une bonne éducation physique et morale, un contrôle approprié des influences pernicieuses » (*L'utilitarisme* (1861), trad. fr. G. Tanesse, Paris, Flammarion « Champs », 1988, p. 146). Une correction privée ferait la vérité sur l'erreur et éviterait tous les maux du monde. Ainsi, la culture scientifique de l'erreur est restée dans une diffusion bridée par les positivismes et utilitarismes du XIX^e s.

Mesure et erreur

L'exigence scientifique se compose de règles d'indépendance par rapport à l'opinion commune, d'un pilotage stratégique à travers la multiplicité des erreurs possibles au cours d'une recherche, d'une déprise par le chercheur de ses propres intuitions premières, et d'un usage des mesures expérimentales, des connaissances et des formalismes ajustés aux objectifs du programme de recherche. Au cours d'une recherche, l'agenda de l'erreur est dynamique : l'erreur est soupçonnée dans les étapes de collecte des données et de formalisation des connaissances, dans les formalismes eux-mêmes, les calculs et les résultats. Depuis Gauss, l'exigence scientifique compose avec l'erreur, lui reconnaît une perpétuelle présence et ne cherche pas à l'éradiquer dans des combats décisifs au moyen de méthodes définitives. L'exigence scientifique opère des délimitations critiques des approches employées, de la viabilité des projets, et de la confiance dans les résultats.

La rigueur elle-même a une histoire faite d'abandons de précautions inutiles et de découvertes de difficultés nouvelles, d'avancées et de reculs dans la maîtrise des erreurs épistémiques et pratiques. Dans les grands projets d'ingénieurs, succède la série de la maîtrise progressive des erreurs de conception des ouvrages d'art lors de la généralisation des réseaux de chemins de fer, à la série noire des erreurs de conception dans les grands projets du XX^e s. : bateaux, avions, dirigeables, ponts, fusées, barrages, immeubles surdimensionnés causent des désastres. L'histoire de la rigueur ne se résume donc pas dans l'histoire d'un progrès continu de la précision et de la mesure.

Quelques grandes figures permettent d'éclairer le caractère composite de l'exigence scientifique. L'architecte antique Vitruve nous indique combien l'exigence scientifique est exclusive d'une éthique professionnelle corporatiste. L'apport de Galilée réside dans un principe nouveau de pondération des précautions et scrupules ; celui de Gauss, dans l'instrumentation d'une multiplicité sourde de l'erreur ; et celui de Neyman, dans l'introduction des risques associés à des erreurs de types différents.

Vitruve. — Les premiers traités d'architecture délimitent une profession pour en bannir « les ignares et les impétueux » (Vitruvius, *De architectura*, VI,1,6). Le bon professionnel possède le souci de la mesure, et non celui de l'erreur. Cette mesure est celle des bonnes proportions. Un jugement avisé d'expert domine une

mesure par simple unité de référence. Le 1^{er} s. de notre ère est marqué par une crise urbaine, des grandes villes comme Rome ou Lyon ont grandi trop vite, d'où des problèmes réels de sécurité urbaine. Vitruve ne nous parle jamais de ces problèmes, et témoigne au contraire de la lutte victorieuse de la profession des architectes à appointements fixes des villes contre toute forme d'innovation technique, même si celle-ci apporte la première règle de prudence technicienne, celle sur les effets d'échelle.

Galilée. – La prudence technicienne se retrouve formulée et augmentée de nouvelles considérations dans les *Dialogues concernant deux nouvelles sciences* de Galilée. Les principales erreurs de conception sont présentes dans le texte de Galilée. Il précise l'importance des effets d'échelle, aborde les problèmes de résistance des matériaux et des structures, et généralise une critique technique aux moyens de précaution. Même un moyen de précaution peut conduire au désastre. Aussi, les moyens de précautions doivent être mesurés dans l'approche galiléenne, qui est déterministe et non systémique.

Cette prudence technicienne ne distingue pas erreur pratique et erreur épistémologique, l'erreur dans la réalité et l'erreur sur le papier. Un tout mesurer, tout graduer doit permettre d'éviter les échecs et désastres. La mesure prend ainsi sa revanche sur le jugement d'expert qui était privilégié par Vitruve. Seconde révolution : l'innovation, sortie des conventions admises, était synonyme d'erreur chez Vitruve, tandis que pour la prudence technicienne, l'innovation participe d'abord pleinement de la vérité et non plus de l'erreur.

Gauss et Neyman. – Une graduation universelle des objets ou le jugement expert de qualité ne sont sans doute plus que des figures périphériques pour la recherche scientifique contemporaine. Pour Galilée ingénieur ou Vitruve l'expert l'erreur était exception, rare événement en dehors de normes techniques ou sociales. Déjà chez Pascal, puis de façon instrumentée chez Gauss, l'erreur probabiliste s'impose. L'erreur n'est plus alors singularité rare, mais multiplicité au détail inaccessible. La conception gaussienne de l'erreur autonomise les conduites de protocoles scientifiques par rapport aux procédures d'enquête judiciaire, alors que le XVIII^e s. avait tenté par un art de conjecturer d'améliorer des procédures d'enquête qui restaient proches des procédés judiciaires.

Les fruits de l'erreur probabiliste sont très nombreux pour la conduite des protocoles expérimentaux, les modélisations et la compréhension des phénomènes, mais n'ont été introduits que progressivement, surmontant les oppositions de Comte et de Claude Bernard aux procédés statistiques et probabilitaires. L'erreur probabiliste conduit à une modernisation de la définition du mesurable (acquise avec Quetelet) et de la mesure (acquise avec Borel). Les approches de Gauss et de Neyman dissocient l'erreur épistémologique et l'erreur pratique de façon différente. Dans une

approche à la Gauss, les erreurs pratiques sont nombreuses et mal connues, la modélisation probabiliste permet de les surmonter et de minorer une erreur épistémologique. Une approche à la Neyman privilégie une décision à prendre. L'accent est alors mis sur l'erreur pratique, celle des conséquences d'une mauvaise décision.

Rigueur et adaptation

« L'introduction en pathologie du concept d'erreur est un fait de grande importance », soulignait Canguilhem. La première maladie génétique est décrite par Garrod en 1909. L'erreur de la vie se manifeste le plus souvent à la longue ou à l'occasion, et non plus uniquement dans des malformations constatées à la naissance. Elle apporte des précautions individualisées et collectives : que seulement certaines personnes soient sensibles à certains composants de leur environnement conduit à généraliser une exigence et un souci de l'erreur qui ne doivent pas être confinés à la seule pratique scientifique. Selon son propre agenda de l'erreur, « chacun de nous fixe et change ses normes », concluait Canguilhem.

À la même époque que Garrod, Mach associe encore erreur et échec, vérité et succès. L'expérimentation biologique détermine, pour Mach, des formules provisoires qui permettent une meilleure adaptation de l'espèce humaine. Mach fait passer les prérogatives d'édiction des règles collectives d'une assemblée politique à une instance de contrôle expérimental de vérité biologique des règles. Ce biopouvoir se fonde sur une expérimentation biologique souveraine : l'erreur est astreinte à résider dans le laboratoire, lieu de « vérification soignée faite dans tous les sens », qui, « seule, peut nous garantir de l'erreur » (E. Mach, *La connaissance et l'erreur* (1905), trad. fr., Paris, Flammarion, 1908, p. 132). Mach réussit à concilier un programme de biopouvoir et critère de scientificité. Cette conjonction est réalisée au prix de plusieurs réductions de l'exigence scientifique. Les procédures sont purement objectives, s'inscrivent dans la réalité de la matière vivante qui seule sépare le vrai du faux. La pratique scientifique est réduite à une vérification empirique et logique : pas d'erreur, donc, en dehors de la procédure de rectification expérimentale permanente, et par conséquent, pas de condition libre des personnes. Celles-ci sont passives et sont émancipées par l'apport exogène de nouvelles formules expérimentales éprouvées qui facilitent de manière générale leur adaptation à leur environnement.

Devant les menaces de ce progrès exogène à la cité et confisqué par les réussites de laboratoire, le bogaage aléatoire de la programmation génétique vient rappeler combien l'erreur est multiple, banale, aux effets disproportionnés, et souvent préinscrite et inaccessible. L'erreur appelle la vigilance, le débat et la responsabilité. Aussi, l'exigence scientifique se doit d'être largement répandue, active dans la réduction des

grands risques. Elle amène à constituer une démocratie soignée et prudente où rigueur et adaptation participent de la définition d'une liberté durable.

► BACHELARD G., *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 6^e éd., 1987. – CALLENS S., *Les Matrices de l'erreur*, Paris, PUF, 1997. – CANGUILHEM G., *Le Normal et le pathologique*, Paris, PUF « Quadrige », 5^e éd., 1984. – MAYO D.G., *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, Chicago, 1996. – PETROVSKI H., *Design Paradigms. Cases histories of Error and Judgement in Engineering*, Cambridge, 1994.

Stéphane CALLENS

→ Épistémologie ; Mach ; Probabilité ; Vérification.

MARÉES

« Certains disent qu'Aristote, devant cette diversité [des marées], et l'incompréhensibilité de ses raisons, après l'avoir longuement observée du haut des rochers de l'Eubée, se précipita de désespoir dans la mer, et s'y noya volontairement. » Cette anecdote, trop belle pour être vraie, c'est Galilée qui la cite, dans la Quatrième Journée de son *Dialogue sur les deux principaux systèmes du Monde*. Il consacre en effet entièrement cette seule preuve « terrestre » du mouvement de la Terre, qui est selon lui la cause principale. Cette erreur du Florentin, saluée avec enthousiasme par la plupart des commentateurs modernes, ses continuateurs vont malicieusement l'oublier... Pour présenter au roi d'Angleterre, en 1687, les *Principia* de Newton, Halley choisit lui aussi le thème des marées. Mais son *Discours au Roi sur les Marées*, s'il expose l'explication enfin donnée par Newton de l'origine gravitationnelle du phénomène, oublie le mouvement de la Terre, et construit de ce fait ce qu'on appelle maintenant la « théorie statique des marées », théorie qui aura fait la preuve de son insuffisance avant la fin du XVIII^e s. Et c'est finalement Laplace, dans son traité de 1797 *Sur le flux et le reflux de la mer*, qui fera intervenir à la fois la gravitation et le mouvement de la Terre, établissant pour l'essentiel la « théorie dynamique des marées », qui n'a plus nécessité depuis que des perfectionnements, impuissants d'ailleurs à modéliser complètement la diversité d'une masse rapidement croissante de résultats expérimentaux de plus en plus précis.

Tout ceci est relatif, bien sûr, aux « vraies marées », celles qui remuent, comme leur nom l'indique, la mer... Mais les effets des inégalités de l'attraction gravitationnelle, d'un bout à l'autre d'un corps étendu, ont de nombreuses autres manifestations, dans la croûte terrestre, dans l'atmosphère et dans l'espace : les anneaux des planètes comme Saturne, par exemple, doivent leur naissance et leur situation à ce qu'on appelle, par extension, « l'effet de marée » exercé par la planète qui les gouverne. Nous laisserons de côté, ici, ces phénomènes non marins, pour nous occuper seulement des marées proprement dites.

Galilée et la première théorie dynamique des marées

Cherchant dans les marées une preuve du mouvement de la Terre, Galilée doit, comme d'habitude, non seulement montrer que ce mouvement explique le phénomène, mais aussi que rien d'autre ne permet de le faire si on admet l'immobilité de la Terre. Il passe donc en revue les quelques tentatives antérieures, nécessairement faites dans le cadre géocentrique.

À part quelques interprétations aristotéliennes fondées sur des variations de profondeur des mers, la plupart des tentatives font intervenir la Lune : les corrélations entre le mouvement de notre satellite et le calendrier des marées sont évidemment reconnues depuis très longtemps, même en Méditerranée... Mais ces corrélations ne sont attribuées d'abord qu'à une « influence » du même ordre que celle de la Lune sur certains caractères, puis à un effet d'allègement produit sur l'eau par la « chaleur » de ses rayons. Galilée n'a évidemment aucun mal à montrer l'inanité de ces « explications ». Pour l'« eau allégée », par exemple, il signale que les navires ne s'y enfoncent pas plus que dans l'eau de densité normale (on sait qu'il a largement contribué à remettre en vigueur le principe d'Archimède...). La réfutation de ces tentatives lui permet de ne pas se préoccuper des corrélations – indubitables – qui leur ont donné naissance...

Pour lui, les marées sont produites par des variations de l'accélération du mouvement de la Terre, et il évoque à ce sujet les oscillations qui prennent naissance dans un récipient que l'on déplace (le meilleur exemple moderne est celui du bac à glaçons que l'on tente de transporter sans les cloisons qui le subdivisent...). Quant à ces variations, diurnes en particulier, il y voit le résultat de la superposition des mouvements de rotation et de révolution de notre planète.

Il est frappant de trouver, dans cette théorie fautive, une bonne partie de ce qui va manquer à la théorie « correcte » de la fin du siècle : évaluation des vitesses fantastiques auxquelles devrait se propager l'effet de la marée si on ne tenait pas compte du mouvement de la Terre, variation de l'intensité du phénomène entre les deux extrémités de la Méditerranée, très faible amplitude dans une mer étroite orientée plus ou moins du nord au sud comme la mer Rouge, déplacement horizontal des eaux d'autant plus fort en un point qu'elles s'y déplacent moins dans le sens vertical, etc. Le simple exemple de l'oscillation dans un récipient est révélateur : il y manque seulement ce qui donne naissance à l'oscillation de la mer !

Le modèle suivant va énoncer cette origine, et oublier l'oscillation...

La théorie statique de Newton

L'explication newtonienne des marées fait intervenir tous les « points forts » de la physique de son auteur : attraction gravitationnelle, dépendance en $1/r^2$ de cette attraction, r étant, dans le cas d'une sphère agissant sur une particule, la distance de celle-ci au

centre de la sphère, calcul différentiel... Elle explique, pour la première fois, pourquoi l'effet de la Lune se fait sentir des deux côtés du globe - pourquoi il y a deux marées par jour - mais... en négligeant, pour les besoins de la présentation, l'inertie et les frottements, qui jouent pourtant forcément un rôle primordial aux vitesses mises en jeu par la rotation de la Terre.

La théorie statique imagine ainsi une Terre qui serait entièrement couverte d'eau, et cherche la forme que prendrait à l'équilibre la surface de cette eau sous l'effet de l'attraction d'un astre éloigné. Cette forme est celle d'un sphéroïde allongé (un ballon de rugby) dont l'axe de révolution passe toujours par l'astre agissant. La démonstration la plus directe part du fait que cette surface doit nécessairement être équipotentielle.

Ainsi, non seulement l'eau qui est du côté de la Lune forme une bosse, mais aussi l'eau qui est du côté opposé. En effet, la cause du phénomène est la différence d'attraction exercée par la Lune sur le centre de la Terre, d'une part, et sur un point quelconque de l'eau, d'autre part : si ce point est plus proche de la Lune que le centre, il est davantage attiré que celui-ci, s'il est plus éloigné il est moins attiré que le centre. Dans les deux cas, cela se traduit par un soulèvement de la surface.

Ce rôle de la différence d'attraction ne permet pas seulement d'expliquer pourquoi il y a deux marées par jour, mais aussi pourquoi l'effet du Soleil est plus faible que celui de la Lune, bien que le premier exerce évidemment sur la Terre une attraction plus forte... C'est que si l'attraction est en $1/r^2$, sa différentielle est en $1/r^3$ - et le Soleil est quatre cents fois plus éloigné que la Lune ! Toutefois, grâce à l'énormité de sa masse, son influence sur la marée est quand même presque la moitié de celle de la Lune. Aussi, l'intensité de la marée dépend des directions relatives de ces deux astres. Quand ces directions sont les mêmes (pleine lune ou nouvelle lune), la marée a une intensité plus forte que lorsqu'elles sont perpendiculaires (premier et dernier quartier). Dans le premier cas (astres en syzygie), on parle de « marées de vive eau », dans le deuxième (astres en quadrature), on parle de « marées de morte eau ».

Mais dans tous les cas, c'est l'influence de la Lune qui l'emporte, et donc la période des marées est déterminée par le mouvement de la Lune. Comme celle-ci tourne autour de la Terre, pendant que la Terre fait un tour sur elle-même, il faut plus de vingt-quatre heures - cinquante minutes de plus - pour que la Lune se retrouve à la verticale du même méridien. Si la marée est haute à midi un certain jour, elle le sera un peu avant une heure le lendemain.

On comprend que cette explication ait été saluée comme un grand succès de Newton, et que Halley l'ait choisie pour thème de son Discours au roi en 1687. Mais elle n'a pas tardé à montrer ses limites, de façon d'autant plus évidente que les voyages lointains permettaient de recueillir des informations de plus en plus précises sur des latitudes très différentes.

Par exemple, suivant la théorie statique, la position

du sphéroïde d'équilibre, et par conséquent tout le système des marées en un point, doit dépendre fortement de la déclinaison de la Lune (l'angle entre la direction Terre-Lune et le plan équatorial). Dans la pratique il n'en est rien. De même, la théorie statique prévoit dans les régions polaires des marées insignifiantes - en contradiction avec ce qu'on y constate.

Enfin, la théorie statique est incapable d'expliquer pourquoi, en France, les marées les plus fortes se produisent à peu près aux équinoxes. Elle prévoit même, en contradiction complète avec l'expérience, des marées maximales, pour nos latitudes, quand le grand axe du sphéroïde se rapproche de nous, donc aux déclinaisons les plus fortes de la Lune, c'est-à-dire aux solstices !

Manifestement, la théorie statique a besoin d'être sérieusement modifiée. On en prend de plus en plus conscience au cours du XVIII^e s., à travers les tentatives de Bernoulli, Euler, MacLaurin, d'Alembert. C'est finalement Laplace qui va poser le problème de façon résolument nouvelle.

La théorie dynamique des marées

La théorie statique donnait une description tout à fait valable de la force génératrice des marées. Le problème qu'elle laissait ouvert était celui de la réponse des masses d'eau à cette force. Au lieu d'ignorer l'inertie et le frottement, et de considérer cette réponse comme instantanée, comme le fait la théorie statique, Laplace étudie le phénomène comme la réponse à des excitations périodiques de systèmes oscillants, formés par des masses d'eau enfermées dans des bassins de dimensions finies. Cette réponse sera particulièrement sensible quand la période excitatrice correspondra à l'une des périodes propres du système, mais suivant les conditions locales, l'amplitude et la phase de la réponse pourront être très différentes, et donner des phénomènes n'ayant pas du tout le même aspect.

En première approximation, Laplace décrit la force génératrice des marées comme la superposition de trois termes, un terme « constant » et deux termes « sinusoidaux » - les guillemets soulignant qu'en fait la valeur ou l'amplitude varient lentement au cours du temps. Ces termes oscillants ont des périodes voisines d'un jour (terme diurne) ou d'un demi-jour (terme semi-diurne). Les termes semi-diurnes sont d'autant plus importants que la déclinaison de l'astre concerné - Lune ou Soleil - est plus faible : ils seront donc maximum aux équinoxes. Au contraire, le terme diurne traduit la différence entre marées hautes successives, et il est d'autant plus fort que cette déclinaison est plus grande : son maximum se produit aux solstices.

Il se trouve que, dans la plupart des cas, la réponse des masses d'eau est plus importante pour les termes semi-diurnes. En France, par exemple, le rapport est de quarante ! Aussi les marées y seront-elles maximum quand les termes semi-diurnes le sont : aux équinoxes. Dans d'autres mers c'est l'inverse, il n'y a pratiquement

qu'une marée par jour, et elle est maximum aux solstices !

La démarche de Laplace permet donc de rendre compte des phénomènes, contrairement à la théorie statique, mais cela nécessite en chaque lieu la détermination empirique des caractéristiques des différents termes qu'utilise son calcul. Or, ces données expérimentales révèlent une variété de situations inattendue. On constate par exemple qu'il existe des points dits « amphidromiques », où la marée est nulle, et autour desquels tourment des lignes, dites « cotidales », où les phénomènes de marée évoluent simultanément : la marée est haute, par exemple, au même moment en tous les points d'une telle ligne. Il existe deux de ces points amphidromiques dans la mer du Nord, l'un à la latitude d'Amsterdam, l'autre plus au nord, en face de l'Écosse.

On conçoit que la modélisation d'un phénomène aussi rapidement variable d'un point à un autre ne soit pas facile. À partir de la « révolution » effectuée par Laplace, les travaux se poursuivent dans trois directions principales.

De Laplace à Poincaré

Tout d'abord, Laplace lui-même se tourne vers un modèle simplificateur, celui d'un océan couvrant le globe tout entier, avec des profondeurs définies par des lois simples. C'est ce que font encore, dans la deuxième moitié du XIX^e s., Kelvin et Hough, le directeur de l'observatoire du Cap, qui montre qu'à certaines profondeurs un phénomène de résonance peut s'installer...

Par ailleurs, plutôt que de garder la simplicité relative des trois termes de Laplace, on prend assez rapidement l'habitude, au XIX^e s., d'analyser de façon harmonique - avec un grand nombre de termes de fréquences multiples d'une valeur fondamentale - le phénomène local plutôt que la cause qui lui donne naissance... Cela permet en particulier de tenir compte des « ondes de petits fonds », déformations hydrodynamiques, aux faibles profondeurs, des oscillations principales. Le but essentiel, sur le plan pratique, est en effet seulement de produire des tables permettant aux navigateurs de prévoir l'état exact de la marée en tel lieu à tel moment. Cela peut se faire empiriquement, sans que l'on cherche à démêler davantage les causes du phénomène. C'est ce que fait par exemple Airy, qui met au point, vers le milieu du siècle, sa *canal theory*, décrivant les marées d'une mer étroite comme un canal : il l'applique à plusieurs cas particuliers intéressants, dont celui des marées de la mer d'Irlande.

Enfin, l'Américain Rollin A. Harris, tout à la fin du XIX^e s., cherche à tirer, d'une étude des oscillations des masses océaniques, des explications sur les phénomènes observés près des côtes... À cet effet il délimate, à partir de considérations théoriques et aussi en utilisant des modèles réduits, des « bassins océaniques » ayant une période propre voisine de l'une des périodes agissantes (solaire ou lunaire, diurne ou

semi-diurne), puis il superpose les oscillations dans les parties communes à ces « bassins ». Il retrouve en particulier de nombreux points amphidromiques par superposition de systèmes d'ondes stationnaires.

Telle est la situation au moment où Henri Poincaré s'intéresse à la question des marées. Il y apporte une contribution à la fois décisive et décevante, puisqu'il parvient à mettre au point une méthode mathématique qui permet de résoudre complètement les équations intégrales déjà envisagées par Laplace, mais qui donne dans la quasi-totalité des cas pratiques des calculs inextricables...

Toutefois, il parvient à appliquer ce travail à des problèmes limités, comme la vérification locale des résultats obtenus par Harris avec ses « bassins », dans le but d'affiner son découpage, ou l'étude du « mascaret » produit par la marée dans certains estuaires. Mais ces travaux ne sont poursuivis, après la mort prématurée de Poincaré, que par quelques fidèles comme Eugène Fichot ou Marcel Brillouin. Ils ont finalement davantage contribué à ouvrir des voies nouvelles aux méthodes mathématiques de la physique, qu'à donner des marées la description complète qui constituait, au moins au départ, leur principal objectif.

► BOUASSE H., *Houle, rides, seiches et marées*, Paris, Delagrave, 1924. - BOUTELOUP J., *Vagues, marées, courants marins*, Paris, PUF, 1950. - GOUGHENHEIM A., « La contribution de H. Poincaré à la théorie des marées », *Bull. Astro.*, XXI, n° 1, 1957. - LEDERER D., « Les marées, la Terre, la Lune et le Soleil », *Actuel*, 94, Paris, Quillet, 1994.

Jean-Pierre MAURY

→ Géocentrisme ; Gravitation ; Terre.

MARX ET DARWIN

À l'automne 1880, Marx se serait adressé à Darwin pour lui faire connaître son intention de lui dédier la traduction anglaise du *Capital* alors en voie d'achèvement, et lui demander son accord. Darwin, dans l'impeccable style d'extrême courtoisie qui est celui de sa correspondance, aurait fermement décliné cette offre. On cite toujours la lettre datée et signée du 13 octobre 1880 où Darwin écrit : « Je préférerais que le tome ou le volume ne me soit pas dédié (bien que je vous remercie pour votre intention qui me fait honneur), car cela impliquerait d'une certaine façon mon approbation de l'ouvrage dans son ensemble alors que je ne le connais pas. »

Depuis que Margaret A. Fay et Lewis S. Feuer ont su concurremment mettre un zèle et une perspicacité de détectives au service d'une enquête historiographique rigoureuse et passionnante, dont les résultats ont été confirmés peu après sur l'essentiel, par les travaux de Thomas Caroll et de Ralph Colp Junior, aucun doute ne peut plus subsister sur le caractère purement fictif de cette anecdote. Non, Marx n'a jamais proposé à Darwin de lui dédier la traduction anglaise du *Capital*.

Il existe bien une lettre écrite de la main de Charles Darwin et retrouvée dans les papiers de Marx, et la fameuse phrase de refus y figure effectivement. Mais à relire le texte dans son intégralité, plusieurs phrases sont d'une incongruité manifeste, si on les tient pour une réponse à Marx. Les premières lignes d'abord, où Darwin écrit : « La publication, sous quelque forme que ce soit, de vos observations sur mes écrits ne requiert pas vraiment un accord de ma part, et il serait ridicule de ma part de donner un accord dont il n'est nul besoin. » Imagine-t-on Marx demandant à Darwin son accord pour la publication du *Capital*? De surcroît, même si Darwin, comme il l'écrit, n'avait pas « lu l'ouvrage dans son entier », il mentionne en avoir reçu avec la lettre un jeu d'épreuves. Si basse qu'ait été sa vue, comme il le dit aussi en guise d'excuses, comment aurait-il pu y lire des « observations » sur ses propres écrits? Outre que Darwin laisse entendre que l'ouvrage entier se résumerait à de telles observations, ce qui ne convient évidemment pas au *Capital*.

À bien les relire sous l'angle de ces soupçons, les dernières lignes de la lettre ne sonnent pas moins étrange. Darwin, qui y revendique, comme pour prévenir toute mésinterprétation de son refus, la qualité de « vigoureux avocat de la libre pensée dans tous les domaines », s'inquiète de trouver dans le livre qu'on lui a envoyé des « arguments directs contre le christianisme et le théisme ». De tels arguments, conclut-il, « n'exercent pratiquement pas d'effet sur le public et [...] la liberté de l'esprit est mieux promue par une illumination de l'esprit en suivant les progrès de la science ».

Derechef, comment découvrir dans *Le Capital* des « arguments directs » contre le christianisme et le théisme? Comment interpréter l'ouvrage dans son entier comme un manifeste de la libre pensée?

Si l'on remarque enfin, ce qu'on n'avait jamais songé à faire avant les recherches dont je me contente pour l'instant de dresser le bilan, que la lettre de Darwin ne porte pas mention du nom de son destinataire, puisqu'elle s'ouvre conventionnellement sur un « Dear Sir » de politesse anonyme, la question se pose avec quelque sérieux et même quelque acuité de savoir si, oui ou non, cette lettre a jamais été écrite en réponse à un envoi de Marx, dont on n'a par ailleurs, il faut l'ajouter, jamais retrouvé trace dans les papiers de Darwin.

Le seul argument de fait, évidemment impossible à éluder, qui semblait devoir imposer de maintenir contre tous les doutes et toutes les incohérences la version classique de l'histoire, était le lieu où avait été conservée la fameuse lettre : au beau milieu de la correspondance de Marx! Or cet argument s'est lui-même soudain retourné pour accréditer, mieux que tout autre, la thèse du quiproquo, avant qu'une évidence matérielle ne vienne la corroborer.

Qui, en effet, fut le dépositaire des écrits de Marx? Edward Aveling, son gendre. Or, Aveling, est-il besoin de le rappeler, était l'un des membres les plus actifs de la société des libres penseurs, l'auteur du *Credo d'un*

athée, l'auteur aussi, et surtout, d'un livre paru en 1881 intitulé *The student's Darwin* qui se présente comme un recueil d'articles parus en 1880 dans le *National Reformer*. L'idée vient aussitôt que c'ait été de ce livre qu'il était question dans la lettre de Darwin, que donc Aveling, et non Marx, en ait été le destinataire. Le ton et les attendus de Darwin deviennent alors parfaitement ajustés et cohérents.

Guidés par cette hypothèse, Caroll et Colp Junior ont découvert une lettre d'Aveling datée du 12 octobre 1880 et adressée à l'auteur de *L'origine des espèces*. Aveling y annonce à Darwin son intention de publier en un tome ou un volume la série de ses articles et lui demande, non, semble-t-il, sans arrière-pensées politiques, une préface. Darwin s'empresse de répondre, le lendemain : « Dear Sir... » Laissons aux émules du plus illustre des psychanalystes français le soin de tirer les leçons métaphysiques du destin de cette lettre qui, détournée à titre posthume, finit, au prix d'une belle obstination conceptuelle, par rejoindre un destinataire qu'elle n'avait pas manqué.

Ce qui importe ici, c'est que cette anecdote, considérant l'offre de Marx et le refus de Darwin, toute fictive donc qu'elle fût, s'est imposée comme la vérité même pendant cent ans, contre l'évidence respectivement flagrante des incohérences littérales sur lesquelles elle reposait. On doit même dire que depuis 1975, depuis que la vérité a été rétablie, elle tient bon : il ne manque pas de bons auteurs pour continuer à la répéter, comme si de rien n'était. Cela s'explique.

Passons sur le fait que, jouant sur le sens de cette offre et de ce refus, peuvent en tirer argument aussi bien les darwinistes antimarxistes que les antidarwinistes antimarxistes et les marxistes antidarwinistes, ce qui fait déjà une foule sur la scène intellectuelle. L'essentiel de sa force de conviction, elle le tire de ce qu'elle s'inscrit dans une histoire, bâtie par la tradition marxiste, qui en soutient le sens et dont elle est comme providentiellement apte à condenser les leçons escomptées. Voici l'histoire telle qu'elle se donne, dans l'apparente objectivité d'une succession de faits bien établis.

Le 24 novembre 1859, paraît à Londres *L'origine des espèces*. Un mois ne s'est pas écoulé qu'Engels, qui s'est remis à l'étude des sciences et médite déjà un grand livre de philosophie de la nature, écrit à Marx qui vient de décider de publier la *Contribution à la critique de l'économie politique*, parue le 1^{er} juin de la même année. Il lui fait part de son enthousiasme : « Ce Darwin, que je suis en train de lire, est tout à fait sensationnel. Il y avait encore un côté par lequel la téléologie n'avait pas été démolie : c'est maintenant chose faite. En outre, on n'avait jamais fait une tentative d'une telle envergure pour démontrer qu'il y a un développement historique dans la nature, du moins jamais avec un pareil bonheur. »

Il s'écoule près d'un an avant que Marx ne fasse écho à cette lettre. Mais c'est en termes consonants. Il surenchérit même sur l'enthousiasme de son ami : « Malgré le manque de finesse bien anglais dans le

développement, c'est dans ce livre que se trouve le fondement historico-naturel de notre conception. » Opinion répercutée à Lassalle deux mois plus tard : « Le livre de Darwin est très important et me convient comme base de la lutte historique des classes. Malgré toutes ses insuffisances, c'est dans cet ouvrage que, pour la première fois, un coup mortel est porté à la "téléologie" dans les sciences de la nature. » Ni Marx ni Engels ne reviendront jamais sur leur premier mouvement. À partir de 1862, toutefois, l'enthousiasme se nuance d'une réserve ; Marx écrit à Engels : « Ce qui m'amuse chez Darwin, que j'ai revu, c'est qu'il déclare appliquer aussi la théorie de Malthus aux plantes et aux animaux, comme si l'astuce chez Monsieur Malthus ne consistait pas précisément en ceci que la théorie n'y est pas appliquée aux plantes et aux animaux. » Et Marx d'ajouter : « Il est remarquable de voir comment Darwin reconnaît chez les animaux et les plantes sa propre société anglaise, avec sa division du travail, sa concurrence, ses ouvertures de nouveaux marchés, ses "inventions" et sa malthusienne "lutte pour la vie". C'est le *bellum omnium contra omnes* de Hobbes, et cela rappelle Hegel dans la *Phénoménologie* où la société civile intervient en tant que "règne animal de l'esprit" alors que chez Darwin c'est le règne animal qui intervient en tant que société civile. »

Désormais, la plupart des références à l'œuvre darwinienne dans les textes de Marx et de Engels font, avec des variations, la double mention d'un accord fondamental et du reproche d'avoir transposé Malthus chez les plantes et les animaux au prix d'une inconséquence grave, s'il est vrai qu'une telle transposition réduit à néant la loi de population de Malthus, laquelle repose précisément sur une dissymétrie, mathématiquement établie, entre le monde humain et le monde végétal et animal du point de vue de la reproduction.

C'est le cas d'une lettre d'Engels à Friedrich Albert Lange du 29 mars 1865 ; c'est le cas, en style lapidaire, d'une lettre de Marx à Kugelmann datée du 20 juin 1870, où est dénoncée la paresse intellectuelle du même Lange, son arrogance et sa suffisance, pour avoir cru trouver dans le *struggle for life* l'unique loi universelle de la nature et de l'histoire. Marx s'insurge contre l'auteur de *La question ouvrière* : la grande œuvre de Darwin ne saurait être réduite à cette formule sans s'en trouver défigurée, puisque cette formule n'est que la reformulation pseudo-scientifique de « l'élucubration démographique de Malthus ».

Autre exemple : la célèbre lettre d'Engels à Piotr Lavrov du 12-17 novembre 1875. Lavrov avait soumis au jugement d'Engels un article qu'il venait de publier contre la pléiade de « darwinistes bourgeois » dont les textes avaient atteint la Russie. Engels réaffirme son adhésion à la théorie de l'évolution et ajoute que la formule du *struggle for life* doit être prise *cum grano salis*, même en ce qui concerne le monde organique. Il se déclare en conséquence d'accord avec le principe d'une réplique. Mais il n'est pas tendre pour la méthode de Lavrov : votre réfutation, écrit-il, est de type « psychologique », elle fait sentimentalement

appel au « sentiment de solidarité » contre la prétention du *struggle for life* à être la loi de l'histoire humaine. Peut-être cette argumentation convient-elle au public russe, concède Engels qui visiblement n'en croit pas un mot et propose donc une tout autre argumentation.

En apologiste réactionnaire de la vision bourgeoise du monde, Malthus a donné pour une loi naturelle – éternelle – sa supposée scientifique « loi de population ». Darwin a commis l'erreur de vouloir transposer cette loi dans le monde organique : et voici que, maintenant, naïfs et ébahis, les idéologues du *struggle for life* se mettent en devoir d'opérer la transposition en sens inverse ! Il est temps, conclut-il, de leur faire comprendre qu'ils sont pris au piège d'une logique circulaire, illusoire et enfantine. Il est temps de les inviter à « installer les réalités matérielles dans leur droit historique ».

Même type d'attaque, mais avec une autre cible, dans l'*Anti-Dühring*, rédigé par Engels pour préserver l'unité du Parti social-démocrate fragilement établie, au prix des concessions que l'on sait, au congrès de Gotha. Contre l'antidarwinisme sommaire de Dühring, socialiste de fraîche date dont les thèses se répandaient depuis quelques mois « comme une épidémie » dans le Parti, Engels rappelle vigoureusement que, nonobstant la « bêtise » de Darwin au sujet de Malthus, sur laquelle Dühring avait cru bon de fonder toute sa critique, le contenu de *L'origine des espèces* marque une date décisive dans l'histoire des sciences de la nature, et s'accorde sur le fond avec ce qu'il désigne comme « la conception socialiste du monde ».

À l'histoire de cette correspondance, on ajoute l'envoi, bien réel, par Marx à Darwin, en hommage, du livre I du *Capital*, et la réponse, brève, polie mais distante de Darwin le 1^{er} octobre 1873 ; puis surtout, la célèbre et solennelle phrase d'Engels sur la tombe de Marx en 1883 : « De même que Darwin a découvert la loi d'évolution de la nature organique, de même Marx a découvert la loi d'évolution de l'histoire humaine. »

Tous ces faits méticuleusement collectés, toutes ces phrases scrupuleusement recopiées ont été mis à contribution pour donner corps à une histoire édifiante, dont l'anecdote fictive de l'envoi de 1880 réalise fantasmagiquement toutes les virtualités de sens. Une histoire à deux versants : un accord scientifique fondamental, et un désaccord idéologique secondaire, mais assez sérieux pour avoir de redoutables conséquences méthodologiques et politiques.

► AVELING E., *The student's Darwin*, Londres, 1881 : « Charles Darwin and Karl Marx », *New century review*, mars-avril 1897. – CAROLL T., « Further evidence that Karl Marx was not the recipient of Charles Darwin's », *Annals of science*, 33, 1976. – CHRISTEN Y., *Marx et Darwin*, Paris, Albin Michel, 1981. – COHEN G.A., *Karl Marx's theory of history, a defence*, Oxford Univ. Press, 1978. – COLP JR. R., « The contacts between Marx and Darwin », *Journal of History of Ideas*, 35, 2, avril-juin 1974. – DARWIN C., *L'origine des espèces*, trad. fr. Barbier, Paris, Reinwald, 1876. – FAY M.A., « Did Marx offer to dedicate *Capital* to Darwin », *Journal of History of Ideas*, 39,

1, janv.-mars 1978. — FEUER L.S., « Is the "Darwin-Marx correspondence" authentic? », *Annals of science*, 32, 1975. — GERRATAMA V., « Marx and Darwin », *New left review*, 82, nov.-déc. 1973. — HAECKEL E., *Les preuves du transformisme*, trad. fr. Soury, Paris, Reinwald, 1879. — HEGEL G.W.F., *Science de la logique*, trad. fr. Labarrière & Jarzyk, Paris, Aubier-Montaigne, 1972. — KANT E., *Critique de la faculté de juger*, trad. fr. Philonenko, Paris, Vrin, 1968. — LÉCOURT D., *Lysenko, histoire réelle d'une « science prolétarienne »*, rééd., Paris, PUF « Quadrige », 1995. — MARX J. & ENGELS F., *Lettres sur les sciences de la nature*, Paris, Éd. sociales, 1973. — NACCACHE B., *Marx critique de Darwin*, Paris, Vrin, 1980.

Dominique LÉCOURT

→ Darwinisme ; Empirionisme ; Lysenkisme ; Sélection ; Théorie.

MASSE

PHYSIQUE

Le concept physique de masse, créé par Newton, peut être considéré comme le piédestal de la mécanique classique, en permettant l'expression complète du principe d'inertie et de la loi fondamentale de la dynamique, une fois admis que la masse est une grandeur invariable attachée à un corps, distincte du poids qui est dû à la gravité conçue comme une sollicitation sur les corps qui leur est extérieure. Il était dès lors possible de fonder également, et d'exprimer quantitativement, la loi de la gravitation universelle, dont la force est en raison directe des masses en présence et varie en fonction de leur distance mutuelle.

Le concept de masse manifesta sa fécondité dans la physique tout entière ainsi qu'en chimie. Il devait cependant encourir, en même temps que la mécanique, de sévères critiques portant sur la fausse évidence de sa définition, en réalité imprécise (comme « quantité de matière des corps »), et faisant implicitement appel à d'autres grandeurs et à des principes de la physique qui eux-mêmes la supposent. Cette circularité des notions de la mécanique en montre les limites. Plus radicalement encore, la théorie de la relativité restreinte devait conduire à repenser la masse en relation à l'énergie, ce qui entraîna des conséquences considérables, notamment sur la possibilité de pénétrer la matière, « réservoir d'énergie », dans ses éléments constitutifs. Le concept de masse ainsi « relativisé » n'a pas cessé pour autant d'être une des notions-clés de notre connaissance du monde physique, non seulement de la matière, mais de l'Univers, aux diverses étapes de son évolution, qui le peuplent d'« objets » allant des particules aux galaxies.

La masse conquise contre le poids et l'extériorité de la gravité : Newton

Le terme « quantité de matière », que Newton devait reprendre pour définir la masse, était utilisé dès le XIV^e s. avec l'idée de sa conservation dans tous les changements, et Richard Swineshead envisageait la

possibilité de sa mesure mathématique par le produit de la densité et du volume. Jean Buridan en faisait une notion de la dynamique. Cependant le poids (*pondus*) était conçu par la pensée scolastique comme une propriété des seuls corps lourds. Galilée lui-même, tout en établissant l'égalité de l'accélération de tous les corps qui tombent d'une même hauteur, ne pensait pas encore la gravité comme extérieure aux corps. Il concevait cependant (en se fondant sur l'équilibre de la balance) l'idée d'une résistance interne au changement de mouvement (le poids du corps sur l'un des plateaux s'oppose à la sollicitation vers le haut qu'il subit de la part de l'autre). Il formula ainsi le principe d'inertie pour le mouvement dans le plan horizontal (dégagé de la pesanteur), tout en maintenant l'idée de la gravité — et donc le poids — comme propriété inhérente aux corps.

C'est à Newton qu'il revint d'établir une distinction nette entre la masse et le poids, en concevant la gravité comme une sollicitation extérieure. Dans ses *Principia Mathematica (Principes mathématiques de la philosophie naturelle, 1687)*, il définit la masse comme la « quantité de matière », donnée par « la réunion de la densité et du volume » (entendons : le produit des deux), qui lui permet de définir la « quantité de mouvement » de manière plus précise que Descartes — qui l'avait introduite —, comme le produit de la vitesse par la quantité de matière ou masse ($p = mv$).

Newton précise également que la force d'inertie, inhérente au corps (qu'il appelle aussi *vis insita*), c'est-à-dire le pouvoir de résister au changement d'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite (mouvement inertiel), est proportionnelle à la masse du corps. À la formulation de Descartes du principe d'inertie — fondée sur la considération de la conservation du mouvement, ce dernier étant conçu dans une perspective géométrique, sans appel à l'inertie comme résistance —, Newton ajoutait ainsi la considération quantitative, en donnant une définition de la masse d'inertie ainsi qu'une formulation précise de la quantité de mouvement, qui lui donnaient le soubassement aussi bien du principe d'inertie que de la loi de changement du mouvement.

Le changement de la quantité de mouvement d'un corps provoqué par une force agissant sur lui est proportionnel à cette force en grandeur et direction, soit $\Delta(mv) \propto F$, ce que l'on a exprimé par la suite comme $F = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}$. La masse apparaît alors comme

le coefficient de proportionnalité de la force à l'accélération, et donc comme ce qui exprime le passage de la cinématique (propriétés du mouvement) à la dynamique (propriétés des forces). Elle indique, sous ce rapport, l'équivalence de toutes les forces quelle que soit leur nature (d'impulsion, de gravitation, électriques, magnétiques, etc., comme Newton le soulignait lui-même).

Newton établit dans le livre 3 des *Principia*, par des expériences sur des pendules, la proportionnalité du

poids (p) et de la masse (m) à une hauteur donnée : pour deux corps M et M' , $\frac{p}{m} = \frac{p'}{m'}$, $p = mg$, g étant l'accélération due à la gravité, indépendante de la forme, de la nature et du poids du corps. La masse permet ainsi d'exprimer que la gravité est extérieure au corps : elle reste invariable, mais le poids varie en fonction de la distance au centre d'attraction.

Newton proposa alors d'ériger en principe la gravitation universelle de tous les corps, constatée sur Terre ainsi qu'entre les corps célestes (planètes et leurs satellites, Soleil, comètes), la force de gravitation étant proportionnelle à la masse (« Tous les corps ont en propre un pouvoir de gravité, proportionnel aux quantités de matière que chacun d'eux contient »).

Cette considération était essentielle pour établir ensuite la loi de cette force, celle de l'inverse carré des distances, à partir des lois de Kepler du mouvement des planètes et de la loi de Galilée de la chute des corps sur Terre (selon laquelle les espaces parcourus sont en raison des carrés des temps). La force d'attraction de gravitation universelle de Newton, entre deux corps de masses m et m' séparés par une distance d est :

$$F = G \frac{mm'}{d^2} \quad (G : \text{constante de gravitation universelle}).$$

Cavendish devait vérifier expérimentalement, au XIX^e s., sur des petites masses, à l'aide d'une balance de torsion, la loi de proportionnalité de la force au produit des masses dans l'attraction universelle newtonienne.

De la « quantité de matière » aux masses des atomes

Les successeurs de Newton ont généralement adopté ses définitions et notamment celle de la masse. Elle permettait de traiter toute la mécanique des corps en la fondant sur la notion (purement abstraite) de point matériel, c'est-à-dire de point géométrique sans dimension doué de masse. La masse m est une grandeur (que nous disons aujourd'hui scalaire) positive, constante, additive dans les systèmes matériels, invariante dans tout changement de référentiel. Comme coefficient de l'accélération dans la loi de la dynamique, m est la masse d'inertie ; en fait, m désigne aussi la masse pesante, paramètre de la loi d'attraction gravitationnelle. En établissant son système des poids et mesures, la Convention définit, en 1793, l'unité de masse, le kilogramme, comme la masse d'un litre d'eau (d'autres définitions, plus précises, ont été adoptées par la suite).

Concept issu de la mécanique, la masse s'imposa universellement en physique et en chimie. Lavoisier découvrit expérimentalement, vers 1785, la loi de conservation de la masse : « La masse totale d'un système fermé reste constante quelles que soient les transformations physicochimiques dont il peut être le siège. » Cette loi révéla l'intérêt de l'utilisation de la balance et favorisa le développement de la chimie au long du XIX^e s., qui eut notamment comme effet la mise en évidence de l'existence des atomes. Que l'on songe, par exemple, aux lois des proportions définies et

multiples, de Proust et de Dalton, exprimant les rapports des masses des éléments d'un composé chimique ; ou à la classification périodique des éléments de Mendeleïev (1869), reliant les propriétés chimiques des corps à leurs poids atomiques rangés selon l'ordre croissant. Ou encore, à la mesure par J. J. Thomson, en 1897, du rapport $\frac{m}{e}$ de la masse à la charge électrique

des rayons cathodiques, identifiés comme étant les électrons. On peut, dans ce sens, attribuer une certaine fécondité à la définition newtonienne de la masse comme mesure de la quantité de matière des corps, malgré son caractère imprécis.

Critiques de la masse newtonienne

Dans sa remise en cause des notions « métaphysiques » de la mécanique, Ernst Mach n'épargna pas la définition newtonienne de la masse (*La Mécanique, 1883*). « Quantité de matière » lui paraissait une expression obscure pour définir une grandeur comme la masse, même si l'on comptait les atomes, dont l'hypothèse sous-tend la définition newtonienne — hypothèse à laquelle Mach était d'ailleurs opposé. Pour Mach, la masse mesure la résistance au changement de mouvement, qui croît avec elle. Son origine est expérimentale : c'est l'expérience qui « nous fait découvrir dans les corps l'existence d'une caractéristique particulière déterminante d'accélération », constatée par exemple dans le principe de l'égalité de l'action et de la réaction. Se fondant sur l'idée de la « dépendance mutuelle des phénomènes » et sur l'exigence d'éliminer « toute obscurité métaphysique » (ce qui était aussi bien sa manière de définir toutes les grandeurs physiques), Mach proposa donc de comprendre Newton en définissant la masse par l'accélération. Choissant un corps comme unité, on dira qu'un autre corps « est de masse m lorsque ce corps, agissant sur le [premier], lui communique une accélération égale à m fois l'accélération qu'il reçoit par la réaction du [premier] sur lui ». Dans la définition de Mach, le concept de masse et le principe d'action et de réaction correspondent à une même constatation expérimentale. La masse est alors mesurable par le poids (pour une même valeur de g), sans faire appel à la quantité de matière.

Poincaré proposa également une critique de la définition classique de la masse, assez proche de celle de Mach, en faisant observer que la force, l'accélération et la masse, qui figurent dans la loi de la dynamique et la masse, qui figurent dans la loi de la dynamique newtonienne, sont impliquées dans leurs définitions respectives, qui ne sont pas indépendantes. Il faut, en réalité, faire intervenir, dans une définition satisfaisante de ces grandeurs liées, le principe d'action et de réaction, si l'on veut par exemple définir l'égalité de deux forces. Ce principe lui-même est, comme tous les principes physiques, et bien que d'origine expérimentale, formulé de manière systématique comme une convention utile. En définitive, les définitions de concepts comme la masse sont des conventions qui

nous permettent de connaître les phénomènes de manière approchée.

En voulant rapporter les grandeurs physiques à des grandeurs seulement observables Ernst Mach effectua une critique vigoureuse des concepts newtoniens d'espace, de temps et de mouvement absolus. Il s'interrogea donc aussi sur la nature de la masse d'inertie, coefficient de l'accélération, dont le support, en mécanique newtonienne, est l'espace absolu. Mach proposa que les propriétés d'inertie des corps résultent de leurs interactions avec tous les autres corps, proches ou lointains, en particulier les très grandes masses réparties dans l'Univers. Einstein devait dénommer cette proposition « principe de la relativité de l'inertie », puis « principe de Mach » : elle lui fut utile dans son cheminement vers la théorie de la relativité générale (pour penser la covariance générale) puis dans son application à la cosmologie. Il l'abandonna cependant car, prise au sens strict, elle suppose l'action instantanée à distance qui s'oppose au concept de champ.

De la masse électromagnétique à la masse relativiste : Einstein et la matière-énergie

Des expériences effectuées sur les électrons des rayons cathodiques mirent en évidence, dans les dernières années du XIX^e s., une variation de leur masse avec la vitesse. Cette « masse électromagnétique », engendrée par effet de *self-induction* électromagnétique, fut pensée tout d'abord en opposition à la masse « vraie », « matérielle », ou « mécanique », supposée invariante, à laquelle elle s'ajouterait. Il apparut, avec les électrons de vitesse très élevée émis par la radioactivité β , que leur masse totale variait avec la vitesse, sans laisser de résidu constant, qui serait la masse mécanique (newtonienne). L'idée naquit alors chez de nombreux physiciens que la mécanique ne constituait plus le fondement de la physique, et qu'elle devrait désormais au contraire être fondée sur la théorie électromagnétique. La théorie de la relativité, en refondant l'ensemble des théories physiques – mécanique et électromagnétisme – sur la base d'une nouvelle cinématique, retrouverait directement ces résultats sans calcul par des modèles de l'électron, rendant vain le programme de la « vision électromagnétique du monde ».

Avec la théorie de la relativité restreinte d'Einstein (1905), la réforme de la cinématique effectuée par une nouvelle définition de l'espace et du temps, soumis au principe de relativité et au caractère fini des vitesses de propagation, marque ses effets sur les grandeurs dynamiques en relation. La loi fondamentale de la dynamique demeure sous la forme $\mathbb{F} = \frac{d}{dt}(\mathbb{p}) = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v})$, où $\mathbb{p} = m\mathbf{v}$ est la quantité de mouvement, mais m n'a plus la même définition qu'en mécanique classique : c'est la masse d'inertie relativiste, qui varie avec la vitesse du corps, selon la loi de variation

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ augmentant indéfiniment quand la}$$

vitesse tend vers la limite c , vitesse de la lumière. Le coefficient m_0 est dit masse propre ou masse au repos : il n'est autre que la masse de la mécanique newtonienne, retrouvée à la limite des vitesses petites par rapport à celle de la lumière (pour $v \ll c$, $m = m_0$). Comme conséquence de la théorie, Einstein mit en évidence l'équivalence de la masse et de l'énergie, avec la formule $E = mc^2$. L'émission d'énergie lumineuse L , par exemple, s'accompagne d'une perte de masse $\frac{L}{c^2}$, et toute énergie possède la propriété d'inertie.

La masse est l'énergie interne des corps, et s'échange, comme l'énergie, dans les interactions. La nature de la masse s'en trouve dès lors profondément changée : elle n'est plus absolument conservée et additive dans les interactions. Les lois de conservation de la masse et de l'énergie ne sont plus valides séparément : seule est conservée l'énergie totale dans la nouvelle acception (énergie relativiste). Les échanges d'énergie qui se produisent dans les interactions correspondent à des modifications des masses ($\Delta m = \frac{1}{c^2} \Delta E$) qui ne sont négli-

geables que tant que les échanges d'énergie restent faibles (dans les actions mécaniques, gravitationnelles, ou chimiques) : ils peuvent être mis en évidence avec les énergies plus élevées des transmutions radioactives (et ils sont, de nos jours, d'une importance considérable avec la libération de l'énergie nucléaire et la production de particules élémentaires).

Dans la nouvelle définition « relativiste » de la masse, la masse « au repos » ou « masse propre », m_0 , garde une signification privilégiée : elle est un invariant relativiste pour tout changement de référentiel d'inertie : $(m_0 c^2) = E^2 - (pc)^2$. Il existe cependant la possibilité que la masse propre d'un corps soit nulle (comme celle du photon) : dans ce cas, sa vitesse est constamment c , qui est, précisément, la vitesse de la lumière (et l'on ne peut parler de masse « au repos »).

Masses d'inertie et masse gravitationnelle. Le principe d'équivalence

Malgré leur égalité, les masses pesante et d'inertie sont deux grandeurs dont la signification physique est bien différente. L'une, par la loi (d'attraction de gravitation) qui la met en œuvre, est une sorte de « charge » gravitationnelle (en analogie avec la charge électrique dans la loi de Coulomb), et l'autre est un simple coefficient des accélérations. La physique classique prend acte de cette égalité, vérifiée dans la loi de la chute des corps (elle rend compte de l'observation de Galilée, que tous les corps tombent avec la même accélération, quelle que soit leur nature, leur densité et leur volume :

c'est que $\gamma = \frac{m_e}{m_i} g = g$) : la mécanique l'inclut avec

succès dans ses calculs, mais sans en fournir d'explication. Elle fut vérifiée avec une très grande précision dans des expériences réalisées de 1890 à 1909 par L. Eötvös.

Réfléchissant sur la loi de la chute des corps et sur l'égalité de la masse d'inertie et de la masse gravitationnelle, c'est-à-dire sur le fait que le mouvement d'un corps dû à l'action de la gravitation est indépendant de sa masse, Einstein eut l'idée, dès 1907, de l'équivalence entre un mouvement uniformément accéléré et un champ de pesanteur homogène, qui devait le conduire à la théorie de la relativité générale. Il fit de la coïncidence entre les valeurs des deux masses un principe fondamental de la nature, qu'il dénomma « principe d'équivalence » (de la masse d'inertie et de la masse gravitationnelle). En lui adjoignant le principe de relativité généralisé (ou covariance générale), il déduisit (au terme de son travail de 1911 à 1915) la structure de l'espace-temps, déterminée uniquement par les masses des corps physiques qu'il contient, qui agissent comme sources du champ. Le mouvement d'un corps suit les équations, purement géométriques, des géodésiques de l'espace-temps.

Masses et interactions fondamentales

La masse exprimant une énergie, on peut lui appliquer, en physique quantique, la relation d'inégalité de Heisenberg ($\Delta E \Delta t \geq \hbar$), ce qui permet de concevoir la notion de particule virtuelle échangée entre deux particules au cours de leur interaction. L'échange correspond à une fluctuation d'énergie $\Delta E \geq mc^2$ (m étant la masse de la particule virtuelle), qui s'effectue dans un intervalle de temps $\Delta t \leq \frac{\hbar}{mc^2}$. On rend compte ainsi de

la masse des particules échangées dans une interaction en fonction de la portée de celle-ci (masse du méson p des forces nucléaires, portée infinie des forces électromagnétiques – la masse du photon qui les propage étant nulle –, masse élevée des bosons intermédiaires transmetteurs de l'interaction faible – W^\pm , Z^0 , $m_{W,Z} \approx 90$ GeV –, liée au caractère presque ponctuel de cette dernière).

Cependant la physique ignore encore aujourd'hui l'origine des masses des particules élémentaires et la raison des différences de masses entre les trois leptons chargés (électron, muon, tauon), ou de celles entre les quarks. Selon les théories actuelles, les effets de masses se manifestent dès que certaines symétries sont brisées. La connaissance des brisures de symétrie responsables de la différenciation des interactions (mécanisme de Brout-Englert-Higgs) éclairera peut-être dans le futur la question des masses des particules.

► CROMBIE A.C., *Augustine to Galileo. The history of science. A.D. 400-1650*, Londres, Falcon Press, 1952 (trad. fr. J. d'Hermies, *Histoire des sciences, de Saint Augustin à Galilée (400-1650)*, Paris, PUF, 2 vol., 1958). – EINSTEIN A., *Collected papers, vol. 2 : the Swiss years, 1900-1909*, éd. J. Stachel et al., Princeton, Princeton Univ. Press, 1989 ; *Œuvres choisies*, 2

et 3 : *Relativités I et II*, éd. F. Balibar, O. Darrigol, J. Stachel et al., Paris, Le Seuil, 2 vol., 1993. – MACH E., *La mécanique* (1883), Paris, Hermann, 1904 (rééd., 1923). – NEWTON I., *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres, Société Royale, 1687 (2^e éd., 1713 ; 3^e éd., 1926). – PATY M., *La matière dérobée*, Paris, Archives contemporaines, 1988 ; *Einstein philosophe*, Paris, PUF, 1993. – POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902, 1970.

Michel PATY

→ Constantes physiques ; Équivalence (Principe d') ; Force ; Gravitation ; Matière (physique) ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Mouvement ; Relativité.

MASSÉ CACHÉE

ASTROPHYSIQUE

Pour estimer la masse d'un objet cosmique, ou la distribution de la masse dans l'univers, plusieurs méthodes s'offrent aux astrophysiciens. De manière surprenante, elles ne semblent pas aboutir au même résultat ! Ceci est à l'origine du problème de la masse cachée, dont les astronomes prirent conscience vers les années 1930, et qui prend un intérêt particulier par ses implications cosmologiques.

Trois méthodes, essentiellement, s'offrent aujourd'hui pour estimer les masses d'objets ou de vastes systèmes astronomiques. La première relève d'une simple cartographie des objets connus. Ainsi, on estime la masse d'une galaxie par l'inventaire du gaz et des étoiles qu'elle contient ; celle d'un amas à partir de son gaz et de ses galaxies. On appelle masse visible la valeur ainsi estimée. Si d'autres estimations aboutissent à des valeurs plus élevées, on dira tout naturellement que la différence correspond à de la masse invisible. La seconde méthode implique une analyse dynamique. Dans le système solaire, les vitesses des planètes dépendent ainsi de la masse du Soleil. De même, les vitesses des étoiles ou du gaz dans une galaxie dépendent de la masse de cette dernière. Dans un amas, les vitesses des galaxies ou du gaz dépendent de la masse de l'amas. La troisième méthode d'estimation des masses, la plus récente, découle d'effets prédits par la théorie de la relativité générale, aujourd'hui bien établis : les rayons lumineux se propagent selon des courbes, dont le tracé dépend des champs gravitationnels, eux-mêmes créés par les masses. Les trajectoires de la lumière dépendent donc finalement des masses en présence, dont l'analyse de tels effets permet des estimations très précises, dans certaines configurations favorables.

L'évidence la plus directe suggérant l'existence de masse cachée provient de l'analyse des mouvements à l'intérieur des galaxies. Dans une galaxie spirale les étoiles tournent autour du centre du disque. Il est possible de mesurer leur vitesse de rotation en fonction de la distance au centre, et de construire ainsi la « courbe de rotation ». Son analyse permet de reconstituer la masse de la galaxie, à l'origine de ces vitesses. Il est

encore plus révélateur d'observer non pas les étoiles mais le gaz présent dans la galaxie, en rotation lui aussi. Observable dans de meilleures conditions, il fournit en effet des informations plus complètes.

Les résultats sont clairs : on ne peut aujourd'hui expliquer les courbes de rotation dans les galaxies spirales sans masse cachée : s'il n'y avait que la masse visible, les vitesses de rotation seraient moins élevées. Quelle est la répartition de cette masse cachée ? Sa quantité ? Sa nature ? Telles sont les composantes du problème. Actuellement, les astronomes estiment qu'il doit y en avoir environ dix fois plus que de masse visible. Leurs modèles favorisent la situation la plus souvent dans un halo sphérique qui entourerait la galaxie. D'autres méthodes, moins précises, confirment ces résultats. Précisons que le problème se pose également à propos de notre propre galaxie, la Voie lactée.

Les amas de galaxies

Historiquement, le problème de la masse cachée est né, au cours des premières décennies de notre siècle, de l'observation des vitesses de galaxies dans des amas de galaxies. Leur masse visible est insuffisante pour « retenir » les galaxies présentes, au vu de leurs vitesses élevées. Comment les amas maintiennent-ils leur cohésion sans se disperser dans l'espace intergalactique ?

Entre les galaxies qu'ils abritent, les amas contiennent aussi de grandes quantités de gaz très chaud, essentiellement de l'hydrogène, à des millions de degrés. Il n'est pas assez abondant pour constituer lui-même la masse cachée mais l'observation du rayonnement X qu'il émet (plus précisément la mesure des vitesses des atomes de gaz dans l'amas, par l'intermédiaire de sa température) fournit de nouvelles estimations de la masse cachée, de manière plus précise qu'à partir des galaxies. De tout cela il résulte qu'il doit y avoir environ dix fois plus de masse cachée que de masse visible dans les amas. Ceci est également confirmé par les phénomènes de lentilles gravitationnelles. Lorsqu'une galaxie se situe dans la même direction qu'un amas de galaxies, mais beaucoup plus loin, sa lumière doit traverser l'amas avant de nous parvenir. Elle subit alors les effets gravitationnels dus à la masse de l'amas, qui incurvent et déforment les rayons lumineux. L'image de la galaxie lointaine est multipliée, amplifiée, déformée, souvent sous la forme d'arcs gravitationnels, dont les astronomes ont observé aujourd'hui plusieurs dizaines d'exemples. L'analyse de telles configurations confirme la présence de grandes quantités de masse cachée.

Cette question de la masse cachée est l'une des plus fondamentales de l'astrophysique actuelle, en particulier par ses implications cosmologiques. En effet, les propriétés de l'univers dépendent de la quantité de matière qu'il contient, et plus précisément de sa densité moyenne, exprimée à l'aide du paramètre Ω . La masse

visible correspond à une valeur de Ω voisine de 0.01. Mais la présence de masse cachée multiplie cette valeur par 10 ou 20.

Par ailleurs, certains cosmologues, pour des raisons diverses, estiment que la valeur de Ω pourrait être proche de l'unité. Cela impliquerait l'existence de quantités encore plus importantes de masse cachée, davantage que ce que suggèrent les analyses évoquées plus haut. La question est cruciale car la géométrie et le destin de l'univers dépendent, entre autres, de Ω . Par ailleurs les modèles de big bang, par l'intermédiaire des calculs de nucléosynthèse primordiale, indiquent que l'univers ne peut contenir plus qu'une certaine quantité de masse « baryonique », c'est-à-dire sous la forme que nous connaissons, composée d'atomes ordinaires. Cette quantité avoisine 0.1 en valeur de Ω . Si la masse cachée dépasse cette valeur, il doit exister aussi de la matière « non baryonique », autre que celle que nous connaissons. Les physiciens ont suggéré, ces dernières années, de nombreuses possibilités. Des particules massives, très nombreuses et non encore détectées, pourraient remplir l'univers. Et ils construisent des détecteurs capables de détecter ces mystérieuses particules, si elles constituent une part importante de la masse cachée. Aucune détection n'a encore été signalée ; les résultats négatifs restreignent de plus en plus le champ des possibilités.

Qu'il y ait ou non de la matière non baryonique, une partie au moins de la masse cachée, dans les galaxies par exemple, doit être sous forme baryonique. Elle ne peut être constituée d'étoiles, ou de gaz, qui sont visibles. Parmi de très nombreuses possibilités examinées, un petit nombre seulement restent plausibles : du gaz très froid réparti de manière très fragmentaire et, pour cette raison, invisible ; des restes invisibles d'anciennes étoiles très massives (trous noirs par exemple). Mais le plus probable reste l'existence d'objets intermédiaires entre planètes et étoiles, dont la masse serait une fraction de celle du Soleil, souvent appelés naines brunes. Des campagnes d'observations ont été organisées pour tenter de détecter de tels objets par leurs effets de lentilles gravitationnelles : ils pourraient en effet dévier les rayons lumineux d'une étoile située derrière eux, amplifiant ainsi brièvement la luminosité de cette dernière.

Un ensemble d'analyses indépendantes et convergentes a convaincu les astrophysiciens qu'il existe de la masse cachée dans les galaxies et dans les amas. Ce problème, aux implications cosmologiques cruciales, constitue aujourd'hui l'une des énigmes les plus fascinantes de l'astrophysique.

► AUDOUZE J. & TRAN THANH VAN éd., *Dark matter*, Proc. XXIII^e rencontres de Moriond, Gif-sur-Yvette, Éd. frontières, 1988. — CARR B.J., *Comments on Astrophysics*, 14, 5, p. 257-280, 1990. — TRIMBLE V., *Ann. Rev. Astronomy Astrophysics*, 25, 1987, 425.

Marc LACHÛÈZE-REY

→ Big bang ; Lumière ; Propagation ; Univers.

MATIÈRE

Même si l'ancienne théorie de Leucippe, reprise par Démocrite, orchestrée et poétisée par Lucrèce, excède la vérification et reste hypothétique, elle n'en frappe pas moins, parce qu'elle voit dans la matière une concentration de particules (les atomes, c'est-à-dire les insécables) qui ne diffèrent entre elles que par leur forme et leurs agencements.

Préalablement on s'en était tenu aux données : comme les corps se présentent à nous selon trois états (solide, liquide, gazeux) et qu'on avait ajouté un quatrième élément, le feu ou l'énergie (Héraclite), grâce à laquelle nous pouvons transformer les trois premiers les uns dans les autres, il devenait possible de tenir l'un d'entre eux pour le plus fondamental : Thalès opta pour l'eau, Anaximène pour l'air, Empédocle pour la terre.

Plus tard, on devait encore s'inspirer des données, afin de caractériser la matière : on allait lui reconnaître quelques propriétés de base, communes à tous les corps, l'étendue, l'impénétrabilité, l'indestructibilité, la mobilité, etc. En raison de cette dernière, on ne cessa pas de lier la matière avec l'énergie, tant à cause des incessantes transformations qu'elle subit que du fait de la conservation de cette énergie (principe établi par Helmholtz [1821-1894]).

Mais la conception de l'atome l'a emporté ; il ne ressemble en rien à celui de Démocrite ; à lui seul, il se définit comme un système particulaire architecturé (entre autres constituants, les électrons, les protons, les neutrons) ; un noyau électropositif s'oppose même aux électrons qui gravitent autour de lui, selon certaines orbites ; et c'est d'ailleurs lorsque ceux-là en changent qu'ils absorbent ou émettent de l'énergie.

Toutefois, avant d'en arriver à cette conception (la physique particulaire, la structure atomique constitutive), la science de la matière avait résolu quelques problèmes et forgé des notions essentielles.

a) L'une de ces premières victoires a consisté à chasser les fantômes comme celui du phlogistique et à attribuer à la matière « le principe de la conservation » : « Rien ne se perd, rien ne se crée. » Stahl considérait que les corps combustibles renferment en eux un feu fixé (l'inflammabilité) ; lorsqu'on les chauffe, le phlogistique se dégage ; mais, comme le résidu de cette calcination pèse plus que le métal dont on était parti, il y avait là une sorte de contradiction, puisqu'une perte se soldait par un plus pondéral. Stahl soutenait alors que la présence d'un « principe immatériel » allégeait la substance qui en était imprégnée. Lavoisier devait expliquer tout autrement cette réaction : la combustion donne lieu à une oxydation métallique plus pesante ; un simple déplacement s'est opéré (l'air de l'enceinte a perdu une partie de son oxygène : nous comprenons donc l'augmentation finale). Il suffit de recourir à la balance et d'opérer surtout en milieu fermé. Lavoisier imposait l'idée de l'équation chimique. De même si l'eau se convertit en terre, c'est parce qu'elle a dissous le verre alcalin du récipient ; ce que l'un a gagné,

l'autre l'a perdu. La rationalité entre ainsi dans la compréhension des modifications matérielles.

b) Au début du XIX^e s., Dalton précisa l'hypothèse atomique ; il devait admettre que tous les corps sont composés d'atomes, que les atomes d'un même élément sont caractérisés par le même poids qui diffère de celui des atomes des autres éléments. Et comme il regarda l'hydrogène comme la substance la plus légère, il lui attribua arbitrairement le chiffre 1 mais évalua le poids des autres éléments à partir de ce chiffre de référence ; ainsi, l'oxygène fut affecté du chiffre 7 (il sera ensuite corrigé et porté à 8) ; il attribua le 5 à l'azote, le 13 au soufre, etc., bref il nous proposa, bien qu'erroné, l'un des premiers regroupements quantitatifs des substances nettement différenciées. Il devait aussi définir les composés (les molécules) comme formés d'atomes liés entre eux selon des proportions stables : après avoir précisé la nature des premiers éléments, il s'orienta vers la compréhension des combinaisons qui obéissent à des constantes.

c) Autre avancée, les savants comprirent comment les complexes se forment et acquièrent leur solidité : outre la liaison ionique qui rend compte de l'échange électronique (ainsi le négatif du chlore s'unit au positif du sodium dans le ClNa), ils y ajoutèrent la liaison covalente, plus révolutionnaire, puisqu'elle résulte de la mise en commun (selon la règle de l'octet) ou du partage des couches atomiques externes. Laissons de côté la liaison hydrogène ; nous nous expliquons comment s'accrochent les atomes pour constituer des molécules arborescentes (une matière complexe, mais particulièrement organisée et différenciée).

Cette matière — du fait de son organisation, dans laquelle la science nous permet d'entrer comme du fait de sa conservation — va devenir un opérateur cosmogonique qui inspire toute une philosophie, le matérialisme mécanique ou plutôt énergétique. Les penseurs ne peuvent plus en rester à Descartes qui tient la matière pour inerte, passive, sans contenu propre, réduite à la seule étendue. « En examinant la nature de cette matière (dont le monde est composé) je trouve qu'elle ne consiste en autre chose qu'en ce qu'elle a de l'étendue en longueur, largeur et profondeur, de façon que tout ce qui a ses trois dimensions est une partie de cette matière » (*Lettre à Chanut*, le 6 juin 1647). Dans ces conditions, ce que le monde contient déjà de complexe et même d'insolite — plus particulièrement l'action à distance par suite d'affinités entre éléments ou du fait de forces qui transcendent le spatial, comme les phénomènes du magnétisme (la boussole, l'aimantation) — doit être annulé, ramené à un jeu d'engrenages et de pièces emboîtées ; c'est qu'on tient à retirer au substrat les moindres capacités, les entéléchies (le terme a été forgé par Aristote ; il sera repris par Leibniz, dans sa *Théodicée* « ce qu'on peut appeler force, effort, *conatus* » [I, § 87]).

Mais les philosophes du XVIII^e s. entendent bien rendre à la matière ce qui lui a été retiré. Holbach revendique le monisme (tout dérive de la matière) : il

notait que « les hommes ont regardé la matière comme un être unique, grossier, passif, incapable de se mouvoir, de se combiner, de rien produire par lui-même » (*Système de la nature*, I, chap. 2). Diderot, qui partage ce point de vue et lutte contre les préjugés, mettra toute sa fougue au service d'une matière qui a été trop rapetissée et affaiblie afin de mieux avantager la pensée. Dans *Le rêve de d'Alembert*, le philosophe entend nous montrer comment un bloc de marbre (l'être le plus démuné, le moins propice à ses conclusions, le plus inerte en apparence) peut engendrer ou bien une plante ou bien un animal, l'homme même, à la limite. Il précise le processus : il convient de pulvériser ce bloc, de le libérer, en somme, de mêler ensuite le broyat à de la terre que les racines d'un végétal absorbent, de donner à l'animal cette plante à digérer ; enfin nous mangerons et assimilerons la bête ; nous aurons ainsi parcouru toutes les étapes de la conversion et de la transmutation. « Voici en quatre mots la formule générale. Mangez, digérez, distillez *in vasi licito*, et fiat homo secundum artem. Et celui qui exposerait à l'Académie le progrès de la formation d'un homme n'emploierait que des agents matériels dont les effets successifs seraient un être inerte, un être sentant, un être pensant... » (*Le rêve de d'Alembert*, in *Œuvres complètes*, Le Club français du livre, 1970, t. VIII, p. 61).

Qu'est-ce que l'inerte (le minéral, dont le marbre) sinon une matière génésique mais empêchée ? Il suffit de lui rendre sa propre énergie ou de rétablir le mouvement qui l'habite pour qu'elle rejoigne la vitalité et participe au jeu des transformations qui définissent l'univers. La pensée elle-même n'échappe pas à ces métamorphoses et à ces cycles. Dans sa *Lettre à Duclos* du 10 octobre 1765, Diderot le mentionne : « La pensée est le résultat de la sensibilité et, selon moi, la sensibilité est une propriété universelle de la matière, propriété inerte dans les corps bruts, comme le mouvement dans les corps pesants arrêtés par un obstacle, propriété rendue active dans les mêmes corps par leur assimilation avec une substance animale vivante » (*Œuvres complètes*, t. V, p. 951). Ainsi le philosophe multiplie les observations et les expériences, les réelles et les fictives, toutes destinées à nous convaincre de ces équivalences, de telle manière que, en partant d'un substrat matériel que nous parvenons à « réactiver », nous puissions obtenir le plus spectaculaire ; nous passons sans problème de l'animal à l'homme et aussi de celui-ci à l'homme de génie ; nous pouvons aussi descendre la pente : un rien suffit. Diderot efface les règnes et les séparations ; il n'est pas davantage de clivage possible entre l'âme et le corps (le dualisme), de là, un matérialisme vitaliste intégral, un hylozoïsme.

Encore faut-il définir la matière de façon non restrictive. Diderot n'y manque pas ; il nous dévoile ses ressources et sa propre inventivité ; par exemple, lorsqu'une simple corde est pincée et à supposer qu'un obstacle léger la divise, le son qui va naître sur la première fraction suscite inévitablement un harmonique sur l'autre fraction — preuve que la matière accepte

d'abord les sourdes communications et qu'elle favorise les accords (une conspiration entre les territoires séparés, l'harmonie, le dépassement du local dans lequel on ne l'enferme que trop).

À la même époque, La Mettrie et même Voltaire (encore que plus réticent) adhèrent à cette même thèse, opposée à celle des philosophes du XVIII^e s. Il est clair qu'on remplace alors un « absolutisme » par un autre, à partir d'extrapolations ou de résultats amplifiés sinon déformés. Le matérialisme dialectique de Marx devait aussi conférer à la matière tous les pouvoirs, encore que ce soit moins la matière qui soit glorifiée que le travail de l'homme qui la transforme (les modes de production) et que la dialectique (la négation de la négation) la sauve de son séculaire aplatissement.

La question lancinante demeure de savoir s'il faut admettre des plans distincts de la réalité ou si la matière peut, par elle seule, engendrer ce qui paraît la dépasser. La science actuelle — du moins dans le domaine de la biologie — montre le chemin ; elle a prouvé que la vie résulte elle-même, et dans son essence et dans ses fonctionnements — de la réalisation d'un programme enfoui au cœur de la cellule (son noyau), écrit en quelque sorte à l'aide d'un alphabet à quatre lettres. Les acides nucléiques, par leur séquençage, se transcrivent en un texte protéinique (l'information se conserve et se transmet). Et chaque être vivant, bien que dérivé de ce système qu'on aurait pu croire limité, n'en possède pas moins son individualité.

Il n'est pas exclu que nous puissions aller de la vie à la pensée et réduire l'écart entre le psychisme et la cérébralité. Les opérations de l'intelligence — la mémoire, les inférences, les décisions — ont pu être déléguées à des appareils performants — preuve que ce que les critiques nomment « la quincaillerie » peut égarer ou du moins mimer ce que nous évoquons et ce que nous jugeons, à travers nos circuits neuronaux interconnectés.

Un matérialisme moins radical et moins mythique que celui des penseurs du XVIII^e s. reconnaît l'existence des niveaux mais gagne aussi à maintenir et à rechercher une intelligibilité unifiante. Si nous jugeons insensée l'idée de « matérialiser » la pensée, nous croyons nécessaire de « spiritualiser » la matière, c'est-à-dire que nous lui reconnaissons des potentialités qui excèdent la simple étendue à laquelle on a cherché à la réduire (le réductionnisme ne s'exerce pas toujours là où on le situe).

- BACHELARD G., *Le matérialisme rationnel*, Paris, PUF, 1952.
- BLOCH O., *Matière à histoires*, Paris, Vrin, 1997.
- BRAUDEL F., *Civilisation matérielle. Économie et Capitalisme XV-XVIII s.*, Paris, A. Colin, 1979.
- CANGUILHEM G., *Introduction à l'histoire des sciences : I. Éléments et Instruments*, II, *Objet, méthode, exemples*, Paris, Hachette, 1970-1971.
- DIDEROT D., *L'encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 1751-1772.
- DUBUFFET J., *L'homme du commun à l'ouvrage*, Paris, Gallimard, 1973.
- GILLE B., *Histoire de la métallurgie*, Paris, PUF, 1966.
- GUINIER A., *La structure de la matière*, Paris, Hachette,

1980. — LEROI-GOURHAN A., *Évolution et techniques*, t. I, *L'homme et la matière*, Paris, Albin Michel, 1943. — MARX K., *L'homme et la matière*, Paris, Albin Michel, 1943. — MARX K., *Le capital, Critique de l'économie politique*, trad. Jules Roy, Paris, Éd. Sociales, ou *Œuvres*, éd. Rubel, Paris, Gallimard « Pléiade », 1982. — MUMFORD L., *Technique et civilisation*, trad., Paris, Le Seuil, 1950.

François DAGOGNET

→ Immatérialisme ; Origines de la vie.

MATIÈRE PHYSIQUE

Le mot « matière » cache sous sa généralité abstraite une origine concrète fort éclairante. En latin archaïque, *materia* appartient à la langue rustique et désigne la substance dont est fait le tronc de l'arbre, en tant qu'elle est productrice (de branches, de feuilles) ; il a tout naturellement pour racine (!) le terme *mater*. L'élargissement successif des sens du mot, d'abord dans la langue commune, à des matériaux concrets variés, puis, dans la langue philosophique, à une notion essentielle, ne doit pas faire oublier son contenu initial, qui convoque l'idée de fécondité : la matière reste la matrice commune où s'engendrent les multiples et divers objets du monde.

Ainsi peut-on comprendre pourquoi l'étude de la matière engage nécessairement une visée réductionniste visant à découvrir, sous les formes complexes et confuses des choses, une hypothétique nature commune de leurs constituants, et, si possible, une explication générique de leurs comportements. Ce programme est largement constitutif de la physique. Il a abouti en vérité à une remarquable transformation de la notion même de matérialité.

Une matérialité évolutive

Dans le contexte de la science moderne, l'idée de matière renvoie aux caractéristiques considérées comme les plus profondes des objets naturels, leurs « qualités premières ». Galilée peut ainsi écrire : « Je dis que je me sens nécessairement amené, sitôt que je conçois une matière ou substance corporelle, à la concevoir tout à la fois comme limitée et douée de telle ou telle figure, grande ou petite par rapport à d'autres, occupant tel ou tel lieu à tel moment, en mouvement ou immobile, en contact ou non avec un autre corps, simple ou composée et, par aucun effort d'imagination, je ne puis la séparer de ces conditions ; mais qu'elle doit être blanche ou rouge, amère ou douce, sonore ou sourde, d'odeur agréable ou désagréable, je ne vois rien qui contraigne mon esprit de l'appréhender nécessairement accompagnée de ces conditions ; et, peut-être, n'était le secours des sens, le raisonnement ni l'imagination ne les découvriraient jamais » (Galilée, *L'Essayer*, trad. et prés. C. Chauviré, Paris, Les Belles Lettres, 1980).

La notion de matière en vient alors, pour la physique

de l'âge classique, à désigner la substance commune à tous les « corps », considérée indépendamment des propriétés spécifiques qui les différencient. Locke, précisant encore l'idée de « qualités premières », considère qu'un corps physique doit nécessairement posséder « solidité, étendue, figure ». Débarrassée de qualités secondes contingentes (couleur, odeur, etc.), l'idée de matière reste donc néanmoins proche de l'expérience commune : elle est essentiellement pensée comme composée d'éléments discrets et localisés, séparés par le vide, à l'instar d'un matériau granulaire comme le sable. Descartes, pourtant, dans le cadre d'une métaphysique dualiste séparant esprit (*res cogitans*) et matière (*res extensa*), argumente pour une conception continue où la matière est nécessairement coextensive à l'espace. Il sera vite critiqué, non seulement du point de vue philosophique, mais sur le plan physique : sa conception, répugnant au vide et ne voulant voir la matière que sous les espèces et les espaces de pleins « tourbillonnaires », scientifiquement peu féconde, reste minoritaire et semble céder devant la conception corpusculaire qui s'imposera avec Newton. Mais le dualisme cartésien aura au moins le mérite épistémologique paradoxal de libérer la science d'ambitions démesurées : abandonnant (provisoirement ?) l'espoir d'une compréhension d'ensemble du monde, la physique en fait prend acte de la séparation de l'esprit et de la matière, et se limite désormais à la seconde, considérée d'abord sous le mode de l'étendue.

D'ailleurs, le triomphe d'une conception discontinuiste de la matière n'est pas si entier qu'il y paraît. Car, dès la seconde moitié du XVII^e s., l'étude physique puis chimique des « airs » et des « vapeurs » (Van Helmont — l'inventeur du mot « gaz » —, Boyle, Mariotte, etc.) va amener les physiciens à étendre leur intuition de la matérialité pour y inclure ces fluides sans forme propre, de densité variable, dépourvus de substantialité palpable. L'étude des changements d'état, des transformations mutuelles entre phases solides, liquides et gazeuses d'un même corps selon la pression et la température, achèvera de désolidariser l'idée de matière de celle de « corps » possédant consistance et étendue propre. Même si reste sous-jacent le projet d'une réduction ultime de ces fluides à leurs éléments corpusculaires, l'idée d'une matérialité continue n'en coexiste pas moins avec la conception atomistique : jamais le vide ne triomphera pleinement. Aussi deviendra-t-il possible de faire rentrer dans la catégorie de matière ainsi étendue, des « principes » fluides imperceptibles à nos sens mais non moins universels, et occupant potentiellement l'espace entier, comme le prétend phlogistique et plus tard l'éther. Sur des bases empiriques plus solides, la lumière et la « matière de la chaleur » (ou « calorique ») figurent au premier rang des « substances qui se rapprochent le plus de l'état de simplicité » dans la nomenclature chimique de Guyton de Morveau et Lavoisier (1787).

Au XIX^e s. cependant, on finira par rendre compte des changements d'état de la matière en termes des configurations spatiales de ses atomes constitutifs, ce qui

stabilisera provisoirement à ce niveau la notion de substance : sera considéré comme « matière » tout assemblage d'atomes (ou de molécules). Une réaction chimique, aussi bien qu'une transformation physique, n'étant rien d'autre qu'un réarrangement des atomes, c'est par leur permanence que se trouvera garantie la stabilité implicitement demandée à l'idée de matière. La chaleur, quant à elle, sera exclue de la matérialité quand la mécanique statistique l'identifiera à l'énergie désordonnée d'agitation thermique des atomes et des molécules. Mais cette victoire apparente d'une conception atomistique de la matière, faite d'éléments discrets dans un espace vide, sera de courte durée.

C'est autour de la lumière que va se jouer une complexe valse-hésitation de plus d'un siècle où se condense l'essentiel de l'évolution des conceptions de la matérialité. Mise au premier rang des « principes matériels » par les lavoisiers, la lumière en sera vite exclue dès lors que sa nature corpusculaire, affirmée depuis Newton, sera invalidée et remplacée au début du XIX^e s. par une représentation ondulatoire (Young, Fresnel). Le rayonnement lumineux, puis, après Maxwell, et plus généralement, électromagnétique, apparaîtra comme doté de propriétés l'excluant de la matérialité. Son inéluctable propagation empêche de le concevoir dans l'état de repos d'un corps substantiel « tel qu'en lui-même », et son caractère éphémère (il est émis, puis absorbé) le prive de la permanence demandée. Mais surtout, dans la mesure où tout phénomène ondulatoire semble devoir être conçu comme représentant l'état de mouvement collectif d'un milieu de propagation (l'air pour le son, l'eau pour les vagues), c'est à ce milieu et non à l'onde qu'est attribuée la matérialité. L'éther « luminifère » sera inventé précisément pour jouer ce rôle et servir de support substantiel aux ondes électromagnétiques dans la synthèse maxwellienne. Restera alors à comprendre la nature de cet éther qui doit posséder à la fois, d'une part, une extrême ténuité, qu'exige la propagation de la lumière au travers des milieux solides transparents, ainsi que le déplacement sans frein des corps (célestes en particulier) dans un espace rempli d'éther, et, d'autre part, une extrême rigidité, dont témoigne la considérable vitesse de propagation de la lumière (la vitesse de propagation d'une onde dans un milieu est directement liée à sa fermeté, comme on le voit en comparant par exemple les vitesses du son dans l'air, dans l'eau et dans le fer). C'est l'impossibilité de combiner ces deux propriétés *a priori* antinomiques dans un modèle mécanique raisonnable qui disqualifiera l'éther, auquel la réforme einsteinienne de l'espace-temps apportera le coup de grâce.

Ainsi émergera une nouvelle conception du champ électromagnétique, qui, privé de substrat et devant assurer sa propagation dans le vide, acquerra une substantialité propre. Cette conception s'étend tout naturellement au champ de gravitation. La physique classique s'achève ainsi sur une dualité ontologique : elle repose sur l'existence de deux formes de matière irréductibles l'une à l'autre : d'une part des corps discrets et localisés

(particules), de l'autre des êtres étendus et continus (champs). C'est une revanche ironique du plein sur le vide. Mais le paradoxe est que cette refonte radicale de la notion même de matérialité n'aura pas le temps de s'expliquer avant que d'être remise en cause par la rencontre conflictuelle des idées classiques avec l'expérience quantique. C'est pourquoi la nouvelle physique quantique naîtra au XX^e s. dans une considérable confusion épistémologique, exprimant trop souvent ses innovations dans les termes mêmes du niveau classique qu'il s'agissait précisément de dépasser. Alors que la théorie quantique, intrinsèquement moniste, ne reconnaît qu'un seul type d'objet, le quanton, qui n'est ni onde, ni corpuscule, cette unification du concept de matière restera masquée par la référence à une « dualité onde-corpuscule » désormais caduque. De même, bien que, du point de vue quantique, la lumière soit comprise comme constituée de photons, quantons qui, malgré leur spécificité, relèvent de la même catégorie générale que les électrons, par exemple, l'antinomie ainsi dépassée de la matière et du rayonnement se perpétuera dans des formes d'expression parfaitement abusives : on parlera longtemps de « dématérialisation » ou même d'« annihilation de la matière » lorsqu'un couple électron-positon se convertit en photons, et de « création de matière » pour le phénomène inverse. Ce ne sont pourtant que des réactions de transformations mutuelles entre espèces matérielles dotées d'une égale dignité ontologique.

Sans doute cette confusion a-t-elle été aggravée par une particularité du photon, sa masse nulle. C'est que la relativité einsteinienne ne réforme pas nos seules conceptions de la cinématique spatio-temporelle : elle induit automatiquement une transformation des concepts dynamiques, comme l'énergie et, bien entendu, la masse. La mécanique newtonienne, dans le cadre de la relativité galiléenne, attribuait à tout objet une masse qui mesurait sa « quantité de matière », nécessairement non nulle. La mécanique einsteinienne, à côté de tels objets massifs, oblige à reconnaître la possible existence d'objets de masse nulle. Ne connaissant pas le repos, se propageant sans trêve à la vitesse limite invariante caractéristique de la théorie (la « vitesse de la lumière »), de tels objets exhibent une forme de matérialité inédite et qui ne sera admise qu'avec retard ; en témoignent l'écart entre l'apparition au sein de la théorie de cette entité électromagnétique quantifiée (Einstein, 1905) et sa dénomination comme membre à part entière de la famille des quantons, le photon (Lewis, 1925). La découverte subséquente d'autres quantons dont la masse est (peut-être) nulle, les neutrinos, finira par banaliser la notion. S'ajoutant à cette autre conséquence de la relativité einsteinienne qu'est la convertibilité entre masse et énergie, l'émergence d'entités matérielles de masse nulle invalide l'identification newtonienne entre masse et « quantité de matière ». La masse doit désormais être rapportée aux lois de conservation génériques découlant de l'invariance relativiste. Dans ce cadre, masse et énergie renvoient toutes deux au concept d'inertie ; la

matérialité d'un corps s'exprime alors par sa résistance à la modification de son état de mouvement, et apparaît ainsi comme une conséquence dynamique de la structure de l'espace-temps.

Ce mouvement d'abstraction est plus général encore. Loin que nous ayons pu reconnaître, comme l'imaginaient Galilée et Locke, l'essence de la matière dans les seules qualités que notre raison semblait nous présenter comme « premières », ces qualités se sont dissipées au fur et à mesure de nos analyses, et se sont montrées aussi « secondes » que couleurs, odeurs et autres qualités immédiatement sensibles. Ni l'extension, ni la forme, ni la consistance, et même pas le nombre, ni le mouvement, ne peuvent être considérés comme des propriétés intrinsèques des corps. Ce sont des caractéristiques contingentes, adéquates à certains types de complexes matériels, essentiellement macroscopiques, et dont la pertinence conceptuelle, loin d'être évidente, demande une analyse fine et élaborée pour en comprendre l'émergence à partir des notions sous-jacentes. Ces notions essentielles, constitutives de la matérialité au sens moderne, ne sont de fait plus des qualités, mais bien des quantités. Caractérisant les objets physiques du point de vue de leurs modalités spatio-temporelles d'existence, on trouve ainsi la masse (au sens einsteinien), déjà mentionnée, mais aussi le « spin ». S'y ajoutent diverses grandeurs relevant de catégories autres que celles de la mécanique, et qui spécifient les types et les intensités des interactions auxquelles ces objets prennent part : la plus connue est la charge électrique, qui régit le couplage avec le champ électromagnétique, mais d'autres grandeurs s'y ajoutent (charges baryonique, leptonique, etc.) qui gouvernent les autres types d'interaction. La possibilité pour ces charges de prendre des valeurs de signes opposés (possibilité en dernière analyse liée, elle aussi, à la structure de l'espace-temps) introduit ainsi l'idée d'une dualité constitutive de la matérialité : la si mal dénommée « antimatière » n'est qu'une forme nouvelle de matière, symétrique de la matière ordinaire. En définitive, les diverses propriétés physiques, caractérisant les objets matériels au niveau le plus profond atteint actuellement par l'analyse, renvoient toutes à des lois de conservation qui expriment au fond, quoique sous des formes très éloignées de l'expérience commune du monde, l'idée de permanence constitutive de la notion même de matière – ou bien faudrait-il désormais écrire « mathière » pour insister sur cette conception toujours plus abstraite et plus formalisée de la matérialité ?

Structure et organisation de la matière

En même temps qu'était reconnue la nature (quantique) des éléments de la matière, c'est leur caractère élémentaire, justement, qui allait faire l'objet de remises en cause successives. Loin de révéler un niveau constitutif stable, l'analyse allait mettre en évidence plusieurs niveaux successifs de structuration de la matière. C'est l'existence de types d'interactions

physiques bien différenciés qui explique cette échelle de niveaux.

Les atomes, tout d'abord, dès 1911 (Rutherford), révélèrent leur composition interne : un noyau central massif et très concentré, environné d'électrons (qui expliquent toutes les propriétés chimiques et lumineuses des atomes). La constitution des atomes, comme leurs échelles (tant spatiale qu'énergétique) est entièrement gouvernée par les forces électromagnétiques. Puis, vers 1935, c'est le noyau qui se montrait constitué de nucléons (neutrons et protons), liés par l'échange de mésons (pions entre autres), sous l'effet de forces (nucléaires) d'un type nouveau. Enfin, ces quantons nucléaires eux-mêmes finissent par exhiber vers 1970 leur propre constitution, édifices de quarks liés par des gluons. Il faut prendre conscience de l'ampleur des échelles de distance ainsi descendues et de la rapidité de notre plongée au cœur de la matière, que résume le tableau suivant :

(depuis toujours)	matière ordinaire	10^{-3} m
XIX ^e s.	atomes et molécules	10^{-10} m
début XX ^e s.	noyaux et électrons	10^{-14} m
~ 1935	nucléons et autres particules	10^{-16} m
~ 1970	quarks et gluons	10^{-18} m

Cette hiérarchisation est remarquable et rien moins qu'évidente. Elle rend possible une étude intrinsèque de chaque niveau, de façon à peu près indépendante des niveaux sous-jacents : la connaissance des forces nucléaires n'est guère utile en physique atomique et moléculaire, et la théorie de la gravitation ne sert à rien pour étudier le noyau. Ironiquement, si cette autonomisation relative vaut pour l'étude de la matière aux échelles macroscopiques (la nôtre) et microscopiques, elle perd sa pertinence à l'échelle mégascopique : l'astrophysique doit faire une large place, aux côtés de la gravitation évidente et de l'électromagnétisme, à la physique nucléaire (phénomènes intrastellaires) et subnucléaire (cosmologie), montrant ainsi la forte synergie des différents types d'interactions dans la constitution des formes concrètes de la matière – quels que soient les succès encore limités des tentatives actuelles d'unification théorique de ces interactions.

Mais notre compréhension de la matière, si elle exige cette analyse en éléments (plus) simples et en niveaux successifs, ne peut s'y limiter. Car elle demande maintenant une phase de synthèse, permettant d'expliquer la constitution des objets propres à un certain niveau, en termes des propriétés des constituants du niveau sous-jacent. Le bilan ici est loin d'être satisfaisant. On peut même affirmer que cette reconstruction, à quelque niveau qu'on la considère, est pour l'instant embryonnaire, et, sans doute, restera très partielle. Ainsi, déjà, le passage de la structure atomique de la matière à ses propriétés macroscopiques est-il rien moins qu'évident. Certes, l'on comprend assez bien le rapport entre les formes des cristaux et les structures moléculaires ou atomiques pour les minéraux les plus simples, l'on sait expliquer pourquoi les métaux conduisent l'électricité et la chaleur, et l'on peut ramener les apparences visuelles

(couleurs) des matériaux à certaines caractéristiques de leurs constituants microscopiques. Mais, aussi convaincantes soient-elles, ces explications restent très générales et ce n'est que dans des circonstances très précises, pour des corps particulièrement simples, que la théorie peut expliquer ou prédire avec précision les valeurs numériques de la densité, de l'indice, de la dureté, etc., de tel matériau. Aujourd'hui encore, personne ne saurait prévoir à l'avance les comportements très complexes de l'eau à partir des propriétés de sa molécule H₂O (par exemple, le simple fait que la glace flotte). Deux découvertes inattendues des dernières décennies, celle des supraconducteurs à « haute » température, toujours incompris théoriquement, et celle des « fullerènes », formes moléculaires du carbone d'une simplicité structurelle pourtant frappante, illustrent également la très grande difficulté de cette remontée vers le microscopique. Mais cette difficulté n'est pas limitée à l'explication précise de propriétés physiques particulières. Certains aspects majeurs de la matière macroscopique restent assez énigmatiques : ainsi l'impenétrabilité des solides, le fait qu'un caillou ou une montagne de granit aient la même densité, que la chaleur de fusion d'un morceau de glace soit proportionnelle à sa masse, etc. Ironiquement, il s'agit là précisément des qualités premières lockiennes de consistance et d'étendue. Il a fallu attendre les années 1970 pour établir que ces propriétés reposent sur le principe d'exclusion de Pauli auquel obéissent les électrons de la matière. Encore la démonstration reste-t-elle d'une technicité qui la rend fort ésotérique.

La situation, paradoxalement, est un peu meilleure au niveau de l'atome lui-même. Il est vrai que sa composition est plus simple : alors qu'un petit morceau de matière (tel un gravillon ou une brindille) comporte quelque 10²⁴ atomes de nombreuses espèces, un atome ne comprend qu'un noyau et quelques dizaines d'électrons, interagissant par des forces électromagnétiques bien connues. Nous croyons savoir écrire l'équation (de Schrödinger) qui régit ce système, et permet de calculer le spectre énergétique de l'atome, ses réponses à diverses excitations, etc. — en principe... Car, si le calcul est facile dans le cas de l'atome d'hydrogène (qui possède un seul électron) et constitua un triomphe éclatant de la théorie quantique dans les années 1920, il devient déjà plus ardu, et demande diverses méthodes d'approximation subtiles, dès le cas de l'hélium (à 2 électrons seulement). Aussi, pour les atomes possédant quelques dizaines d'électrons, et *a fortiori* pour les molécules complexes, doit-on se contenter de résultats approximatifs et partiels qui requièrent pourtant l'usage de moyens de calculs (matériels et logiciels) hautement sophistiqués. Quant aux niveaux subatomiques, les problèmes rencontrés y sont rendus extrêmement difficiles par l'intensité des interactions mises en jeu et les subtilités qu'introduit dans la théorie la relativité einsteinienne. Pour rendre compte des propriétés des noyaux à partir de leurs constituants (les nucléons, neutrons et protons), on doit se contenter de modèles, variés mais disparates, et

reposant sur certaines données purement empiriques. Leur ingéniosité ne doit pas masquer leur caractère incomplet. C'est d'ailleurs pour tenter de mieux comprendre les interactions nucléaires que les physiciens ont commencé à étudier le niveau subnucléaire, celui des particules qu'ils espéraient élémentaires. Mais cette nouvelle poupée russe, une fois ouverte, s'est révélée une véritable boîte de Pandore, dont se sont échappées des dizaines de particules inattendues et souvent éphémères. Loin de pouvoir aisément remonter au niveau des forces nucléaires, les physiciens ont dû consacrer de considérables efforts à classer et analyser le foisonnement d'un niveau plus complexe, certainement, que celui qu'il sous-tend. Le même phénomène s'est alors reproduit dans l'analyse de ces particules (au moins celles présentant des interactions dites « fortes ») en terme du dernier niveau aujourd'hui connu, celui des quarks et gluons, dont la simplicité initiale apparente s'est montrée toute relative, et ne permet guère qu'une compréhension très limitée des propriétés des particules du niveau supérieur. Il faut d'ailleurs considérer comme un fantasme inavoué de retour aux « qualités premières » perdues, comme une tentative dérisoire pour conjurer l'inquiétude de cet éloignement sans retour par rapport au monde sensible, les conventions terminologiques assez puéries adoptées par les physiciens qui ont baptisé « couleurs », « saveurs » (et même « étrangeté », « charme » et « beauté ») certaines propriétés à la fois conceptuellement ésotériques et mathématiquement rudimentaires des quarks. Force est donc de conclure que les succès du programme réductionniste d'étude de la matière, s'ils sont incontestables quant à l'analyse constitutive, restent très modestes quant à la synthèse explicative. Il faut d'ailleurs noter que le XX^e s. ne s'est pas contenté de découvrir des formes inédites et surprenantes de matérialité aux seuls niveaux micro- ou mégascopiques. Les surprises n'ont pas été moindres en ce qui concerne les modes d'organisation de la matière à notre échelle. La trinité canonique des « états de la matière » — solide, liquide, gazeux — a cédé le terrain à une considérable multiplicité. Entre l'ordre atomique régulier (cristallin) des solides et le désordre des liquides interpolent des états d'ordre partiel (les oxymoriques « cristaux liquides »). Les états amorphes, quant à eux, ne se limitent plus aux fluides familiers puisqu'ils comprennent les verres. Et les liquides peuvent révéler à très basse température des phénomènes typiquement quantiques et néanmoins macroscopiques (superfluidité) fort éloignés de notre idée commune de la liquidité. Même si nombre de ces états de la matière sont loin d'être compris sur le plan théorique, ils n'en donnent pas moins lieu, d'ores et déjà, à un considérable développement de nos pratiques techniques, et se transforment rapidement en matériaux. À côté de ces nouveaux états, des formes plus traditionnelles de la matière macroscopique font l'objet d'un intense redéploiement d'intérêt, que traduit la vogue du vocable de « matière molle ». La structure des agglomérats granulaires (tas de sable), les phénomènes de

cohésion (colles, frittés), les structures mixtes (céramiques, plastiques armés) donnent ainsi lieu à des travaux théoriques inédits et à de fécondes applications. Cet enrichissement de notre répertoire des comportements de la matière macroscopique va entraîner sans doute une mutation profonde et encore inaccomplie de la notion même de matérialité.

► BARTON A., *States of Matter. States of Mind*, Bristol, Institute of Physics Publishing, 1997. — BENSAUDE-VINCENT B., *Éloge du mixte (Matériaux nouveaux et philosophie ancienne)*, Paris, Hachette « Littérature », 1998. — BORN M., *Structure atomique de la matière*, Paris, A. Colin, 1971. — FEYNMAN R., *Lumière et matière*, Paris, Le Seuil, 1992. — GENNES P.G. DE & BADOZ J., *Les objets fragiles*, Paris, Plon, 1994. — GUINIER A., *La structure de la matière : du ciel bleu aux cristaux liquides*, Paris, Hachette, CNRS, 1980. — GUYON É. & TROADEC J.-P., *Du grain de sable au tas de billes*, Paris, O. Jacob, 1994. — KRUGER M.H., *Constitutions of Matter*, Univ. of Chicago Press, 1996. — LÉVY-LEBLOND J.-M., « Une matière sans qualités », *Revue internationale de philosophie*, 1998. — NOËL É. dir., *La matière aujourd'hui*, Paris, Le Seuil, 1981. — PATY M., *La matière dérobée*, Paris, Archives contemporaines, 1988. — VALENTIN L., *Le monde subatomique*, Paris, Hermann, 1987.

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND

→ Antimatière ; Champ ; Corpusculé ; Einstein ; Lumière ; Masse ; Maxwell ; Mouvement ; Quantique.

MAXWELL James Clerk, 1831-1879

Si l'on considère la théorie électromagnétique (ou électromagnétisme de Maxwell) et la mécanique statistique comme les deux théories qui ont façonné la physique du XIX^e s., alors Maxwell incarne à lui tout seul la physique de cette époque. D'autant que son activité s'est étendue à d'autres branches de la physique, considérées comme mineures par rapport à ces deux monuments théoriques : théorie des couleurs (intérêt motivé par la maladie dont était affectée sa femme), mesure de la viscosité (en collaboration avec cette dernière, études de la structure des anneaux de Saturne), etc.

La théorie électromagnétique est une théorie unifiant en un même ensemble conceptuel l'électricité et le magnétisme, et plus tard l'optique, sur la base du concept de « champ », inventé par Faraday à la génération précédente et mathématisé par Maxwell. Le souci d'unification qui a été celui de Maxwell dans l'élaboration de cette théorie est aussi ce qui a conduit Einstein, qui se considérait en la matière comme le successeur de Maxwell, à unifier l'électromagnétisme et la mécanique sous l'égide du principe de relativité. Pour obtenir les fameuses quatre équations qui portent son nom, Maxwell a mis en œuvre ce qu'il appelait de « véritables analogies », analogies qui ne sont en réalité que la traduction du fait que l'énergie est susceptible de se transformer d'une forme en une autre. La méthode a inspiré Bohr en particulier.

Si Maxwell est celui qui a révélé la « véritable nature » de la lumière (champ électromagnétique), nature remise en cause 25 ans plus tard par la découverte

de la quantification de l'énergie lumineuse, c'est aussi l'un de ceux qui ont le plus contribué à l'élaboration de la mécanique statistique en tant que théorie de la matière. Introduisant en physique les méthodes statistiques déjà largement utilisées dans l'analyse des résultats expérimentaux et en sciences sociales, Maxwell est l'auteur de la théorie cinétique des gaz qui permet de comprendre les grandeurs macroscopiques (pression, température, chaleur, etc.) à partir de la constitution « moléculaire » de la matière. Il est également l'auteur du théorème d'équipartition de l'énergie entre les divers degrés de liberté d'un ensemble de molécules, théorème dont les défaillances dans le domaine microscopique devaient jouer un rôle essentiel dans la découverte de la théorie quantique.

► BRUSH S.G., *This motion we call heat*, Amsterdam, New York/Oxford, 1976. — BUCHWALD Z.Z., *From Maxwell to microphysics. Aspects of electromagnetic theory in the last quarter of the 19th century*, Chicago Univ. Press, 1985. — CAMPBELL L. & GARNETT W., *The life of James Clerk Maxwell*, Londres, 1882. — DARRIGOL O., *History of electromagnetism*, UCLA Press, à paraître. — EVERITT W., « Maxwell », *Dictionary of Scientific Biography*, éd. C.G. Gillespie, New York, Scribner's, 1974 (revue en 1975). — Coll. : *The scientific papers of J. Clerk Maxwell*, Cambridge, 1890 (rééd., New York, 1954).

Françoise BALIBAR

→ Avogadro (Nombre d') ; Champ ; Constantes physiques ; Corps noir ; Déterminisme ; Électron ; Entropie ; Ether ; Gaz (Théorie des) ; Gravitation ; Lumière ; Matière [PHYSIQUE].

MAYR Ernst, né en 1904

Ornithologiste initialement formé en Allemagne, Ernst Mayr est recruté en 1931 au département d'ornithologie du Muséum d'histoire naturelle de New York. En 1953, il devient professeur au Museum of Comparative Zoology de Harvard. À l'instar d'un Fabre ou d'un Darwin, Ernst Mayr est au plein sens du terme un naturaliste, intéressé d'abord par la vie, sa signification géographique et son histoire. De 1923 à 1953, Mayr se consacre essentiellement à la systématique des oiseaux et à la théorie de la systématique. Le livre de 1942 sur *La Systématique et l'origine des espèces* fait cependant de lui l'un des trois principaux acteurs de la « synthèse évolutive », avec Dobzhansky (généticien) et Simpson (paléontologue). La période de 1953 (nomination à Harvard) à 1974 (retraite) est essentiellement consacrée à la théorie de l'évolution. Au-delà, le naturaliste s'engage dans une abondante production d'histoire et de philosophie de la biologie.

Les contributions scientifiques majeures d'Ernst Mayr ont porté sur le concept d'espèce, point aveugle, selon lui, de la théorie darwinienne de l'évolution. Contre Darwin (nominaliste), Mayr soutient que les espèces sont réelles, et consistent non en types mais en populations : « Les espèces sont des groupes de populations naturelles actuellement ou potentiellement

interfécondes, et reproductivement isolés d'autres groupes semblables » (1942, 120). Cette définition est au centre de la réflexion évolutionniste de Mayr.

L'œuvre philosophique d'Ernst Mayr est enfin motivée par le souci de faire valoir la spécificité des sciences de la vie, le rôle essentiel qu'y jouent les disciplines naturalistes, et la nécessité de construire une philosophie de la biologie libérée du modèle des sciences physiques.

• *Systematics and the Origin of Species*, New York, Columbia Univ. Press, 1942 (rééd. 1982). — *Animal Species and Evolution*, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press, 1963 (trad. fr. de l'éd. abrégée, *Populations, espèces et évolution*, Paris, Hermann, 1974). — *Evolution and the Diversity of Life. Selected Essays*, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press, 1976. — *The Evolutionary Synthesis*, ouvrage coll., éd. en coll. avec W.B. Provine, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press, 1980. — *The Growth of Biological Thought*, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press, 1982 (trad. fr., *Histoire de la biologie*, Paris, Fayard, 1989). — *Toward a New Philosophy of Biology*, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press, 1988. — *One Long Argument. Charles Darwin and the genesis of Modern Evolutionary Thought*, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press, 1991 (trad. fr., *Darwin et la pensée moderne de l'évolution*, Paris, O. Jacob, 1993).

► GREENE J. & RUSE M. éd., « Special Issue on Ernst Mayr at Ninety », *Biology and Philosophy*, vol. 9, 1994, n° 3 ; *Studies in History of Biology*, 3, 1979 (n° spécial sur Mayr).

Jean GAYON

→ Darwinisme ; Espèce ; Évolutionnisme ; Taxinomie ; Vivant (Théorie du).

MÉCANIQUE QUANTIQUE ET RELATIVITÉ (Compatibilité entre)

L'exposé est divisé en deux parties : 1) compatibilité entre la mécanique quantique et la théorie de la relativité restreinte ; 2) compatibilité entre la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale (ce que l'on appelle « le problème de la gravité quantique »).

Relativité restreinte

Développé dans les années 20 du siècle dernier, par Heisenberg, Born, Jordan et Schrödinger, le formalisme de la mécanique quantique fut tout d'abord appliqué à la résolution de problèmes qu'il était possible de traiter dans le cadre de la cinématique classique (c'est-à-dire galiléo-newtonienne). Autrement dit, ce qui fut alors élaboré, c'est une version quantique de la dynamique classique, qui a permis de traiter un certain type de problèmes, ceux qui font intervenir un nombre fini de particules, en interaction par le jeu de forces dérivant d'un potentiel classique (un exemple type de ce genre de problème est celui du comportement d'électrons liés au noyau par des forces électrostatiques). On procéda à une généralisation quantique de ces formalismes et on tenta d'étendre la portée de

ces méthodes à des problèmes qui, classiquement, sont traités dans le cadre de la cinématique relativiste (au sens de la relativité restreinte) — comme, par exemple, l'interaction des électrons avec le rayonnement. Bien que certaines de ces tentatives aient été partiellement couronnées de succès (citons, en particulier, l'équation de Dirac décrivant le comportement d'un électron placé dans un champ électromagnétique), il apparut très vite que, dans le cas de systèmes à nombre infini de degrés de liberté, il n'était pas possible de construire une véritable théorie quantique relativiste (au sens restreint), libre de contradiction, et qu'il valait mieux chercher une théorie quantique des champs, valant à la fois pour le rayonnement et pour la matière (dont les particules seraient traitées comme les quanta d'un champ approprié). Débutée à la fin des années 20, la quête d'une telle théorie ne s'est achevée que dans les années 80 avec l'avènement de la théorie quantique des champs de jauge. La matière est identifiée à des champs fermioniques dont les quanta ont un spin demi-entier et obéissent à la statistique de Fermi-Dirac (c'est le cas, par exemple, des électrons et des quarks) ; les interactions entre ces champs fermioniques se font par l'intermédiaire de champs bosoniques dont les quanta sont de spin entier et obéissent à la statistique de Bose-Einstein (c'est le cas des photons et des gluons, par exemple). Ces champs sont appelés « champs de rayonnement », au sens large. La forme de ces interactions s'obtient en supposant qu'elles sont invariantes non seulement lors des transformations de symétrie de la relativité restreinte (groupe de Poincaré) mais aussi sous l'effet d'un certain groupe de symétrie interne locale (par exemple, le groupe de jauge $U(1)$ pour le champ électromagnétique — d'où le qualificatif « invariante de jauge » appliqué à ces théories). Toutes les théories du champ impliquant des interactions entre champs en tout point de l'espace-temps font apparaître des quantités infinies lors du calcul des effets de ces interactions. Mais, pour certaines théories du champ relativistes (au sens de la relativité restreinte) et invariantes de jauge, ces quantités infinies peuvent être éliminées de façon cohérente grâce à des techniques de renormalisation invariantes par le groupe de Poincaré. On montre qu'en remplaçant un petit nombre de quantités formellement divergentes (par exemple la charge et la masse de l'électron ou l'on a tenu compte des effets de son propre champ) par leurs valeurs empiriques, finies, on élimine du même coup toutes les autres quantités infinies figurant dans la théorie ; l'accord entre les valeurs ainsi calculées (valeurs finies, donc) pour ces autres quantités et leurs valeurs expérimentales est remarquable. On a longtemps discuté la question de savoir si l'utilisation de techniques de renormalisation avait véritablement résolu le problème des quantités infinies apparaissant dans les théories quantiques des champs ou si l'on n'avait fait que cacher la poussière sous le tapis. On est aujourd'hui de plus en plus convaincu que les théories quantiques des champs elles-mêmes ne sont que les limites à basse énergie d'une certaine théorie (ou de

certaines théories) de nature probablement très différente (par exemple, des théories des cordes, excluant les interactions ponctuelles). « La théorie quantique des champs est ce qu'elle est parce que... c'est la seule manière de rendre conciliables les principes de la mécanique quantique... avec ceux de la relativité restreinte... Nous avons appris, au cours des dernières années, à considérer les théories quantiques des champs qui « marchent », y compris l'électrodynamique quantique, comme des théories des champs effectifs, approximations à basse énergie d'une théorie plus fondamentale qui pourrait même ne pas être une théorie du champ, mais quelque chose de tout à fait différent, comme la théorie des cordes. Dans ces conditions, si les théories quantiques des champs décrivent si bien la physique aux énergies qui nous sont accessibles, c'est tout simplement parce que toute théorie quantique relativiste (au sens restreint) ressemble à la théorie quantique des champs à suffisamment basse énergie (Steven Weinberg, *The Quantum Field Theory of Fields*, vol. 1, *Foundations*, Cambridge University Press, 1995).

Relativité générale (gravité quantique)

Alors que la cinématique de la relativité restreinte permet de traiter la dynamique, classique et quantique, des forces (ou interactions) électromagnétiques, nucléaires faibles et nucléaires fortes, il n'en va plus de même dans le cas de la gravitation, unique en son genre. Tout d'abord, parce que le principe d'équivalence implique que la gravitation n'est pas une force, mais à une modification de la structure de l'espace-temps. Déjà en théorie newtonienne de la gravitation, inertie et gravitation sont intimement soudées et doivent être décrites au moyen d'une connection inertio-gravitationnelle. En relativité générale, s'ajoute le fait que cette connection est déduite du champ de tenseur métrique, lequel devient ainsi dynamique : outre qu'il caractérise la structure chrono-géométrique de l'espace-temps, il est aussi le potentiel dont dérive le champ inertio-gravitationnel. Dans ces conditions, du fait de l'invariance par difféomorphisme de la relativité générale, on ne peut plus opérer le genre de séparation entre cinématique et dynamique qui permet de passer de la dynamique classique à la dynamique quantique tout en utilisant, sans les modifier la cinématique galiléenne ou celle de la relativité restreinte. Si donc l'on tient l'invariance par difféomorphisme pour la caractéristique essentielle de la théorie de la relativité générale, aucune des techniques mises au point en théorie quantique des champs relativistes (au sens restreint) — elles reposent toutes sur la structure cinématique fixe de l'espace-temps de Minkowski — ne peut servir à la construction d'une théorie quantique du champ gravitationnel. Une autre caractéristique des théories invariantes par difféomorphisme, caractéristique qui n'est pas sans lien avec la première, présente une difficulté peut-être encore plus grave. La structure géométrique sur laquelle reposent ces théories est une variété

différentiable à quatre dimensions (plus exactement un fibré sur une telle variété). Étant donné qu'en relativité générale, il ne peut y avoir de structures d'espace-temps non dynamique, les points de la variété ne peuvent pas être interprétés comme des événements tant qu'un champ de tenseur métrique qui soit solution physique des équations du champ gravitationnel n'a pas été spécifié. Dire que la théorie est invariante par difféomorphisme, c'est dire que le champ de tenseur métrique emporte avec lui les grandeurs spatio-temporelles de chaque point de la variété lorsqu'on le déplace sur la variété. Or les questions que l'on se pose en mécanique quantique sont du type : connaissant les valeurs que prend une certaine grandeur lorsqu'on la mesure ici et en cet instant (autrement dit, en un certain point de l'espace-temps), déterminer la probabilité pour qu'une certaine grandeur physique (éventuellement différente de la première) prenne telle valeur lors de sa mesure effectuée là et en cet autre instant (donc en un autre point de l'espace-temps). Dans toutes les autres théories physiques, « ici et en cet instant », tout comme « là et en cet autre instant », font partie de l'énoncé de la question. Mais en relativité générale, « ici et en cet instant », tout comme « là et en cet autre instant » ne peuvent être spécifiés tant qu'on ne dispose pas d'une solution des équations du champ, en l'occurrence un certain tenseur métrique. Ils font partie de la réponse et non de la question. Mais alors, à quel type de questions la version quantique de la relativité générale est-elle censée répondre ?

Les physiciens ont répondu de façons très diverses aux difficultés que pose l'invariance par difféomorphisme de la relativité générale ; certains pensent qu'il n'est pas nécessaire de quantifier le champ gravitationnel ; ils s'opposent à ceux (majoritaires) qui pensent que, puisque le champ de gravitation est universel, il existe inévitablement une relation, de quelque nature qu'elle soit, entre la théorie quantique des champs et la relativité générale. Le problème ainsi posé est celui de la « gravité quantique », appellation qui ne préjuge pas de la nature de la solution qui doit y être apportée. Les physiciens venus de la théorie quantique des champs, soutiennent que l'importance de l'invariance par difféomorphisme ne doit pas être exagérée : la relativité générale est une théorie du champ relativiste (au sens restreint) dont le groupe de jauge est particulièrement peu agréable à manipuler. Les physiciens qui viennent de la relativité générale soutiennent que l'invariance par difféomorphisme constitue le cœur même de la relativité générale, et que ce sont donc les méthodes de la mécanique quantique qui doivent être modifiées, en vue de leur adaptation à une théorie invariante par difféomorphisme. Ils ajoutent qu'au cas où cet objectif s'avèrerait irréalisable, il faudrait inventer une théorie plus fondamentale dont à la fois la théorie quantique des champs et la relativité générale émergeraient « à la limite », dans telle ou telle condition bien spécifiée. Le problème de la « gravité quantique » n'a, à ce jour, toujours pas reçu de réponse vraiment

satisfaisante. Dans la suite, nous allons passer en revue les diverses options possibles.

Quantification dans un espace-temps plat. — Les équations du champ de la relativité générale sont non linéaires ; il est donc très difficile d'en donner une solution exacte. Einstein, dans un premier temps, avait adopté une technique, classique dans ce genre de situation, qui consiste à chercher une solution approchée en développant les équations non linéaires du champ autour d'une solution formant une « toile de fond » fixe, toile de fond qui en l'occurrence ne peut être que l'espace-temps plat de Minkowski de la relativité restreinte, espace de courbure nulle. Les petits écarts de la métrique par rapport aux valeurs minkowskiennes peuvent alors être considérées comme un champ dynamique agissant dans l'espace-temps (cinématique) de la relativité restreinte. Les premiers essais de quantification, effectués dans les années 30 (par Rosenfeld et Bronstein) étaient fondés sur une approximation linéaire ne retenant que les termes du premier ordre de ce type de développement. Les termes restant, linéarisés, pouvaient alors être interprétés comme des transformations de jauge du champ gravitationnel linéarisé. (On ne tient en général pas compte du fait que ces termes peuvent aussi être interprétés comme des difféomorphismes du « fond » d'espace-temps minkowskien, dont les points sont de ce fait aussi physiquement indéfinis que dans la théorie complète.) Après que les techniques mises au point en électrodynamique quantique pour obtenir un développement terme à terme des interactions non linéaires entre la matière et le rayonnement électromagnétique eurent fait la preuve de leur efficacité, dans les années 50, on tenta d'appliquer le même genre de techniques aux self-interactions non linéaires du champ de gravitation — les équations linéarisées du champ gravitationnel constituant alors le premier terme d'un développement en perturbation. Ces équations sont formellement identiques à celles d'un champ relativiste (au sens restreint) de particules de masse nulle et de spin 2, dont la version quantifiée fait apparaître des quanta bosoniques, nommés gravitons. Les termes du développement d'ordre supérieur correspondent à des interactions entre gravitons et — si l'on a introduit des sources quantifiées non gravitationnelles — aux interactions entre photons, électrons, etc. et gravitons. Dans ce type d'approche, l'objectif principal est le calcul des sections efficaces correspondant à ces divers processus. En dépit des efforts déployés dans cette direction pendant plusieurs dizaines d'années, ce programme de recherche n'a finalement rien donné : les équations du champ gravitationnel, avec ou sans sources matérielles, ne sont tout simplement pas renormalisables (de nouveaux paramètres doivent être introduits à chaque changement d'ordre du développement, empêchant la théorie de faire la moindre prédiction). On a tenté de contourner cette difficulté en modifiant les équations du champ de la relativité générale de façon à les rendre renormalisables. En dépit du nombre considérable de tentatives en ce

sens, dont certaines furent partiellement couronnées de succès, il n'a pas été possible de bâtir de cette façon une véritable théorie de la gravité quantique qui obéisse aux critères imposés par la théorie des champs quantiques elle-même ; c'est ainsi, par exemple, que certaines théories ainsi obtenues sont renormalisables mais non unitaires.

Espace-temps de dimension plus élevée. — Les théories de la supergravité imposent une symétrie entre bosons (particules de spin entier) et fermions (particules de spin demi-entier) : les particules doivent aller par paires. En particulier l'hypothétique graviton, de spin 2, doit être apparié avec un gravitino, encore plus hypothétique, de spin 3/2. Les théories de supersymétrie, susceptibles d'unifier toutes les interactions — électromagnétique, nucléaire faible et forte, et gravitationnelle — doivent être écrites dans un espace-temps abstrait à onze dimensions (dix d'espace et une de temps). Étant donné que l'espace-temps observable n'a que quatre dimensions, il faut que les sept autres dimensions soient cachées, par un processus de réduction de la dimension, « compactifiant » en quelque sorte les dimensions supplémentaires qui « enveloppent » les quatre dimensions observables, et de ce fait ne sont pas apparentes aux distances accessibles aux énergies dont on dispose. La version à onze dimensions de la supergravité la plus en vogue est unitaire mais non renormalisable. Pire, elle interdit les violations de parité (chiralité) des interactions faibles qui sont parmi les mieux vérifiées du point de vue expérimental. Pour palier ces difficultés, on a récemment proposé d'appliquer le concept de supersymétrie non pas à des particules (entités à une dimension), mais à des p-branes (entités à $p + 1$ dimensions) dans un espace-temps à onze dimensions ; les recherches portant sur ces théories sont actuellement en plein essor. Tout comme l'est la recherche en théorie des cordes (entités à deux dimensions dans des espace-temps à dix ou onze dimensions) qui, elle aussi, ambitionne d'être une « théorie de tout », gravitation comprise. Les particules sont supposées être des états excités de cordes quantifiées. Récemment, il a été suggéré que la théorie des cordes elle-même puisse n'être qu'une approximation à basse énergie d'une certaine « théorie M », plus compliquée, impliquant elle aussi des structures de dimension plus élevée dans un espace-temps à onze dimensions, ou plus. Les deux théories, la théorie des membranes (matricielle) et la théorie des cordes, ont en commun de présupposer un espace-temps abstrait de dimension élevée, mais plat : la courbure de l'espace-temps observable (à quatre dimensions) apparaît alors comme le résultat de son immersion dans cette structure plate. La quantification s'effectue alors en appliquant des techniques relatives à un espace-temps plat, de dimension supérieure à 4.

Quantification invariante par difféomorphisme. — Examinons maintenant les arguments des tenants de l'autre terme de l'alternative, pour qui l'invariance par

difféomorphisme de la relativité générale dans l'espace-temps à quatre dimensions est fondamentale. Le problème consiste alors à quantifier tout le champ de tenseur métrique et pas seulement ses écarts par rapport à une métrique « de fond » fixée, plate ou non. Comme la métrique détermine la chrono-géométrie, se pose la question de savoir à quoi ressemble une chrono-géométrie quantique. Il n'est pas évident, *a priori*, qu'elle se situe dans un rapport simple vis-à-vis de la chrono-géométrie usuelle. D'ailleurs, comme la métrique fixe aussi la connexion inertio-gravitationnelle, on peut se demander ce que signifie, du point de vue physique, une connexion quantique. La stratégie la plus couramment adoptée consiste à repousser la résolution de ces problèmes d'interprétation et à chercher, dans un premier temps, à obtenir un formalisme quantique de la relativité générale qui « tienne la route ». Les problèmes que pose l'établissement de ce formalisme quantique sont énormes ; on attend des solutions qui seront apportées qu'elles permettent, dans une seconde étape, de répondre aux questions que pose leur interprétation physique. La réalisation de la première étape (établir le formalisme adéquat) suscite d'entrée de jeu des divergences d'opinion. Faut-il, comme le préconisent certains physiciens, soucieux d'aboutir à une interprétation physique cohérente, appliquer la théorie à l'univers tout entier ? Une théorie quantique de la gravité ne peut qu'être une cosmologie quantique et doit donc intégrer le concept de fonction d'onde de l'univers, les conditions aux limites lors du big bang, sans parler de la question de l'absorption de l'appareil de mesure dans le système quantique, etc. D'autres physiciens soutiennent qu'une théorie de la gravitation quantique doit se fixer des objectifs plus modestes : ne traiter (comme toutes les autres applications de la mécanique quantique) que de systèmes physiques limités et se contenter d'une interprétation du formalisme dans laquelle il n'est pas nécessaire d'inclure l'appareil de mesure dans le système. Cette stratégie, appliquée à la réalisation d'un objectif limité : développer une théorie quantique non linéaire de la diffusion, a permis d'obtenir une quantification asymptotique des équations du champ gravitationnel à la limite où l'espace-temps est asymptotiquement plat, la limite où l'espace-temps est asymptotiquement plat, de courbure nulle à l'infini. Les gravitons, définis en termes des champs exacts à l'infini dans les deux directions, avant et arrière, des cônes de lumière, s'avèrent être des représentations du groupe de Bondi-Metzner-Sachs, généralisation du groupe de Poincaré, dont les représentations servent à définir les particules dans le cadre des théories du champ relativistes au sens restreint. La transition d'un état asymptotique de graviton entrant à un état asymptotique sortant peut être calculée sans supposer que l'image du graviton garde sa validité dans la zone centrale (fortement non linéaire). Pour vérifier le résultat obtenu, il suffit de placer une source et un détecteur de gravitons dans deux régions de l'espace-temps asymptotiquement de courbure nulle, là où il est encore possible d'établir une distinction claire et nette entre cinématique et dynamique. La théorie de

la quantification asymptotique est donc une sorte de solution intermédiaire, à mi-chemin entre la représentation relativiste au sens restreint de la diffusion graviton-graviton (où il est fait comme si la distinction entre cinématique et dynamique pouvait être maintenue partout) et une gravité quantique invariante par difféomorphisme (où cette distinction ne peut être maintenue nulle part). Les principales avancées dans ce dernier sens se fondent sur le formalisme canonique (hamiltonien) de la relativité générale. On introduit une fibration du genre temps (espace relatif) et un feuilletage du genre espace (temps relatif) de l'espace-temps et on analyse l'évolution du champ gravitationnel le long des fibres du feuilletage à partir des données initiales sur l'une des hypersurfaces du feuilletage. La formulation canonique de la relativité générale repose sur un principe variationnel au premier ordre (dit de Palatini), dans lequel le tenseur métrique et la connexion inertio-gravitationnelle sont les variables de base. Leurs projections sur les hypersurfaces du feuilletage sont les variables canoniques : la 3-métrique de l'hypersurface et une 3-connection sur elle. Jusqu'à présent, les composantes de la 3-métrique étaient choisies comme coordonnées canoniques (géométrie dynamique de Wheeler). Mais les progrès enregistrés dans la recherche d'une procédure de quantification de la relativité générale indépendante du « fond » ont été obtenus en choisissant comme coordonnées canoniques les composantes d'une certaine 3-connection (variables d'Ashtekar) ; cette formulation porte le nom de « loop quantum gravity ». Dans la formulation canonique, l'invariance par difféomorphisme de la théorie en dimension 4, est réduite à l'invariance par difféomorphisme en dimension 3, sur l'hypersurface initiale avec, en plus, la liberté du choix des fonctions de décalage dans le temps et dans les trois directions d'espace qu'il faut assigner à la fibration sortant de l'hypersurface. Ce qui laisse à penser que la fonction d'onde quantique gravitationnelle, en représentation géométrie dynamique, doit être une fonctionnelle de la 3-géométrie de l'hypersurface de départ et que l'espace de Hilbert correspondant doit être ce que l'on appelle le « superspace » formé par toutes les 3-géométries. La réalisation de ce programme est parsemée d'innombrables difficultés techniques, en particulier parce que les première et deuxième formes fondamentales ne peuvent pas être choisies de façon arbitraire : elles sont soumises à quatre contraintes, dont l'une est fortement non linéaire. Les problèmes d'interprétation sont encore, s'il est possible, plus monstrueux : quel sens, par exemple, donner au concept de probabilité d'une 3-géométrie ? Dans la version dite « loop quantum gravity » version de ce programme canonique, la connection est tenue pour ce qui est le plus fondamental et on a recours à une formulation tétradratique de la métrique ; les variables de base sont une certaine connection et sa triade conjuguée sur l'hypersurface initiale ; elles sont soumises à des contraintes qui sont, au pire, cubiques en fonction des variables de champ ; l'espace des phases correspondant en relativité

générale est alors un sous-espace de l'espace des phases d'un certain champ de Yang et Mills. En poursuivant cette voie, il a été possible de résoudre les contraintes et de construire une classe complète de solutions analogues aux boucles de Wilson en théorie de Yang et Mills. On obtient ainsi une autre représentation des excitations quantiques du champ de gravitation : « Les excitations fondamentales du champ quantique ne peuvent pas être localisées (localisées par rapport à quoi ?), comme le sont, par exemple, les photons. Ce sont des excitations de la scène elle-même (c'est-à-dire de l'espace-temps), et non des excitations se produisant sur une scène... On commence par définir des états quantiques qui correspondent à des excitations du champ de gravitation en forme de boucle, mais ensuite lorsqu'on factorise l'invariance par difféomorphisme, la localisation de la boucle n'a plus d'importance. Seul importe le nœud de la boucle (un nœud est une boucle dont on n'a pas défini la localisation). Les états physiques invariants par difféomorphisme sont étiquetés par des nœuds. Un nœud représente une excitation quantique de l'espace ; il n'est ni ici ni là, puisqu'il est l'espace par rapport auquel ici et là sont définis. Un état de nœud est un quantum élémentaire d'espace... L'existence de ces quanta élémentaires d'espace est rendue concrète par la quantification des spectres des grandeurs géométriques (Carlo Rovelli, « Loop Quantum Gravity », *Living Reviews* [journal électronique], p. 9). Cette représentation, tout d'abord développée dans le cadre du formalisme canonique, qui privilégie le 3-espace, a donné lieu, depuis quelque temps, à de nouveaux formalismes, tels celui des « mousses de spin », reposant sur une approche de la gravité en termes de boucles.

L'approche semi-classique. – À défaut de posséder une théorie de la gravité quantique en bonne et due forme, et dans l'espoir de glaner ici et là quelques renseignements la concernant, les physiciens se sont rabattus sur un objectif plus modeste : développer la théorie quantique des champs (sans gravitation) dans un espace-temps « en toile de fond » donné, lui-même traité de façon classique. Les versions usuelles de la théorie quantique des champs dans un espace-temps de Minkowski (relativité restreinte) font grand usage du groupe de Poincaré des symétries de cet espace-temps. L'interprétation physique de la théorie en termes de particules considérées comme des quanta du champ repose de façon cruciale sur le fait qu'on peut considérer ces particules comme correspondant aux représentations irréductibles du groupe de Poincaré. Il s'avère qu'une telle interprétation particulière n'est plus possible dans un espace-temps du type général, de courbure non nulle – ou plus exactement que la prescription n'est plus, dans ce cas, unique et invariante. « La théorie quantique des champs est une théorie des champs, et non des particules. Bien que, dans certaines circonstances, il soit possible d'en donner une interprétation en termes de particules, la notion de "particule" ne joue de rôle fondamental ni dans la formulation de la

théorie, ni dans son interprétation » (Robert Wald, *Quantum Field Theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics*, Chicago et Londres, Univ. of Chicago Press, 1994, p. 2). Cette affirmation, déjà vraie lorsque le champ de gravitation est traité de façon classique, vaut *a fortiori* pour une théorie quantique de la gravité. Parmi les « circonstances » qui rendent possible une interprétation en termes de particules, figurent les espace-temps asymptotiquement plats, où existent des représentations en termes de particules asymptotiquement entrantes et sortantes – représentations qui cependant ne sont pas unitairement équivalentes. Il est possible, dans ce cas et comme nous l'avons vu, d'accomplir un pas de plus, et de développer une quantification asymptotique du champ de gravitation, en ayant recours à une image particulière, en termes de gravitons entrants et sortants. Mais tout porte à croire que le concept de graviton « ne joue de rôle fondamental ni dans la formulation ni dans l'interprétation » d'une véritable théorie quantique de la gravité.

On pourrait penser que la théorie quantique des champs dans des espace-temps courbes s'applique aux phénomènes quantiques non gravitationnels où la gravitation joue un rôle important mais où les effets de gravitation quantique sont négligeables. L'exemple canonique à cet égard est le rayonnement dit de Hawking associé aux trous noirs. En théorie classique, un trou noir est une entité dont le champ de gravitation est si intense qu'il est capable de piéger de façon irréversible toute forme de matière et de rayonnement qui s'en approche trop. Si M est la masse d'un objet et R une longueur qui le caractérise (son « rayon »), la valeur du paramètre sans dimension GM/c^2R (c est la vitesse de la lumière dans le vide et G la constante de gravitation) détermine si cet objet peut ou non former un trou noir. De façon générale, si ce paramètre est supérieur à 1, l'effondrement gravitationnel se poursuit jusqu'à formation d'un trou noir derrière un horizon des événements (surface entourant le trou noir agissant comme une membrane semi-perméable). Il est impossible pour de la matière ou du rayonnement ayant traversé cet horizon de le traverser en sens inverse et de se libérer ; par ailleurs, la quantité de masse-énergie que peut absorber un trou noir est sans limite. Classiquement, la température d'un trou noir est celle du zéro absolu, en sorte qu'il ne peut jamais être en équilibre thermique avec un environnement à température non nulle. Cette instabilité thermique est sans équivalent classique – ce qui laisse supposer que l'analogie quantique des trous noirs devra intervenir dans la version finale de la théorie quantique de la gravité. Un traitement semi-classique des champs de rayonnement (non gravitationnels) dans un espace-temps statique classique de trou noir donne déjà des résultats radicalement différents de ceux obtenus dans le cas classique. Les espace-temps statiques autorisent une interprétation en termes de particules, que l'on peut donc appliquer à l'extérieur du trou noir une fois que cet extérieur s'est stabilisé et est devenu statique (après la formation du trou noir). Il

apparaît alors que le champ de rayonnement externe, en dehors du trou noir et en équilibre thermique avec lui, est un rayonnement de type corps noir à une température qui dépend de la grandeur appelée « gravité de surface », notée K , du trou noir : $kT = K/2\pi$, où k est la constante de Boltzmann. Pour un trou noir sans rotation, de masse M , $K = \hbar c^3/4GM$ (\hbar désignant la constante de Planck divisée par 2π). Dans l'approximation semi-classique, un trou noir se comporte donc comme un corps porté à cette température, non nulle. Un examen un peu plus approfondi montre qu'il faut attribuer au trou noir une entropie et que les lois de la thermodynamique s'appliquent aussi aux systèmes comportant des trous noirs. Ces résultats indiquent que les trous noirs – ou plutôt leur analogue quantique, quel qu'il soit – doivent jouer un rôle important en théorie quantique de la gravité.

La question se pose de savoir quand cette approche semi-classique cesse d'être valable, imposant d'avoir recours à une véritable théorie de la gravitation quantique. On ne peut guère répondre à cette question tant que cette théorie n'existe que de façon incomplète et n'a pas été testée. Cependant, sur la base d'arguments aux dimensions, on peut estimer que le traitement classique perd sa validité lorsque le rayon de courbure de l'espace-temps devient de l'ordre de grandeur de la longueur de Planck. Peu de temps après avoir introduit le quantum d'action \hbar , en 1899, Planck s'était aperçu qu'il était possible de construire un ensemble d'unités « naturelles » rien qu'en utilisant les trois constantes c , G et \hbar . La combinaison $\sqrt{\hbar G/c^3}$ a les dimensions d'une longueur et vaut numériquement 10^{-33} cm. On s'attend à ce que le concept même de champ de tenseur régulier perde toute signification à des distances de cet ordre (peut-être même avant) : à ces distances, les fluctuations du rayon de courbure devraient être du même ordre de grandeur que le rayon de courbure lui-même (en supposant qu'on puisse raisonner dans le cadre de l'approximation linéaire). De la même façon, le temps de Planck (obtenu en divisant la longueur de Planck par c), qui est de l'ordre de 10^{-44} s, fixe une échelle de temps en dessous de laquelle (c'est le cas en cosmologie du big bang) un traitement classique de la métrique n'a plus de sens ; quant à l'énergie de Planck, $\sqrt{\hbar c^5/G}$, environ 10^{19} GeV, elle fixe une limite supérieure à la valeur de l'énergie permettant de considérer que les processus physiques se produisent dans un espace-temps classique.

► GIULINI D. éd., *Quantum Gravity : From Theory to Experimental Research*, Springer Verlag, 2003. – ROVELLI C., *Quantum Gravity*, Cambridge University Press, 2004. – SMOLIN L., *Three roads to Quantum Gravity*, Londres, Basic Books, 2000. – THIEMANN T., Introduction to Modern Canonical Quantum General Relativity, <arXiv : gr-qc/0110034v1>, 5 octobre 2001.

John STACHEL (trad. F. Balibar)

→ Champ ; Complémentarité ; Constantes physiques ; Corps noir ; Espace-temps ; Gravitation ; Indiscernabilité ; Invariance

de jauge ; Irréversibilité ; Masse ; Mesure en mécanique quantique ; Planck ; Quantique ; Réel ; Relativité ; Renormalisation ; Temps ; Trou noir.

MÉCANISME → Vitalisme et mécanisme

MEINDEL Johann Gregor, 1822-1884

Botaniste autrichien né à Heizenendorf en Moravie. Il entre à vingt et un ans dans l'ordre des Augustins à Brünn (aujourd'hui Brno). Il sera, en 1862, l'un des fondateurs de la Société des naturalistes de Brünn (Naturforschender Verein). C'est devant les membres de cette société qu'il présentera, les 8 février et 8 mars 1865, les résultats de ses recherches sur les hybridations de pois qui seront publiées (en 1901) sous le titre *Versuche über pflanzen-hybriden*. Il y expose la logique de la transmission des caractères héréditaires, sujet demeuré obscur jusque-là. En restreignant l'analyse à l'examen d'un petit nombre de caractères faciles à identifier et présentant deux formes bien distinctes (aspect des pois : ridés ou lisses ; couleur : vert ou jaune ; position des fleurs : axiales ou terminales, etc.), il montre que la ségrégation des caractères dans la descendance des hybrides (plante issue du croisement de deux plantes pures du point de vue d'un caractère donné) peut être décrite à partir d'une hypothèse simple concernant chacun de ces caractères : ceux-ci seraient déterminés par des « facteurs » présents au nombre de deux dans chaque plante et transmis à la descendance indépendamment. La formulation des règles de cette transmission est connue sous le nom de Lois de Mendel depuis que les travaux de Hugo De Vries en 1901 (35 ans plus tard) en ont redémontré la validité, la Société des naturalistes de Brünn n'ayant pas, à l'époque de la présentation de ses résultats par Mendel, saisi pleinement leur portée et leur généralité.

● *Versuche über Pflanzenhybriden, zwei Abhandlungen (1865 und 1869)*, Leipzig, W. Engelmann, 1901.

► BATESON W., *Mendel's principles of heredity. A defence by W. Bateson, with a translation of Mendel's original papers on hybridization*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1902.

Pascal NOUVEL

→ De Vries ; Gène ; Génétique ; Hybride ; Lyssenkisme ; Théorie ; Vivant (Théorie du).

MERLEAU-PONTY Jacques, 1916-2002

Philosophe et historien des sciences français dont le gros apport à la philosophie des sciences est l'analyse des théories cosmologiques du XX^e s. dont il mit en vedette les développements et les significations surtout dans les transformations qu'elles peuvent apporter à la philosophie du XX^e s. On doit retenir que les théories cosmologiques qui s'affrontent sont aussi des thèses philosophiques qui s'affrontent. Une philosophie

généralisée du devenir est à naître qui prend en compte l'idée que l'Univers mais aussi la géométrie est en devenir, changeant notre conception de l'histoire. Du point de vue de la philosophie naturelle Merleau-Ponty défend l'idée que l'espace-temps est une structure mathématique qui convient, dans certaines conditions très étroitement définies, à la description de certains systèmes physiques considérés à la fois dans leur forme et dans leur évolution. De même admet-il les présomptions très fortes d'une orientation physique fondamentale de la variable temps pour en proposer des conséquences. Et il nous enseigne que « l'homme a [pourtant] quelque proportion à l'Univers par la durée des préliminaires à son apparition ». La cosmologie donne encore à l'homme des « raisons de se considérer comme un avatar cosmique peu banal, de faire valoir une certaine prétention à l'exceptionnel ».

● *Cosmologie du xx siècle*, Paris, Gallimard, 1965. – *Philosophie et théorie physique chez Eddington*, Paris, Les Belles Lettres, 1965. – *Les trois étapes de la cosmologie*, Paris, R. Laffont, 1971. – *Leçons sur la genèse des théories physiques, Galilée, Ampère, Einstein*, Paris, Vrin, 1974. – *La science de l'Univers à l'âge du positivisme*, Paris, Vrin, 1983.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Espace-temps ; Géocentrisme ; Univers.

MESURE

Nous ne voyons pas de question plus décisive que celle de la mesure, parce que celle-ci équivaut à l'essentiel de la connaissance : avec la mesure, il s'agit de quitter « une donnée » complexe, confuse, parfois même insaisissable, afin de la projeter, sans la réduire ou l'altérer, sur une grille (le grapho-numérique) qui la rend quantifiable. Au terme de l'opération, nous obtenons plus que l'équivalent de la chose : son image allégée, débarrassée de ses accidents et susceptible d'une évaluation.

Ne réduisons pas cette mesure à un simple chiffre : dans ce dernier cas, on se contente de compter – par exemple, les diverses pièces d'un être, ou encore les éléments qui défilent ou même les divers passages d'un flux quelconque, pourvu qu'il soit lui-même composé d'unités discrètes. La mesure en diffère, parce qu'elle suppose toujours un appareil, ainsi qu'une méthode, capable d'arracher « l'être mesuré » à son état fermé ou imperceptible.

Ne confondons pas davantage la mesure avec une sorte de langage quantitatif. D'une part, à la différence des mots, la mesure vise l'universel et n'est donc pas dépendante d'un vocabulaire. Les savants se sont mis d'accord et sur les unités opérationnelles et sur les procédures d'appréhension, de telle manière que les résultats accessibles à tous puissent être comparés ou discutés. D'autre part, l'image grapho-numérique en dit bien plus sur la chose que les mots de la langue : la température d'un corps sera dite éventuellement

brûlante, ou tiède ou douce. Or, ces qualificatifs entretiennent le vague, comme s'ils ne pouvaient pas dépasser le niveau phénoménal. La métrologie nous donnera un résultat plus sûr et surtout moins lié à nos propres « retentissements sensoriels » (le rapport à nous brouille l'opération, parce que, au lieu de la chose que nous souhaitons appréhender, nous lui substituons notre réaction et ajoutons par là un opérateur supplémentaire – notre organisme et ses habitudes – alors que nous voulions, avec la mesure, obtenir un résultat « objectif » – la chose même). Une telle saisie n'a pas cessé d'être contestée : elle relèverait d'un rêve ou d'une vue chimérique.

Nous rappellerons trois objections fondamentales à son encontre :

1) Selon la première, cette opération serait cernée de conventions (arbitraires) qui la relativisent et jettent un doute sur l'objectivité métrique. Ainsi dans le simple thermomètre, pourquoi le mercure (alors qu'on a utilisé, dans le passé, l'huile de lin ou l'alcool) ? Pourquoi la division en 100 de l'espace compris entre le zéro de la glace fondante et le 100 de l'eau bouillante (sous la pression de 760 millimètres) ? Pierre Duhem a insisté sur la relativité de cette échelle. Nous ne partageons pas ces remarques qui minimisent le travail métrologique. L'histoire de la thermométrie nous prouve que le mercure s'imposait, sans conteste, parce qu'il est, de tous les liquides, celui qui se dilate le plus régulièrement et parce que, en sa qualité de métal, il s'avère le meilleur conducteur de la chaleur, en exigeant le moins pour s'échauffer et se mettre en équilibre avec les corps qui l'entourent, sans négliger le fait qu'en dépit de ses incessants déplacements il ne perd rien de son élasticité. Et si on a divisé en 100 parties la distance entre les deux points extrêmes précédemment mentionnés, c'est pour paralléliser le résultat avec les autres systèmes de mensuration (le cgs ou le centimètre, le gramme, la seconde ou le centimètre/seconde pour la vitesse). Ce n'est donc pas sans raison que l'instrument de Celsius (le thermomètre centigrade) fut universellement adopté : il éclipse ceux de Newton, de Fahrenheit, de Réaumur.

2) Pierre Duhem avance contre lui une objection plus solide : « Le thermomètre ne nous donne pas la température en chaque point, mais une sorte de température moyenne relative à un certain volume, dont l'étendue ne peut pas être très exactement fixée ; nous ne saurions affirmer d'ailleurs que cette température est tel nombre, à l'exclusion de tout autre nombre » (*La théorie physique*, 2^e éd., Vrin, 1981, p. 199-200). Cette critique de l'indicateur thermique revient à soutenir qu'aucun appareil ne peut atteindre le « contact » avec le corps ni abolir la distance qui les sépare. On n'obtiendrait jamais que des résultats d'ensemble, une « moyenne » nécessairement vague ; de plus, ce qui va dans le même sens, la sensibilité du dispositif capteur ne peut pas dépasser un certain seuil, d'où l'« erreur dite relative » inévitable, la simple « approximation » et la condamnation d'un réalisme qui croit possible la coïncidence du mesurant et du mesuré. C'est oublier

que la thermométrie, comme tous les autres systèmes numérotatifs, se définit par sa constante évolution en vue de s'approcher de ce qu'elle entend saisir. Elle a évidemment renoncé à ses anciens repères (la glace fondante ou l'eau qui bout) ; elle change de méthode. La pyrométrie – électrique, puis optique – accède à des températures différenciées et de plus en plus fines (qui varient en fonction des lieux) ainsi qu'à des températures très basses ou élevées. Elle tablera, par exemple, sur les gaz, parce que le volume de ceux-ci exprime directement la température : il augmente de 1/273° de sa valeur primitive pour chaque degré (et en sens inverse le perd) à tel point qu'à – 273 degrés leur corps a perdu son volume qui se réduit à un point. On a gagné ici – en facilité et en fidélité – à transférer le calorique sur le registre spatio-volumique.

3) Autre objection, il est sans trêve souligné que l'observateur, à son insu, vient peser sur le mesuré ou que le mesurant interfère nécessairement avec le mesuré : il le modifie. Dans ces conditions, nous ne pouvons toujours pas espérer l'équivalence dont rêvait le réaliste. Il faudrait renoncer au « contact », à l'appréhension du réel. Sans évoquer les problèmes de la microphysique, il est sûr, par exemple, que si nous disposons, dans un courant, une roue légère qui tourne en fonction du fluide qui passe (afin de transmettre la rotation à un compteur-enregistreur), elle ralentit, du fait de son inertie, l'importance ou la vitesse du débit. L'instrument doit descendre dans le phénomène, mais une telle fusion du mesurant et du mesuré empêche que nous puissions atteindre l'un sans l'autre. Mais le physicien ne manquera pas d'abaisser la « résistance » de ses dispositifs de saisie : il invente des instruments de plus en plus sensibles. D'autre part, s'il ne parvient pas à l'absolu – la coïncidence ou l'équivalence entre la chose et son image quantifiée, celle qui précède le transfert et autorise la lecture – la multiplicité des méthodes ou des angles d'attaque l'aide à annuler certaines particularités liées à un type d'approche ; les différences entre les résultats obtenus s'effacent pour laisser émerger l'invariant.

Les critiques portent toujours sur la distance qui subsiste entre le mesurant et le mesuré, mais cette inadéquation qui limite la métrologie est aussi son principal aiguillon : si les dimensions et les frontières du réel reculent, au fur et à mesure que la métrologie s'affine et se subtilise, en même temps ce réel se découvre aussi de plus en plus complexe et éloigné ; nous nous heurtons à de nouvelles limites que nous franchissons tandis que d'autres aussitôt se lèvent – ce qu'a montré Gaston Bachelard, dans son ouvrage inoubliable, *L'Essai sur la connaissance approchée*. Mais, au lieu d'avancer des objections à l'encontre de la mesure, nous voyons en elle ce qui sauve les phénomènes de leur insularité ; elle ne cesse pas de renouveler sa stratégie ; nous insisterons sur trois audaces ou trois victoires.

a) Étienne Marey devait réussir à quantifier ce qui se logeait à l'intérieur de l'organisme, dans lequel nous n'entrons pas (la conquête par la mesure de

l'invisible) ; il s'emparait, par le même mouvement, avec sa méthode dite graphique, de nombreuses provinces du réel qui jusqu'alors échappaient. Le sphymographe permet déjà de capter puis d'évaluer le battent insensible de l'artère, au moment où l'ondée sanguine la frappe. Plus décisif, ses travaux l'orientent vers la manométrie pneumatique de Riva-Rocci : jadis, le biologiste sectionnait l'artère, en ligaturait un bout et introduisait dans l'autre un tube, relié à un réservoir de mercure, afin de visualiser l'élévation de celui-ci, au moment où le sang est chassé dans le vaisseau ; outre l'aspect sanglant d'une telle opération, le physiologiste arrêtait le mouvement quand il pensait le mesurer ; c'est pourquoi, on en arriva à réaliser une contrepression graduée, mais au dehors (sur le bras, entouré d'un manchon qui recevait l'air) ; on parvenait ainsi à aplatir l'artère ; ensuite, du fait d'une décompression lente, on notait le chiffre correspondant aux premières pulsations qui réapparaissaient. Retenons donc cette prouesse : le biologiste parvient ici à saisir et mesurer le réel le plus enfoui, l'inaccessible (il use de moyens obliques mais sûrs : ailleurs, on évalue les effets d'une cause cachée).

b) Une seconde innovation a consisté à greffer un système enregistreur sur un autre – un double transfert – ce qui facilitera l'appréhension du résultat. Pour en donner un exemple, nous savons que, lorsqu'un circuit fermé et situé dans un champ magnétique est parcouru par un courant électrique, il se place de telle façon que le plus de flux (magnétique) entre en lui (et même par la face sud). Dès que le courant passe dans le fil-cadre, celui-ci se dispose perpendiculairement aux lignes de force et tourne donc de 90 degrés ; on s'oppose alors, par de nombreux moyens, à ce mouvement (un fil-torsion limitera l'angle de cette déviation). L'intensité du courant est proportionnelle à l'angle de rotation du cadre ; l'instrument de mesure permet d'exprimer l'énergie électrique. Mais, méthode dite de Poggendorf, si on colle un miroir sur le cadre, lui aussi tournera et pourra donner sur une règle graduée l'image lumineuse (un spot) qui se déplace. Nous substituons « une longueur » à un « angle » ; à cet effet, nous avons opéré une seconde translation, ce qui nous vaut une lecture plus facile et plus précise.

c) Troisième succès, nous sommes persuadés que la métrologie a pu pénétrer les territoires les plus rétifs à son entrée : l'économie, les conduites humaines, les détériorations psychiatriques, la vie sociale et politique, etc. Certains penseurs – tel Bergson – privilégiaient la qualité, et avec elle, la singularité, tout ce qui se soustrait à la spatialité ou à l'extériorité ; ils dépréciaient la quantité : si la mesure ne se réduit pas à un simple exercice de quantification, elle passe souvent à travers lui et l'implique. Or, la métrologie a renversé ce prétendu obstacle : le chercheur en science dite humaine ou sociale doit d'abord inventer un système original de mesure, qui lui permettra de comprendre et de comparer ce qu'il étudie. Pour lui aussi « connaître, c'est mesurer ». Ainsi Halbwachs, pour différencier les classes sociales, a eu recours à l'examen des budgets

(scruter les dépenses de ceux qui bénéficient de revenus équivalents) : il devait montrer que l'employé – à salaire égal – réduit la part de l'alimentation afin de consacrer davantage à son logement, tandis que l'ouvrier, à l'opposé, sacrifie le second à la première ; c'est donc le rapport entre N (nourriture) et L (logement) qui sert à les séparer. À entrer dans le détail des achats, on parvient encore à de plus fins partages.

Nous aurions pu prendre des illustrations aussi bien dans l'économie que dans la psychométrie. Dans ces conditions, ne limitons pas la mesure : elle sort de l'ombre ce qui nous échappait ; elle réalise des montages qui facilitent la saisie des résultats ; enfin nous ne voyons rien qui ne bénéficierait pas de ses bienfaits (elle évite le vague ou l'« à peu près » ; elle nous donne une « image », la plus fidèle qui soit comme la plus ramassée, du réel).

► BACHELARD G., *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin, 4^e éd., 1973. – CARNAP R., *Les fondements philosophiques de la physique*, trad. Luccioni & Soulez, Paris, A. Colin, 1973. – DAUMAS M., *Les instruments scientifiques aux XVIII^e et XIX^e s.*, Paris, PUF, 1953. – DUHEM P., *La théorie physique*, Paris, Vrin, 2^e éd., 1981. – HEGEL, *La théorie de la mesure*, trad. A. Doz, Paris, PUF, 1970. – KULA W., *Les mesures et les hommes*, trad. Ritt, Paris, Maison des sciences de l'homme, 1984. – MAREY E., *La méthode graphique*, Paris, Masson, 1878.

François DAGOGNET

→ Chaleur ; Entropie.

MESURE EN MÉCANIQUE QUANTIQUE

Il existe en physique quantique un problème majeur, explicitement désigné comme tel, et non encore résolu, « le problème de la mesure ». Très schématiquement, ce problème vient de ce qu'en physique quantique (c'est-à-dire dans le domaine quantique qui peut lui-même être défini de façon rigoureuse, mais dont il suffit ici de dire qu'il coïncide plus ou moins avec le monde microscopique, celui des atomes et des particules élémentaires), l'instrument de mesure interagit avec l'objet sur lequel on veut faire une mesure, ce qui « fausse la mesure ».

Certes les expérimentateurs n'ont pas attendu le XX^e s. pour savoir que lors de toute mesure l'instrument et l'objet à mesurer interagissent l'un avec l'autre (il y a, comme l'on dit, couplage entre les deux systèmes qui échangent de l'énergie sous une forme ou sous une autre). L'exemple du thermomètre – ordinaire, à mercure pour fixer les idées – destiné à mesurer la température de l'eau contenue dans un récipient est à cet égard tout à fait classique : pour fonctionner comme thermomètre (et donc mesurer la température sans la modifier), il faut que la masse de mercure qui échange de la chaleur avec l'eau ait une capacité calorifique nettement inférieure à celle de la masse d'eau ; dans ces conditions, une même quantité de chaleur en passant de l'eau au thermomètre (ou l'inverse) ne

modifie que très faiblement la température initiale de l'eau, alors qu'elle fait varier considérablement celle du thermomètre. La température mesurée peut alors être considérée comme la température de l'eau, à très peu près, l'instrument de mesure n'ayant pratiquement pas perturbé le système (l'eau) sur lequel on effectue la mesure. À l'inverse, si la capacité calorifique du thermomètre est beaucoup plus grande que celle de l'eau, le résultat de la mesure diffère sensiblement de la température de l'eau avant la mesure : l'opération de mesure qui a modifié le système à mesurer devient illusoire, voire source d'erreurs. Toute mesure digne de ce nom repose sur l'hypothèse implicite que l'instrument de mesure est infiniment plus sensible que l'objet à mesurer.

C'est précisément ce qui n'est jamais vrai lorsque l'objet relève du domaine quantique. L'interaction de l'objet (microscopique) avec l'instrument de mesure, nécessairement macroscopique (ce peut être une aiguille sur un cadran, un signal lumineux sur un écran) et donc soumis aux lois de la physique classique, est énorme. Le concept d'action (produit d'une longueur par une quantité de mouvement) permet de préciser ce point : un objet classique possède par définition une action infiniment supérieure à celle caractéristique des objets quantiques, à savoir (c'est là un principe zéro de la théorie quantique, équivalent au principe de Heisenberg) une quantité de l'ordre du « quantum d'action » introduit par Planck, quantité très petite (10^{-34} dans des unités adaptées au monde macroscopique). On conçoit, en donnant au mot action son sens usuel non théorisé, que dans ces conditions la mesure perturbe considérablement l'objet que l'on cherche à mesurer et rend l'opération de mesure irréaliste. C'est comme si l'on envoyait un boulet de canon dans un jeu de perles avec l'espoir de connaître les positions des perles antérieurement (encore cette métaphore ne rend-elle pas correctement compte de la différence d'échelle).

De là découle tout d'abord qu'il est nécessaire de repenser la notion de phénomène, que l'on peut définir, de façon kantienne, comme ce qui est donné à l'intuition empirique. C'est ce que pense Bohr qui, pour que soit prise en compte la perturbation introduite par la mesure, propose d'inclure l'instrument de mesure (ou d'observation) dans le phénomène. Ce qui oblige à penser objet et instrument comme formant un tout indissociable dans lequel il est impossible d'étiqueter ce qui est objet et ce qui est instrument de mesure. Poussant à bout la logique de son argument, Bohr fait remarquer que « parler, comme on le fait souvent, de la perturbation d'un phénomène par l'observation [...] peut [...] porter à confusion [...] Il est certainement beaucoup plus conforme [...] de réserver le mot "phénomène" à la compréhension des effets observés sous des conditions expérimentales données » (« Le problème causal en physique atomique », Varsovie, 1939). D'ailleurs, toujours selon Bohr, la « perturbation » introduite par l'instrument de mesure peut être suffisamment importante pour que la nature même de l'objet mesuré en soit changée : ainsi un électron a des

caractéristiques ondulatoires lorsqu'il traverse un microscope électronique mais peut apparaître comme une particule, dans les « canons à électrons » par exemple. Pour Bohr seul un élargissement du concept de phénomène, où l'objet n'apparaît plus comme séparable de son extérieur mais au contraire quasiment façonné par lui, peut résoudre la question de la mesure – la classique distinction sujet/objet dût-elle en subir un bouleversement.

Une autre conséquence philosophique de cette impossibilité de mesurer un objet sans le perturber (même si l'expression porte à confusion, elle est commode) est que la notion de causalité sous sa forme classique (et d'ailleurs uniquement sous sa forme classique) doit être repensée. Le principe de causalité classique énonce que si l'on connaît l'état d'un système à un instant donné (parce qu'on a mesuré un nombre suffisant de grandeurs pour cela), il est possible de prédire l'état de ce même système à un instant quelconque. Or, dans le domaine quantique, il est impossible de déterminer l'état du système à un instant donné, puisque cette détermination suppose des mesures qui perturbent le système et ne décrivent donc pas le système lui-même, intrinsèquement. La causalité, au sens classique, n'a donc plus cours en physique quantique. Ce qui ne veut pas dire que la physique quantique soit a-causale car les lois qui gouvernent le comportement des objets quantiques, en dehors des occasions de mesure, sont rigoureusement causales : l'équation de Schrödinger, qui décrit l'évolution d'un système indépendamment de toute mesure, est une équation aux dérivées partielles où l'état d'un système à un instant donné suffit à déterminer son état à un autre instant.

Il existe donc deux types d'évolution en mécanique quantique : l'une causale, au cours de laquelle un état engendre un autre état sans rupture de continuité (l'évolution étant réglée par l'équation déterministe de Schrödinger) et une autre, brutale, aléatoire, a-causale en ce sens que l'état du système au terme de cette évolution n'est pas entièrement prédictible : on ne peut déterminer à son sujet que des probabilités. Cette deuxième évolution correspond à l'opération de mesure : la mesure d'une grandeur physique sur un système préparé dans un certain état bien déterminé ne donne pas un résultat unique, mais bien un ensemble (discret ou continu) de valeurs possibles, chacune munie d'une probabilité d'apparition (lorsqu'on répète l'opération) qui lui est propre. La mesure apparaît alors comme une projection (donnons ici à cette expression, qui est le terme technique, un sens métaphorique), projection de l'état du système avant la mesure, état supposé bien déterminé et sans équivoque possible, défini par des valeurs uniques d'un ensemble complet de grandeurs physiques, sur l'un ou l'autre d'un ensemble d'états caractéristiques de la grandeur que l'on mesure, sans qu'on puisse prédire autre chose que les probabilités correspondant à ces divers états. Pire encore : une fois la mesure effectuée, le système est, de façon sûre (probabilité égale à 1), dans l'état correspondant à la valeur observée pour la grandeur que l'on cherche à

mesurer et cet état est caractéristique de cette dernière. En sorte qu'une fois la mesure effectuée, le système n'est plus dans l'état dans lequel il était avant la mesure et, comble de malchance, on a perdu l'information dont on disposait au départ (le système avait été préparé dans un état bien déterminé).

Cette évolution a-causale n'est évidemment pas régie par une équation de type Schrödinger à dérivées partielles, c'est-à-dire linéaire. On conçoit bien que si l'on dispose de deux solutions d'une équation de ce type (munie des conditions aux limites appropriées), la somme (ou mieux toute combinaison linéaire) de ces deux solutions soit aussi une solution. À cette propriété des équations linéaires on a donné le nom de principe de superposition. Le problème de la mesure revient donc à trouver la forme de l'évolution correspondant à l'opération de mesure, évolution brutale, non linéaire, pour laquelle le principe de superposition n'est plus de mise.

Roger Penrose, stimulé par les développements de la théorie de la relativité générale ces dernières années et soucieux d'établir une connexion entre cette théorie et la théorie quantique (ces deux théories sont jusqu'à présent incompatibles), a tenté de relier le déclenchement de l'évolution brutale à une sorte de quantum d'action gravitationnelle qui constituerait un seuil au-dessous duquel le principe de superposition s'applique et au-dessus duquel il cesse d'être valide. C'est une piste possible qui, si elle conduisait à des résultats testables, aurait le mérite de résoudre deux problèmes à la fois : celui de la mesure et celui de l'incompatibilité de la théorie quantique et de la relativité générale. Mais peut-être est-ce là trop demander.

Une solution commode, mais qui se révèle impraticable, est celle dite des « variables cachées ». Dans la mécanique quantique traditionnelle, telle qu'elle est pratiquée, l'état d'un système est décrit par un vecteur d'un espace de Hilbert (structure d'espace vectoriel, évidemment liée au principe de superposition). À ce vecteur sont associées les valeurs prises par un ensemble, dit complet, d'observables (grandeurs mesurables). Certains, dont Einstein à une certaine époque et Bohm plus récemment, ont suggéré que c'est à tort qu'on emploie l'adjectif complet ; car, selon eux, le fait même qu'on doive avoir recours à des probabilités montre bien que le nombre de ces observables est insuffisant (rappelons qu'en physique classique les probabilités sont attachées à des situations où l'on manque d'informations sur ce dont on veut parler). D'où l'idée qu'il existe un certain nombre de variables (ou grandeurs physiques) cachées, par opposition à celles qui sont observables, qu'il faudrait ajouter à la description habituelle pour la compléter, la rendre vraiment complète. L'adjectif « cachées » indique que ces données nous sont inconnues (pour le moment) mais existent pourtant bel et bien. L'idée des variables cachées est, en dernière analyse, une tentative pour sauver la physique classique (où les probabilités sont jamais intrinsèques mais toujours liées à un manque d'informations) et étendre son domaine à

toutes les échelles. Pour les adeptes des théories à variables cachées, l'idée que le monde ne soit pas de même type à toutes les échelles est inadmissible. Or, s'il est une leçon qu'on doit tirer des travaux qui ont conduit à la théorie quantique, c'est précisément qu'il existe deux échelles (pourquoi seulement deux est une question qui reste pendante) : le monde macroscopique et le monde microscopique, où les grandeurs définies pour décrire le monde macroscopique perdent leur signification, et où les probabilités ne sont pas synonymes de manque d'information mais simplement l'expression de l'inadéquation des concepts de la physique classique à la description du monde quantique. Pour les tenants de la théorie des variables cachées, le problème de la mesure est un faux problème qui tombera de lui-même lorsqu'on aura réussi à mettre au jour les variables encore cachées.

Malheureusement (ou heureusement), un théorème énoncé par John S. Bell en 1987 a montré qu'aucune théorie à variables cachées ne peut redonner les prédictions de la mécanique quantique (ce qui est quand même le moins qu'on puisse en attendre). Une autre voie qui ne mène pas très loin consiste à admettre qu'il n'y a pas de projection lors de l'opération de mesure ; on obtient ainsi une théorie (Everett, de Witt) des états relatifs (ou encore des mondes multiples), où toutes les possibilités sont effectivement réalisées mais dans une série de mondes dont le nôtre n'est qu'un exemplaire. E. Wigner, gardant l'idée de projection lors de la mesure, a pour sa part poussé l'abolition de la frontière objet/sujet jusqu'à proposer que la conscience de l'observateur soit ce qui provoque la projection sur un état caractéristique de la grandeur à mesurer.

La solution qui semble avoir la préférence des physiciens aujourd'hui (mais qu'en sera-t-il dans un mois, dans un an ?) porte le nom de décohérence. Elle entend résoudre un problème lié à celui de la mesure et qui a pour origine l'interrogation suivante : comment se fait-il que le résultat d'une mesure, dans le domaine non quantique (le monde ordinaire), soit unique ? Autrement dit, compte tenu de ce que le monde ordinaire est constitué d'atomes (en très grand nombre) relevant de la théorie quantique, pourquoi n'y a-t-il pas dans ce monde-là de superposition des états (procédure linéaire, régie par l'équation déterministe de Schrödinger) ? On s'attendrait en effet à ce qu'il en soit ainsi au moins pour le système qui résulte de la combinaison de l'objet à mesurer et de l'instrument de mesure. Or si l'on suppose qu'il y a superposition aussi pour les états d'un système macroscopique (l'instrument est macroscopique), on est conduit à un paradoxe qui porte le nom de paradoxe du chat de Schrödinger (1935). Un chat est enfermé dans une boîte dont les parois sont totalement opaques ; un système pervers mécanique permet que le chat, au bout d'un temps donné, ait une chance sur deux d'être vivant et une probabilité égale d'être mort. C'est du moins ce que dira un observateur situé à l'extérieur de la boîte qui, ayant ouvert la boîte, enregistré l'état (mort ou vif) du chat et répété l'expérience un grand nombre de fois, peut assurer que les

probabilités sont bien 1/2 et 1/2. Mais pour un observateur à l'intérieur de la boîte, qui donc avec le chat constitue l'ensemble {objet + instrument de mesure}, l'état du chat, dont on suppose qu'il résulte du principe de superposition, est la combinaison de l'état « mort » et de l'état « vivant ». L'embaras provient alors de ce que la « réalité physique » n'est pas la même selon que c'est l'un ou l'autre des deux observateurs qui la décrit. Pour que le paradoxe cesse, il faudrait que le principe de superposition ne s'applique pas et que l'observateur à l'intérieur de la boîte assiste au processus brutal qui projette le chat dans un état ou dans un autre.

La théorie de la décohérence repose sur l'hypothèse qu'il n'y a pas de projection brutale d'un état sur un autre (autrement dit, elle fait l'économie de la procédure brutale dont il faut bien dire qu'on ne sait guère comment la caractériser). Seule est considérée l'évolution du système macroscopique (objet + instrument) en présence de, et en interaction avec, son environnement (ce qui revient à ne pas considérer l'ensemble {instrument + objet} comme isolé). On peut montrer, sur la base de l'équation de Schrödinger (donc sans postuler d'action non linéaire), que cette interaction conduit (de façon irréversible) à modifier les phases respectives des termes de la superposition relative à l'ensemble {instrument + objet} ; d'où le nom de décohérence ; elle désigne en somme la « résistance » qu'un état macroscopique oppose à la superposition.

L'intérêt de la décohérence est qu'elle permet de résoudre du même coup un autre problème. On sait depuis le début de la théorie quantique qu'elle a des manifestations macroscopiques (la supra-conductivité en est une ; mais le fait qu'un plancher soit résistant en est une autre, plus coutumière). Se pose alors la question de savoir dans quelles conditions apparaissent ces manifestations macroscopiques. La décohérence permet apparemment de résoudre ce problème.

En conclusion, insistons sur le fait qu'une fois de plus la tendance de la physique actuelle est à l'abandon de l'idée d'un monde séparé, somme d'individualités autonomes. L'exemple du problème de la mesure est à cet égard probant : on est passé de la considération de l'objet seul à celle de l'ensemble {instrument + objet}, pour en arriver finalement à replacer ce dernier dans son environnement. Une nouvelle *Weltanschauung*, pour ne pas dire une nouvelle philosophie, se fait jour chez les physiciens actuels. Ce que résume bien l'un de ses instigateurs, David Mermin : « J'explore la question de savoir s'il est possible de donner un sens à la description de la réalité physique que produit la mécanique quantique en supposant que ce qui est l'objet propre de la physique ce sont les corrélations et rien que les corrélations, et en dissociant le problème de comprendre quelle est la nature de la mécanique quantique de celui, plus dur, de comprendre la nature de la probabilité objective pour un système individuel. » Et Mermin place en exergue de son texte deux citations de Wittgenstein : « Il est impossible de penser un objet en dehors de la possibilité qu'il a d'établir des connections avec d'autres choses » (*Tractatus*,

2.0121), et « Si tout ce que nous appelons "être" et "non-être" consiste en l'existence ou la non-existence de connections entre éléments, cela n'a aucun sens de parler de l'être (ou du non-être) d'un élément » (*Philosophical Investigations*, 50).

► BOHR N., *Physique atomique et connaissance humaine*, rééd. augm. d'une préface et d'un glossaire rédigés par C. Chevalley, Paris, Gallimard, 1991. — EINSTEIN A., correspondance avec Schrödinger durant l'année 1935, *Œuvres choisies en français*, vol. 1, Paris, Le Seuil/CNRS, 1989. — FINE A., *The Shaky Game, Einstein, Realism and the Quantum Theory*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1986. — MERMIN D., *Notes pour une conférence prononcée au Symposium en l'honneur de E. M. Purcell*, Univ. de Harvard, 18 oct. 1987 (disponibles sur Internet, quant-ph/9801057). — PENROSE R., *The Emperor's New Mind, Concerning computer, minds and the laws of physics*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1989.

Françoise BALIBAR

→ Champ ; Complémentarité ; Constantes physiques ; Controverse Bohr-Einstein ; Corps noir ; Correspondance (Principe de) ; Déterminisme ; Élémentarité ; Indiscernabilité ; Irréversibilité ; Masse ; Matière [PHYSIQUE] ; Observable ; Probabilité [PHYSIQUE] ; Quantique ; Réel ; Renormalisation.

MÉTAMORPHISME

Neptunisme/plutonisme

On distingue classiquement quatre types de roches : sédimentaires, volcaniques, plutoniques et métamorphiques. L'origine des premières a été comprise quand Nicolas Sténon (1638-1686), précédé par le seul Léonard de Vinci, prit conscience que les strata (le terme est de lui) superposées proviennent du dépôt de sédiments successifs. Celle des roches volcaniques, quand Guettard (1715-1786) découvrit que la pierre de Volvic était issue d'un volcan éteint. Il refusa cependant d'attribuer la même origine au basalte. Et c'est Nicolas Desmarest (1725-1815) qui franchit le pas, à partir de 1763. Une lutte opposa l'école saxonne, dirigée par Werner (1749-1817), à ceux qui, avec Desmarest, refusaient l'origine sédimentaire du basalte. Les premiers furent nommés neptunistes, les seconds vulcanistes. Le combat cessa quand, autour de 1800, les élèves de Werner se convertirent au vulcanisme.

Mais un problème plus grave se posait alors. L'Écossais James Hutton (1726-1797), qui avait reconnu, en même temps que Desmarest, l'origine du basalte, tenait le granite pour le produit de la fusion des sédiments en profondeur (1794). Un adversaire nomma théorie plutoniste cette vue nouvelle. Jusque-là, en effet, pour les neptuniens comme pour les vulcanistes, le granite était un dépôt primitif, issu de la précipitation de matières en solution/suspension dans un océan universel chaotique. Le plutonisme s'oppose aux deux théories précédentes, en généralisant au granite le mode d'intrusion que les vulcanistes réservaient aux laves.

Les idées plutonistes furent reprises par Léopold de

Buch (1774-1853), élève de Werner, déjà converti au vulcanisme, qui franchit en 1823 une nouvelle étape, en expliquant le soulèvement des montagnes par l'intrusion de « porphyre pyroxénique ». L'existence d'une chaleur centrale, attestée par l'élévation de température quand on descend en profondeur (Cordier [1777-1861], 1827), offre un agent susceptible de produire la fusion des roches en profondeur. La thèse de Hutton se trouve complétée en son point faible : son incapacité à rendre compte de l'origine de la chaleur souterraine. Mais en même temps, elle modifie grandement la théorie. Pour Hutton, les feux souterrains (qu'il attribuait à la combustion de houille) fondaient les dépôts. En sorte que les roches plutoniques avaient un foyer permanent ou renouvelé. Selon ses successeurs, l'intérieur du globe est maintenu à l'état igné par une chaleur résiduelle, servant de source aux granites. Joseph Fournet (1801-1869), en 1838, puis Joseph Durocher (1817-1860) utilisent le mot magma pour désigner l'état dans lequel se trouve le granite avant cristallisation. Le matériau cyclique affecté se réduit aux roches sédimentaires qui se transforment, à l'état solide, au contact des montées intrusives. De Buch pensait déjà que les dolomies provenaient de la transformation de calcaires au contact du porphyre. Ainsi naissent l'idée et le mot de métamorphisme pour désigner ces modifications physiques et chimiques.

Le terme et la notion

Charles Lyell (1797-1875) utilise le terme de roches métamorphiques pour désigner les « roches altérées stratifiées », gneiss, micaschistes, etc. (*Principles of Geology*, III, 1833, p. 375). Il nomme plutoniques les roches « altérées non stratifiées », granite, etc., et regroupe les deux sous le vocable de roches hypogènes. En France, Ami Boué (1794-1881) qui qualifiait, dès 1823, de métamorphose le durcissement d'une argile au voisinage d'une couche de houille, parle à son tour de « roches stratifiées primaires, appelées métamorphiques » (*Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5, 1834, p. 176). Le même avait déjà créé le terme de schistes cristallins.

L'origine, les limites et l'âge des roches métamorphiques, et avec elles celles des roches plutoniques, vont être jusqu'à nos jours la source de disputes et interrogations qui se refléteront dans le vocabulaire. Quand Elie de Beaumont (1798-1874) distingue métamorphisme normal et métamorphisme anormal, il prolonge une vision de l'histoire de la terre qui remonte aux neptunistes. Le métamorphisme normal date des premiers âges de la terre, quand elle est encore chaude en surface par « influence du noyau incandescent » sur les dépôts primitifs qui forment des « couches cristallines ». Au contraire le métamorphisme anormal résulte de changements de température au contact des masses ignées montées lors de périodes d'agitation et de soulèvement brusque (d'après Frapollin, *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (2), 4, 1846, p. 615 et 626). Hutton avait conçu son plutonisme par opposition à cette idée

d'évolution de la terre. Lyell, son disciple, conçoit le métamorphisme comme un phénomène de tous les temps, ni plus ni moins intense aujourd'hui qu'hier.

Autre question : les limites du métamorphisme. Si le granite est intrusif et s'il provient du matériau qui était resté à l'état fondu depuis la formation de la terre (matériau juvénile par opposition au matériau cyclique des roches sédimentaires et métamorphiques), il est la cause du métamorphisme. Dans ce cas, les roches plutoniques sont apparentées aux roches volcaniques, elles aussi juvéniles et intrusives. C.F. Naumann (1797-1873) réunit les deux sous la dénomination de roches éruptives (*Lehrbuch der Geognosie*, 1849). Le terme est malheureux puisqu'il laisse entendre un aspect commun « éruptif », qui ne s'applique pas aux roches plutoniques. La France l'adopte cependant. En 1879, F. Fouqué (1828-1904) et A. Michel-Lévy (1844-1911) publient leur *Minéralogie micrographique - Roches éruptives françaises*, qui classe en parallèle les deux groupes de roches. Les auteurs anglo-américains préféreront l'expression de roches ignées, par lesquelles Kirwan, principal adversaire de Hutton, désignait (1796) les roches volcaniques.

Toutefois, certains auteurs, sensibles à des observations de terrain et de structure, penchent pour une formation métamorphique du granite. Virlet d'Aoust (1800-1894), au retour (1833) de l'expédition de Morée, note l'intrication granite-gneiss. Il parle de « granites métamorphiques » résultats d'une sur-modification du gneiss, et crée le terme de « granitification » pour désigner ce qui sera la granitisation des auteurs de ce siècle. Th. Scheerer, d'Oslo (1842), reprend une observation faite dès les années 1820 : le quartz du granite moule les autres minéraux, comme s'il avait cristallisé le dernier, alors qu'il est le moins fusible, et qu'il aurait dû se solidifier avant les autres. Contre Fournet et Durocher, défenseurs du magmatisme, se forme une école transformiste, qui estime que le granite n'a pu passer par un état fondu, et qu'il est le terme ultime du métamorphisme. En France, son principal défenseur est Achille Delesse (1817-1881), qui réserve le terme de roches éruptives aux seules roches volcaniques, elles-mêmes divisées en ignées (trachyte), quand le refroidissement se fait à sec, et pseudoignées (basaltes), quand l'eau intervient. Le granite est une roche plutonique, sa plasticité est purement aqueuse : pâte ramollie par l'eau. En sorte qu'il est l'effet et non la cause du métamorphisme. Il s'identifie au produit du métamorphisme normal que Delesse préfère nommer métamorphisme général.

Autre auteur faisant jouer un rôle important à l'eau : Auguste Daubrée (1814-1896). Expérimentateur de talent, il produit des minéraux en élevant température et pression. Il constate que la silice cristallise à une température très inférieure à sa température de fusion, et reproduit la schistosité en soumettant des argiles à de fortes pressions. Il nomme métamorphisme régional (moins vague, dit-il, que le métamorphisme général de Delesse), le métamorphisme à grande échelle, et métamorphisme de juxtaposition celui qui se limite aux

intrusions ou batholites de granite (que Delesse nommait spécial). Plus tard (1878), il analyse les effets de « la chaleur qui a pu se développer par les actions mécaniques à l'intérieur des roches, particulièrement dans les argiles ». Il en conclut que le plissement qui engendre pression et chaleur peut produire le métamorphisme, dans des régions comme les Alpes où l'on cherche en vain les batholites de granite responsables du métamorphisme. Dans le prolongement de cette vue l'école allemande fondera la notion de dynamométamorphisme (Rosenbusch, 1889).

Ces travaux, comme on vient de voir, mettent en avant, sinon en concurrence, divers facteurs. La pression est nécessaire pour produire la schistosité. Elle explique aussi les recristallisations par la chaleur des frottements pour les partisans du dynamométamorphisme. On a vu que l'eau jouait son rôle, souvent aux dépens de la chaleur, qu'on avait longtemps tenue pour cause unique. Cette chaleur elle-même n'était attestée que dans le cas des montées plutoniques. La distinction de deux métamorphismes résultait de ce que celles-ci manquaient dans des régions où le métamorphisme prenait un développement important. Y avait-il lieu de faire cette séparation ? Rosenbusch (1836-1914) qui avait étudié l'aureole du granite d'Andlau (1877), y avait décrit des cornéennes, mais avait remarqué que le « feldspath manque totalement dans les produits du métamorphisme de contact ». Dix ans plus tard, Auguste Michel-Lévy, au contraire, trouve du feldspath à Flamanville, et affirme qu'il n'y a pas lieu de distinguer deux types de métamorphisme. Ce sera l'attitude générale en France. En 1907, Émile Haug (1861-1927), dans son *Traité de Géologie*, figure les deux métamorphismes comme deux conséquences d'un même phénomène : l'enfouissement des dépôts dans de profondes fosses, les géosynclinaux.

La notion de géosynclinal est associée, jusque dans les années 1940, à celle de métamorphisme. L'idée de sédimentation dans des sillons remonte au XIX^e s. On la trouve chez les géologues américains essentiellement. James Dana (1813-1895), auteur d'un *Manuel de Géologie* (1862) qui eut un succès durable, s'en fit le défenseur. Émile Haug l'acclimata en France en 1900. Elle expliquait la grande épaisseur des séries sédimentaires des futures montagnes comparée à celle des « aires continentales ». Et donc aussi son métamorphisme, supposé dû à l'enfouissement, donc contemporaine du dépôt.

Études modernes

Pour aller plus loin, notamment dans l'étude du métamorphisme régional, il fallait analyser les séries métamorphiques. Grubenmann (1850-1924), de Zurich, divisa les roches métamorphiques en trois zones selon la profondeur, nommées épi, méso et catazone (1904). Mais ses études poursuivies avec son élève Paul Niggli (1888-1953) reposaient sur des impressions générales trop imprécises. Elles devaient être complétées par des observations de terrain. Barrow (1853-1932), dans les

Highlands d'Écosse, V.M. Goldschmidt (1888-1947), en Norvège, firent pour le métamorphisme général ce que Rosenbusch avait fait pour le métamorphisme de contact. Le second introduisit dans ses études des notions de thermodynamique chimique qui firent faire un bond à la géologie du métamorphisme. Malheureusement, ses travaux souffrirent de deux handicaps. Goldschmidt, né à Zurich, s'était installé à Oslo, et ses travaux étaient peu connus, notamment en France. De plus, peu de gens comprenaient l'intérêt d'interpréter les séries métamorphiques en termes d'équilibres chimiques. Il en alla de même pour le Finlandais Pentti Eskola (1883-1964), devenu géologue après des études de chimie, et qui conçut dès 1914 le concept de faciès métamorphique. Mais comme le premier article qui présentait la notion parut, en 1929, en langue finnoise, on comprend que les idées nouvelles demeurèrent à peu près inconnues jusqu'aux années 1950.

Le rapport avec le granite demeurait problématique. En 1908, J.-J. Sederholm (1863-1934) décrit des roches présentant une structure hétérogène : tout se passe comme si du granite s'était injecté en veines dans une trame métamorphique préexistante. L'auteur nomme migmatites (migma : mélange) ces roches hybrides, et anatexie la fusion du granite. Eugène Wegmann (1896-1982) évoque un processus de migmatisation, qui progresserait selon un « front » (1935). Jean Jung (1896-1977) et Maurice Roques (1912-1997) créent le terme d'ectinites pour désigner la partie située au-dessus du front, qu'ils divisent en zones de métamorphisme croissant : micaschistes supérieurs et inférieurs, puis gneiss supérieurs et inférieurs (plus tard gneiss ultra-inférieurs). Leur zonéographie sera enseignée longtemps en France, quoiqu'elle rencontrât vite des objections. Notamment, la présence de gneiss au milieu des micaschistes réputés moins transformés ne s'expliquait pas. On dut créer des « migmatites stratoides » pour rendre compte de la mise en place de ce qu'on sait être aujourd'hui des orthogneiss issus du métamorphisme de granites.

L'anatexie permet d'expliquer l'origine de massifs granitiques profonds, à contours diffus, et qui semblent provenir de la fusion d'un matériau préexistant. Le granite serait donc d'origine cyclique, selon le schéma transformiste de l'école française du siècle dernier. L'observation d'enclaves de roches sédimentaires dans des batholites (travaux célèbres d'Alfred Lacroix, 1863-1948, dans les Pyrénées, 1898) suggère que le granite a pris la place de roches antérieures, sinon qu'il dérive de la transformation *in situ* de celles-ci. Elle débouche sur la théorie de la granitisation, version moderne de la granitification de Virlet. H. Read (1888-1970), de Londres, qui s'en fit le principal défenseur la définit comme un processus par lequel des roches solides sont converties en roches de caractère granitique sans passer par un stade magmatique. On peut même en élargissant y inclure toute action par laquelle une roche solide est rendue plus semblable au granite qu'elle ne l'était antérieurement.

À l'opposé, la conception magmatiste est défendue

par Niggli, et surtout par Norman Bowen (1887-1956), de Washington. Elle a contre elle les évaluations des proportions respectives du granite parmi les roches plutoniques et du basalte parmi les laves, qui suggèrent l'existence de deux magmas différents. Comment croire qu'un magma basique puisse donner du granite par simple différenciation ? Il faudra les années 1950 pour que Bowen, aidé de O. Tuttle à partir de 1947, triomphe. Leurs expériences sur les feldspaths alcalins puis sur le système quartz-feldspaths alcalins-eau montrent que le minimum thermique du diagramme quartz-orthose-albite correspond à la composition des granites alcalins leucocrates, ce qui ne peut être une coïncidence. Une nouvelle ère commence qui échappe à l'historien.

► GOHAU G., « Évolution des idées sur le métamorphisme et l'origine des granites », in BONIN B., DUBOIS R. & GOHAU G., *Le métamorphisme et la formation des granites*, Paris, Nathan, 1997, p. 9-58. — MIYASHIRO A., *Metamorphism and Metamorphic Belts*, Londres, Allen & Unwin, 1973. — READ H., *The Granite Controversy*, Londres, T. Murby, 1957. — TUTTLE O., « The Origin of Granite », *Scientific American*, 92, n° 4, 1955, p. 77-82.

Gabriel GOHAU

→ Lyell ; Stratigraphie ; Terre.

METCHNIKOFF IIIia IIIitch, 1845-1916

Microbiologiste russe, né à Kharkov (Ukraine). Il reçut le prix Nobel de physiologie et de médecine (avec Paul Ehrlich) notamment pour ses travaux concernant un phénomène immunologique connu sous le nom de phagocytose : propriété des cellules sanguines nommées leucocytes (globules blancs) d'ingurgiter et de détruire des corps étrangers tels que des bactéries. Il travaille en 1886 et 1887 à l'Institut Pasteur d'Odessa, puis à celui de Paris où Louis Pasteur l'a invité à venir en mettant à sa disposition un laboratoire. Il dirigera l'Institut Pasteur de 1895 à 1916.

● *L'immunité dans les maladies infectieuses*, Patis, Masson, 1908. — *Leçon sur la pathologie comparée de l'inflammation*, Paris, Masson, 1882.

► LÉPINE P., *Metchnikoff : présentation par Pierre Lépine, choix de textes*, Paris, Seghers, 1966. — METCHNIKOFF O., *Vie d'Élie Metchnikoff (1845-1916)*, Paris, Hachette, 1920.

Pascal NOUVEL

→ Immunologie ; Micro-organisme ; Régulation moléculaire.

MÉTHODE

Peu d'ouvrages de référence, même spécialisés, comptent une entrée « Méthode ». Lorsqu'il y en a une, elle est souvent ridiculement courte. Cela est sans doute imputable au fait qu'il n'y a pas de méthode scientifique, du moins considérée abstraitement comme un

ensemble de règles fixes et universelles régissant l'ensemble de l'activité scientifique. C'est pourquoi aussi, suivant en cela Hans Reichenbach, l'interrogation philosophique sur la méthode se limite aujourd'hui à des questions concernant soit la nature de la coupure entre le contexte de découverte et le contexte de justification, soit au contexte de justification. Il semble en effet acquis qu'on ne peut rien dire du contexte de la découverte. Comme le dit Reichenbach : « Il n'existe pas de règles logiques en termes desquelles une "machine à découvertes" pourrait être construite, qui se charge de la fonction créative du génie » (*The Rise of Scientific Discovery*, 1951, p. 231). Seul le contexte de justification peut faire l'objet de la réflexion méthodologique. En ce sens, la méthode concerne l'analyse de la relation entre une théorie donnée et l'ensemble des faits qu'elle prétend expliquer ; elle concerne la justification ou la corroboration des théories par les faits. Mais pas plus qu'il n'y a d'algorithme de la découverte, il n'y a d'algorithme de la justification. Parce que si l'on soupçonne depuis longtemps que la méthode scientifique est inductive, on sait aussi depuis longtemps que l'induction n'est pas logiquement valide. « Je pense, écrivait déjà Sextus Empiricus, que le mode de l'induction est facile à réfuter. Car lorsque l'on se propose de rendre digne de crédit la proposition universelle à partir de propositions particulières, on recourt soit à une énumération complète, soit à une énumération incomplète. Or si l'énumération est incomplète, l'induction n'est pas établie : il est possible que quelques cas particuliers non énumérés viennent contredire la règle universelle. Si elle est complète, alors la tâche est impossible, les cas particuliers étant à la fois infinis en nombre et indéfinis. Aussi dans les deux cas l'induction se trouve-t-elle à mon avis renversée » (Sextus Empiricus, *Hypothèses*, II, 204).

L'histoire de la méthode dans les sciences empiriques est l'histoire du puissant effort déployé par les philosophes pour expliquer comment, en dépit de sa nature intrinsèquement problématique, l'inférence inductive pourrait atteindre à des conclusions qui, à défaut d'être d'une absolue certitude, soient au moins d'une certitude « morale » suffisante pour expliquer la fiabilité de la connaissance scientifique. En effet, l'effort doit être consenti parce que si la science est inductive et que l'induction n'est pas valide, il devient impérieux d'expliquer comment nous parvenons à connaître quelque chose du monde, si tant est que connaître c'est avoir une croyance vraie justifiée. À défaut d'une telle explication, seul le scepticisme le plus radical qui soit apparaîtra raisonnable. Comment pourrions-nous dire que nous savons que tous les corbeaux sont noirs, ou que l'accélération d'un corps en chute libre est de 9,8 m/s², si nous ne pouvons expliquer comment il peut se faire que nous le savons ?

Bien qu'il n'existe à ce jour aucune réponse satisfaisante à cette question, il est fort instructif d'examiner l'histoire de la méthode. Elle est riche en enseignement non seulement concernant notre manière de concevoir le monde et de l'investiguer, mais elle est aussi source

d'informations sur nous-mêmes à titre d'agent rationnel, et sur ce que nous considérons qui sont la connaissance, la vérité et la certitude.

La connaissance causale certaine : la structure déductive chez Aristote

C'est dans l'*Organon* d'Aristote qu'on trouve les premiers travaux systématiques concernant non seulement la logique, mais aussi la théorie de la connaissance et la méthode scientifique. « Nous estimons posséder la science d'une chose d'une manière absolue [...] quand nous croyons que nous connaissons la cause par laquelle la chose est, que nous savons que cette cause est celle de la chose, et qu'en outre il n'est pas possible que la chose soit autre qu'elle n'est » (*Seconds Anal.* I, 2, 71b, 9-11). Selon Aristote, une théorie scientifique ne peut être que démonstrative et elle doit en conséquence avoir une structure déductive. Dans *Les Seconds Analytiques*, il affirme que le syllogisme est l'instrument privilégié du raisonnement scientifique. Selon le Stagirite, la démonstration par syllogisme est même le but de la science puisque seul ce type de raisonnement permet de découvrir la cause des choses ; or il n'est de connaissance que causale. Ainsi Aristote peut-il écrire : « Admettons [...] que perdre ses feuilles soit représenté par *A*, avoir de larges feuilles par *B*, et vigne par *Γ*. Si *A* appartient à *B* (car toute plante à feuilles larges perd ses feuilles), et si *B* appartient à *Γ* (car toute vigne est une plante à feuilles larges), alors *A* appartient à *Γ*, autrement dit toute vigne perd ses feuilles, et c'est le moyen terme *B* qui est cause » (*Seconds Analytiques* 98b, I, 6-10). Ainsi, nous savons « que la vigne perd ses feuilles, parce qu'elle est une plante à larges feuilles ». Et ce savoir est scientifique parce qu'il satisfait aux trois critères d'être causal, d'avoir été obtenu par raisonnement déductif et d'être nécessaire. Ainsi la méthode scientifique est-elle déductive, mais ce n'est pas toute connaissance empirique qui est obtenue par inférence déductive. Aristote assigne un rôle à la sensation et à l'expérience : la sensation donne accès à la substance première et aux substances secondes en engendrant la mémoire qui à son tour synthétise l'expérience. Cette synthèse donne accès à la connaissance puisque l'induction qu'elle présume permet la saisie de l'universel. Il n'en demeure cependant pas moins que la connaissance *stricto sensu* ne peut être atteinte qu'après que ce processus a cédé le pas à l'inférence déductive qui permet la saisie de la cause et qui, ce qui est crucial, peut seule garantir la nécessité et la certitude.

La connaissance par l'expérience : Galilée

Il faudra attendre le XVII^e s. pour que l'expérience commence à acquérir plus d'importance dans les sciences empiriques. Jusque-là, cette dernière apparaissait généralement à peu près inutile : ou bien l'expérience donne les résultats banals prévisibles par le sens commun et elle est ainsi superflue, ou bien l'expérience

donne des résultats extraordinaires et elle est alors suspecte. Galilée sera le premier à accorder à l'expérience l'importance qui lui revient. Ce faisant, il se donnait les outils nécessaires pour faire accepter la révolution copernicienne qui renversait l'ordre établi dans la cosmologie ptolémaïque et modifiait en profondeur la physique aristotélicienne. Mais il dut témoigner d'un grand génie : les hypothèses pour nous bizarres qu'il renversait étaient bien établies et naturelles pour les gens de l'époque, celles simples pour nous aujourd'hui, qu'il substituait aux anciennes, étaient pour ses contemporains suspectes et invraisemblables.

La finesse de l'esprit de Galilée apparaît dans ses études sur le mouvement uniformément accéléré, il y fait usage autant des expériences de pensée que des expériences pratiques. En effet, afin de marier le raisonnement *a priori* (principalement d'ordre mathématique) au raisonnement expérimental, il conçut un ensemble d'expériences de pensée qui lui permirent de faire le lien entre les expériences qui l'avaient lui-même mené à une nouvelle science du mouvement, et l'expérience commune à laquelle il savait pouvoir en appeler afin de forcer l'adhésion à sa nouvelle interprétation de l'expérience. Galilée sut littéralement faire triompher une interprétation si nouvelle de phénomènes connus qu'on saurait parler ici (peut-être ici seulement) de révolution scientifique. Sa contribution à la méthode scientifique fut principalement de conjuguer le raisonnement à l'expérience afin d'atteindre à une connaissance du monde qui dérive de l'expérience mais qui n'en possède pas moins la certitude que confère la découverte de lois naturelles.

La révolution baconienne : *Novum Organum*

Mais la richesse du XVI^e ne s'épuise pas dans l'étude de Galilée. Francis Bacon contribuera de manière non négligeable à la méthode dans un ouvrage dont le titre révèle non seulement les prétentions, mais indique aussi combien la rupture avec Aristote (et Descartes) est définitivement consommée. C'est dans son *Nouvel Organon* que la science est présentée comme essentiellement inductive et que l'induction est présentée comme méthode scientifique par excellence. Selon Bacon, les buts de la science sont au nombre de deux : (I) parvenir à des généralisations inductives ; et (II), plus fondamentalement, découvrir les causes de ces régularités. Comme Aristote, Bacon croyait que le contenu d'une loi scientifique devait être une conjonction de conditions nécessaires et suffisantes pour expliquer un phénomène observable. Selon lui, les lois sont découvertes par l'application du raisonnement approprié à des observations de cas particuliers. L'exemple privilégié par Bacon est celui de la chaleur. Pour découvrir la cause de la chaleur, dit-il, il faut observer un ensemble d'objets chauds et un ensemble d'objets froids, et de ces instances la Raison doit tirer la conclusion qui s'impose quant à la cause générale de la chaleur. Les questions pertinentes relativement à la méthode scientifique portent sur le choix des observations, et le raisonnement

qui, partant des observations, peut nous mener à une conclusion quant aux causes.

La réponse de Bacon est claire mais elle n'est pas d'une grande précision. Pour découvrir les causes de phénomènes tels que la chaleur, la lumière ou la gravité il faut faire la collecte de trois types différents d'instances (Bacon les imaginait sous forme de tableaux ou de listes). Des instances positives qui doivent être nombreuses et de plusieurs variétés différentes ; des instances négatives qui doivent être qualitativement aussi proches que possible des instances positives mais sans qu'elles instantient le phénomène à expliquer ; enfin, il faut dresser une liste de degrés. La liste des degrés est comme la liste des instances positives, mais elle doit être ordonnée par ordre d'intensité de la manifestation de l'effet.

Une liste de degrés de chaleur, par exemple, est composée d'instances positives ordonnées selon que la chaleur est plus ou moins apparente : l'ordre est croissant et va du moins apparent et moins intense au plus apparent et plus intense.

Bacon offre en exemple de longues listes qui comprennent, notamment, au nombre des instances positives de chaleur : (I) les rayons du soleil, tout spécialement l'été, à midi ; (II) les éclairs brûlants, les éruptions de flammes des cavités des montagnes ; (III) toutes les flammes ; (IV) les solides enflammés, etc. Les instances négatives sont, par exemple : (I) les rayons de la lune, des étoiles et des comètes ; (II) les rayons du soleil dans les régions polaires ; (III) les écaillés de poissons et les corps de vers fluorescents qui émettent de la lumière mais pas de chaleur, etc. Enfin, l'échelle de degrés de chaleur compte des entrées telles que : (I) les substances inanimées de tous les jours tels les pierres et les métaux ; (II) les substances qui auparavant étaient chaudes, comme, par exemple, le crottin de cheval ou les chandres d'un feu ; (III) la chaleur des animaux augmentée par le mouvement et l'exercice, le vin, la bonne chère, le sexe, la fièvre et les douceurs, etc. On le voit, Bacon présupposait que le chercheur disposait de listes et présupposait ainsi qu'il connaissait les propriétés de chaque instance. Ses propres listes comportent même parfois des commentaires qui mettent en évidence les propriétés qu'il considère importantes. De ces listes, Bacon croyait qu'on pouvait ensuite découvrir la cause du phénomène sous observation en trouvant une conjonction de propriétés telle : (I) que chaque propriété de la conjonction serait une propriété de toutes les instances positives ; (II) que dans toutes les instances négatives, au moins une quelconque propriété de la conjonction serait absente ; et (III) que la combinaison des propriétés augmente en intensité au fur et à mesure que le phénomène augmentait en intensité ; d'où le besoin d'une liste de degrés.

Bacon n'a pas donné d'explication de la façon de mesurer l'intensité d'une conjonction de propriétés distinctes, une explication qui n'eût pu être qu'étonnante : il n'a pas non plus expliqué comment une combinaison de l'espèce appropriée pouvait être découverte. Mais dans le cas de la chaleur, il parvint à la conclusion

que la cause de la chaleur est « le mouvement chaotique des toutes petites parties d'une chose ». Une conclusion étonnante proche de la vérité, mais qui ne découle pas tout naturellement d'hypothèses qu'on peut faire à observer les trois listes nécessaires à la déduction.

La contribution fondamentale de Bacon est d'avoir définitivement intégré l'expérience au processus de découverte scientifique en faisant même de l'induction le critère qui permette de distinguer la science des autres entreprises cognitives humaines.

Hume et la critique de la causalité

La critique que David Hume fera de la causalité relancera le problème de l'induction et influencera tout le cours du développement ultérieur de la réflexion sur la méthode. Si la connaissance dérive toute de l'expérience, alors jamais elle ne pourra atteindre à la certitude qui caractérise ce qu'il appelle les « relations d'idées », ces vérités logico-mathématiques qui ne peuvent être pensées autrement qu'elles sont sans contradiction. Hume fera en effet remarquer qu'en ce qui concerne les « matières de faits », ces autres objets de la raison, aucune procédure n'est mathématiquement possible qui, dans tous les mondes (ou dans toutes les circonstances) logiquement possibles, pourra décider correctement de la fausseté ou de la vérité d'une hypothèse universelle à partir d'un ensemble fini d'échantillons de faits singuliers. On peut reconstruire l'argument de la manière suivante (Glymour, 1992, p. 179) : Supposons qu'il y ait une procédure qui permette de décider correctement de la vérité ou de la fausseté d'une hypothèse universelle H dans tous les mondes logiquement possibles. Alors dans n'importe quel monde logiquement possible W_1 dans lequel H est vraie, il doit exister un ensemble fini de cas favorables C réalisés à W_1 tel que, étant donné C , la procédure permet de décider que H est vraie. Mais pour n'importe quel ensemble fini de cas favorables C compatibles avec l'hypothèse universelle H , il existe, parallèlement au monde logiquement possible W_1 dans lequel C et H sont vrais, un autre monde logiquement possible W_2 dans lequel C est vrai et H est fausse. De sorte que la procédure donnera le mauvais résultat relativement à C dans W_2 . Donc aucune procédure fiable de l'espèce désirée n'est logiquement possible.

Une vérité aussi triviale que profonde : puisque la portée de la conclusion d'une inférence inductive dépasse celle des prémisses, l'inférence n'est pas logiquement valide.

Les méthodes inductives de J.S. Mill

Un ouvrage au titre trompeur, *A System of Logic*, qui annonce plus un ouvrage de logique formelle qu'un traité de la méthode empirique, sera en partie consacré par J.S. Mill à la défense et à l'illustration des méthodes inductives. Conscient que la fiabilité des conclusions obtenues par inférences inductives dépend

de la méthode impliquée dans le processus inférentiel, Mill verra à analyser l'induction de manière à dégager des règles semi-formelles susceptibles de garantir l'efficacité du processus. Son travail le mène à identifier ce qu'il appelle, au chapitre VIII du livre III, « Cinq canons de l'enquête empirique » : 1) La méthode de concordance selon laquelle « [s]i deux cas ou plus du phénomène, objet de la recherche, ont seulement une circonstance en commun, la circonstance dans laquelle seule tous les cas concordent est la cause (ou l'effet) du phénomène. » 2) La méthode de différence : « [s]i un cas dans lequel un phénomène se présente et un cas où il ne se présente pas ont toutes leurs circonstances communes, hors une seule, celle-ci se présentant seulement dans le premier cas, la circonstance par laquelle seule les deux cas diffèrent est l'effet, ou la cause, ou partie indispensable de la cause, du phénomène. » 3) La méthode unie de concordance et de différence : « [s]i deux cas ou plus dans lesquels le phénomène a lieu ont une seule circonstance commune, tandis que deux cas ou plus dans lesquels il n'a pas lieu n'ont rien de commun que l'absence de cette circonstance ; la circonstance par laquelle seule les deux groupes de cas diffèrent est l'effet, ou la cause, ou une partie nécessaire de la cause, du phénomène. » 4) La méthode des résidus : « [r]etranchez d'un phénomène la partie qu'on sait, par des inductions antérieures, être l'effet de certains antécédents, et le résidu du phénomène est l'effet des antécédents restants. » 5) La méthode des variations concomitantes : « [u]n phénomène qui varie d'une certaine manière toutes les fois qu'un autre phénomène varie de la même manière, est ou une cause, ou un effet de ce phénomène, ou y est lié par quelque fait de causation. » Cette méthode prend le relais lorsque les méthodes de concordance et de différence ne peuvent suffire à la tâche parce qu'un facteur ne peut être neutralisé (soit par exclusion, soit par isolation).

La rigoureuse application de ces principes, nous assure-t-on, peut nous prémunir contre les erreurs élémentaires de raisonnement inductif et permet ainsi d'atteindre à une relative certitude quant à la vérité des conclusions obtenues par généralisation inductive. Mais la certitude atteinte demeure en deçà de la certitude absolue qu'Aristote revendiquait comme caractéristique de la science : la certitude ne peut être qu'une certitude « morale ». Mill est conscient que pour que le raisonnement inductif soit concluant, il faut qu'une condition supplémentaire soit satisfaite : il faut que la nature soit uniforme. Aussi franchira-t-il le pas en posant un principe de l'uniformité de la nature, « axiome général de l'induction » qui s'énonce à peu près comme suit : « Ce qui arrive une fois, les circonstances restant à peu près les mêmes, se produira de nouveau, non seulement une fois mais aussi souvent que les mêmes circonstances se produiront. »

Il est inutile d'insister sur le fait que le principe de l'uniformité de la nature ne peut avoir été obtenu que par raisonnement inductif, ainsi le problème de l'induction demeure-t-il entier.

Là ne s'arrêtent cependant pas les tentatives de

justifier l'induction. La plus importante avancée dans les diverses démarches entreprises en ce sens est le développement de l'approche probabiliste. Axiomatisée pour la première fois en 1933 par A.N. Kolmogorov, la théorie des probabilités a rapidement été interprétée par plusieurs comme une logique de l'induction. Si les faits ne peuvent corroborer les théories, au moins peuvent-ils leur apporter un certain support inductif. L'idée étant que la probabilité qu'une hypothèse h soit vraie, croît avec le nombre d'expériences e la corroborant dans un contexte de connaissance b ; ce qui s'écrit $p(h|eb) > p(h|b)$ (Popper, 1990, p. 414). L'induction probabiliste devient alors possible si l'on adopte une règle d'induction adéquate. Reichenbach a défendu une règle pragmatique et simple selon laquelle on doit toujours postuler que la limite de la fréquence relative d'événements A dans une séquence d'événements B n'est autre que la fréquence relative observée jusqu'à maintenant. Il est facile d'expliquer pourquoi cette règle s'applique. La séquence infinie de fréquences relatives mesurées à chaque étape de la suite d'occurrences d'un événement A donné doit toujours converger vers la limite de la séquence infinie des conjectures qu'on peut faire quant à la limite de la fréquence relative de l'événement A en question. Mais cette position ne satisfera pas Karl Popper.

Le falsificationnisme de K. Popper

Le fait que le raisonnement inductif n'est pas logiquement valide poussera Popper à rejeter définitivement l'induction non seulement comme méthode scientifique mais aussi comme critère de démarcation entre les énoncés scientifiques et les énoncés pseudo-scientifiques. Selon Popper, l'induction appartient au contexte de découverte et de celui-ci rien ne peut être dit. La science est faite de conjectures et de réfutations. Les conjectures sont ni plus ni moins des théories ou des parties de théories scientifiques qui se présentent toutes comme des énoncés ou des systèmes d'énoncés qui doivent pouvoir être testés à la pièce. Le prototype qui retiendra notre attention est l'énoncé synthétique quantifié universellement et dont le domaine de quantification est infini. Selon Popper, de tels énoncés, par exemple « tous les corbeaux sont noirs », ne peuvent être obtenus par généralisation inductive. Ce ne peut être parce qu'on a observé un ensemble potentiellement très grand de corbeaux qui se sont tous avérés noirs qu'on peut asserter « tous les corbeaux sont noirs ». La question est ici une question de principe : l'énoncé « tous les corbeaux sont noirs » est, dans une écriture canonique, une conditionnelle de la forme $\forall x (Cx \supset Nx)$ et ne peut être dérivé d'une suite arbitrairement longue d'énoncés (d'observations) $O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$ (de corbeaux noirs). En effet, si l'on dériverait $\forall x (Cx \supset Nx)$ des observations passées, il n'aurait valeur de loi que pour ces observations passées et n'aurait par conséquent pas la généralité nécessaire pour avoir quelque valeur prédictive que ce soit. De

plus, $\forall x (Cx \supset Nx)$, formulé à l'aide de la théorie de la quantification moderne, est un énoncé dont le domaine de quantification est l'univers et non l'ensemble des corbeaux. L'énoncé dit que pour n'importe quel objet de l'univers, si cet objet est un corbeau alors cet objet est noir. En effet, on ne peut dire que $\forall x (Cx \supset Nx)$ porte sur les corbeaux puisque cet énoncé serait vrai s'il n'y avait pas de corbeaux ; l'antécédent de la conditionnelle matérielle n'étant pas réalisé, l'énoncé serait vrai peu importe que le conséquent soit réalisé ou non.

Popper refuse aussi le probabilisme à la Reichenbach. En effet, si l'argument en faveur du probabilisme repose sur l'inégalité exprimée par $p(h|eb) > p(h|b)$, mais que, par ailleurs, $p(h|eb) = df [p(h)p(eb)]/p(eb)$, on comprend que, bien que $p(h|eb) > p(h|b)$ capture une intuition forte, la probabilité absolue $p(h)$ (ou, si l'on préfère, pour des raisons techniques, $p(h|T)$ où T est la tautologie) ne pourra jamais être inférieure à la probabilité relative $p(h|eb)$. En d'autres termes, si l'expérience peut contribuer à faire reconnaître la vérité d'une hypothèse quelconque, jamais elle ne pourra rendre l'hypothèse vraie ; les expériences ne contribuent pas à la vérité des hypothèses.

Refusant de se pencher non seulement sur l'induction mais aussi sur l'ensemble du contexte de la découverte, prétextant que celui-ci ne peut faire l'objet d'une logique de la découverte mais seulement d'une psychologie de la découverte, Popper se tournera tout naturellement vers le procédé déductif de mise à l'épreuve des théories, c'est-à-dire le contexte de justification. Il tentera de développer l'équivalent d'un algorithme de la justification qui aurait toutes les garanties de certitude qui accompagnent et qui caractérisent l'inférence déductive. Il le trouvera dans ce qu'il appellera le falsificationnisme. Puisqu'on ne peut démontrer la vérité d'énoncés tels que $\forall x (Cx \supset Nx)$ on doit plutôt, plus modestement, les accepter tant et aussi longtemps qu'on n'aura pas pu montrer qu'ils sont faux. Il ne faut pas viser la corroboration des théories, on doit plutôt tenter de les falsifier. Comment ? En montrant qu'un falsificateur potentiel est vrai. Un falsificateur n'étant qu'une prédiction contradictoire avec une théorie, dans le cas qui nous occupe : $\exists x (Cx \& \sim Nx)$, ou « il existe un corbeau non noir ». On réussit ainsi à récupérer la nécessité caractéristique de l'inférence déductive parce que faisant appel à un énoncé contradictoire, il ne peut pas se faire que les deux soient vrais simultanément. S'il s'avère que $\exists x (Cx \& \sim Nx)$, alors, nécessairement $\forall x (Cx \supset Nx)$ est faux. Alors que, évidemment, ce n'est pas parce que $\exists x (Cx \& \sim Nx)$ que $\forall x (Cx \supset Nx)$.

Tout comme il refuse de dire, *pace* Bacon, que la science empirique est inductive, Popper refuse aussi de faire de l'induction le critère de démarcation entre la science et la pseudo-science. Sont scientifiques les énoncés qui sont falsifiables. Mais ce n'est pas pour autant que tous les énoncés falsifiables sont scientifiquement pertinents. Afin d'isoler ces derniers, Popper fera appel à la notion carnapienne de contenu factuel. Il identifiera le contenu informatif d'un énoncé ou d'une

théorie à la probabilité de sa négation ; le contenu de A est $p(\sim A)$. En effet, plus le pouvoir d'affirmation d'une théorie ou d'un énoncé est grand, plus il est probable qu'il soit faux ; si A affirme peu, « au moins deux Français aiment la philosophie analytique » par exemple, la probabilité que A soit faux est faible. Mais si A affirme beaucoup, « tous les Français aiment la philosophie analytique », le croire vrai nous engage davantage et la probabilité qu'il soit faux est élevée. Est aussi élevé le nombre de falsificateurs potentiels d'un énoncé qui affirme beaucoup.

La falsifiabilité est ainsi proportionnelle au nombre de falsificateurs potentiels. Dans le cas d'énoncés tels $\forall x (Cx \supset Nx)$ qui comptent un nombre potentiellement infini de falsificateurs, il faut, pour procéder à la comparaison en termes de falsifiabilité, faire appel à la relation de classe à sous-classe. Ainsi la falsifiabilité de x est supérieure à la falsifiabilité de y , ou « $Fsb(x) > Fsb(y)$ » si, et seulement si, la classe des falsificateurs de y est une sous-classe des falsificateurs potentiels de x . $Fsb(x) = Fsb(y)$ si les falsificateurs de x peuvent être mis en correspondance biunivoque avec ceux de y ; et s'ils n'ont aucun falsificateur commun alors $Fsb(x) // Fsb(y)$, c'est-à-dire qu'ils sont incommensurables. Puisque $Fsb(\top) = 0$ et que $Fsb(\perp) = 1$, la falsifiabilité d'un énoncé empirique e quelconque est $1 > Fsb(e) > 0$. Cela permet d'incorporer la théorie des probabilités : moins un énoncé est falsifiable, plus il est probable, et si $Fsb(x)$ augmente, alors $p(x)$ diminue. Avec ces outils, il est maintenant possible d'isoler parmi les énoncés falsifiables ceux qui sont scientifiquement plus pertinents ; qui ont plus de contenu factuel.

Peu nombreux sont les philosophes qui ont accepté de suivre Popper et de refuser tout rôle à l'induction. Bien qu'il n'y ait à ce jour ni algorithme de la découverte, ni algorithme de la justification, on reconnaît généralement que la certitude « morale » ou « psychologique » qui accompagne la conclusion d'une inférence inductive peut être explicitée en termes de probabilité de la conclusion étant donnée la vérité de ses prémisses. C'est pourquoi on peut dire qu'en définitive l'histoire de la méthode est un peu l'histoire de diverses tentatives faites pour marier le raisonnement déductif garant de la certitude et de la nécessité, à l'expérience empirique, faillible et incertaine. La mécanique quantique a ouvert de nouveaux horizons philosophiques qui se démarquent radicalement de la quête scientifique des lois de la nature. Peut-être n'y a-t-il pas de loi de la nature, peut-être n'y a-t-il que des corrélations statistiques indiscernables des lois, ou des symétries. Cette question déborde cependant du problème de la méthode.

► ARISTOTE. *Organon*, trad. J. Tricot, Paris, Vrin : I. *Catégories* ; II. *De l'interprétation* ; III. *Les Premiers Analytiques* ; IV. *Les Seconds Analytiques* ; V. *Les Topiques* ; VI. *Les Réfutations Sophistiques*. — BACON F., *Novum Organum* (1620), repr. dans *The New Organon and related writings*, New York, Library of Liberal Arts, 1960 (d'après l'édition de J. Spedding, R.L. Ellis & D.D. Heath, parue dans *The Works*, vol. III,

Boston, Thaggard & Thompson, 1863). — CARNAP R., *The Continuum of Inductive Methods*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1952. — GALILÉE, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica & i movimenti locali*, del signor Galileo Galilei Linceo... (1638), trad. fr. partielle P.-H. Michel, *Dialogues*, Paris, Herman « Histoire de la pensée », 1966 (nouveau tir. 1997). — GLYMOUR C., *Thinking Things Through*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1992. — HEMPEL C.G., *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*, Chicago, Chicago Univ. Press « International Encyclopedia of Unified Science », 1952. — KOLMOGOROV A.N., *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitrechnung*, *Ergebnisse Der Mathematik* (1933) ; trad. angl. N. Morrison, *Foundations of the Theory of Probability*, New York, Chelsea Publ. Co., 2^e éd., 1956. — MILL J.S., *A System of Logic*, Londres/New York/Bombay, 8^e éd., 1906 (trad. fr. L. Peisse, *Système de logique déductive et inductive : exposé des principes de la preuve et des méthodes de recherche scientifique*, Bruxelles, Mardaga, 1988). — POPPER K.R., *Logik Der Forschung* (1935), trad. fr. N. Thyssen-Rutten & P. Devaux, *Logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot « Bibliothèque scientifique Payot », 1973. — POPPER K.R. & MILLER D., « A Demonstration of the impossibility of inductive probability », *Nature*, 5910, p. 687-688, 21 avril 1983 (trad. fr. A. Boyer & D. Andler, « Une démonstration de l'impossibilité de la probabilité inductive », *Le réalisme et la science*, Paris, Hermann, 1990, p. 413-416). — REICHENBACH H., *The Rise of Scientific Discovery*, Berkeley/Los Angeles, Univ. of California Press, 1953 : *The Theory of Probability*, Berkeley, Univ. of California Press, 1949. — SEXTUS EMPIRICUS, *Hypothyses*, dans DUMONT J.P., *Les sceptiques grecs*, Paris, PUF, 1966. — VAN FRAASSEN B.C., *Laws and Symmetry*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1989 (trad. fr. C. Chevalley, *Lois et symétrie*, Paris, Vrin « Mathesis », 1994).

Alain VOZARD

→ A priori ; Découverte ; Dédution ; Expérience ; Induction ; Popper ; Proposition ; Rationalisme ; Rationalité ; Réfutabilité ; Test ; Théorie ; Validation.

MÉTHODES INFINITÉSIMALES

Nous entendrons par là toute procédure démonstrative qui met en œuvre des grandeurs infiniment petites. Depuis le XVII^e s., et la découverte de Leibniz et de Newton, la tradition a retenu les expressions de calcul différentiel et de calcul intégral, mais celles-ci supposent la constitution d'un algorithme qui ne représente lui-même, d'un point de vue historique et épistémologique, qu'une partie et un aspect de ces méthodes.

L'Antiquité. Archimède et l'« exhaustion »

On peut faire remonter à l'Antiquité grecque en général, en dépit du fait qu'elle ait contourné plutôt qu'affronté le problème du traitement de l'infini, et à Archimède en particulier, en dépit de la quasi-absence, dans son œuvre, du terme d'infini (*apeiron*), l'usage de méthodes infinitésimales. Le mot méthode figure dans le titre de l'un de ses traités, retrouvé au XIX^e s., *La méthode relative aux propositions mécaniques*, et elle est en effet particulièrement propre à désigner ce qui devait constituer un modèle permanent

de rigueur pour toute la tradition mathématique, tant Archimède met de soin à distinguer découverte et exposition, à dissocier exposition et démonstration, à réduire toute lacune logique et à expliciter ses présupposés. Dans les textes de lui qui nous ont été transmis, on trouve un exemple d'application de méthode différentielle et plusieurs de méthodes intégrales. Le premier est relatif à la tangente à une courbe, la spirale, justement appelée depuis « archimédienne » (*Des spirales*). Les seconds concernent des calculs d'aire (*quadratures*) ou de volume (*cupatures*) : par exemple aire d'un segment de parabole (autre *La méthode...*, *La quadrature de la parabole et De l'équilibre des figures planes*), volume du cylindre (*De la sphère et du cylindre*). Ils reposent sur une méthode fondée sur la réduction à l'absurde, dite, par un malheureux usage remontant au XVII^e s., « d'exhaustion ». Cette méthode, qu'on peut sans doute faire remonter à Eudoxe, est aussi mise en œuvre par l'Euclide du livre XII des *Éléments*, d'où est tiré l'exemple suivant, dont on a modernisé quelque peu la formulation.

Il s'agit d'établir que le rapport du volume d'un tétraèdre, soit T , à celui d'un prisme de base égale, soit P est de 1 à 3 : $T = \frac{P}{3}$. On établit que les deux inéga-

rités $T < \frac{P}{3}$ et $T > \frac{P}{3}$, prises comme hypothèses, sont contradictoires. Si l'on suppose $T < \frac{P}{3}$, on montre qu'on

peut trouver une grandeur A_n (dont nous dirions qu'elle est prise dans une « suite ») qui soit à la fois strictement plus petite que T et telle qu'on puisse rendre la grandeur $\left| \frac{P}{3} - A_n \right|$, positive, strictement plus petite que n'importe quelle grandeur donnée à l'avance, soit $a = \frac{P}{3} - T$. Il s'ensuit que $T > A_n > \frac{P}{3} - a = T$. ce qui est contradictoire.

Un raisonnement analogue conduit au même type de contradiction à partir de la deuxième hypothèse. Le procédé pour obtenir la « suite » A_n consiste à construire des prismes alternativement inscrits et circonscrits dans le tétraèdre, et à approcher ainsi ce dernier « par le bas » et « par le haut ». Ce type de méthodes d'approximation restera un thème permanent de l'histoire des mathématiques, jusqu'à aujourd'hui : on le retrouve par exemple aussi bien au principe de la définition des nombres réels par Dedekind qu'à celui de la construction de l'intégrale par Riemann. Il constitue l'analogue, non équivalent à cause de l'absence de toute considération de quantité d'ordre infini, de ce qu'est pour nous un passage à la limite. Son originalité anticipatrice apparaît lorsqu'on le compare à une autre méthode dont on trouve trace chez les Anciens, fondée sur la décomposition plutôt que sur l'agrégation : on y considère une figure complexe comme la juxtaposition d'un nombre fini de figures élémentaires dont on connaît la mesure, et on

soumet ces dernières à des déplacements permettant de reconstituer la figure initiale, dont la mesure se trouve par là déterminée. Il convient enfin de remarquer qu'Archimède distingue parfaitement, jusque dans son vocabulaire, la démonstration proprement dite (*apodeixis*), géométrique, de l'étude théorique (*théoria*) préalable, qui procure la connaissance des grandeurs ou des proportions, non astreinte à la même rigueur. Dans cette dernière, on fait appel, soit (pour déterminer les centres de gravité des figures) à des raisonnements barycentriques appartenant à la statique, donc à la mécanique, plutôt qu'à la géométrie et aux mathématiques, soit à des considérations renvoyant à la composition (collection, agrégat, etc.) des continus par des « éléments indivisibles », acceptés, en dépit de la critique aristotélicienne, sans autre commentaire. Quant à la démonstration proprement dite, elle s'appuie sur une proposition souvent désignée du nom de « lemme d'Eudoxe » : deux grandeurs quelconques, inégales, a et b , étant données, il existe un nombre entier, donc fini, N , tel que $Na > b$ ou $Nb > a$. La conscience de la nécessité de poser explicitement ce lemme en axiome (Archimède demande en au moins trois occasions, dans *De la sphère et du cylindre*, *Des spirales* et *La quadrature de la parabole*, qu'on lui accorde un tel lemme) offre un des beaux exemples de la « rigueur archimédienne ».

Après Archimède, il faut attendre le IX^e s., et les mathématiciens arabes, pour un effort de renouvellement des méthodes infinitésimales. En Occident, au XIV^e s., les penseurs d'Oxford et de Paris conceptualisent, sous le nom de « latitude des formes », les divers modes de variation continue des grandeurs dites intensives (uniforme ou difforme, uniformément ou difformément difforme, etc.), et Nicole Oresme en procure une ingénieuse traduction graphique. Il s'agit en premier lieu de la vitesse d'un mobile, d'où un analogue de la notion d'accélération, et, en dépit de résultats intéressants sur la sommation des séries, la postérité de ces travaux sera plutôt mécanique, avec Galilée, que proprement mathématique.

Le XVII^e s. Le calcul infinitésimal

Le XVII^e s. adopte l'idéal archimédien de rigueur, tel du moins qu'il peut en prendre connaissance par les textes dont il dispose, pour la démonstration, mais cherche à s'évader de la disjonction entre découverte et exposition en se mettant en quête de méthodes de découverte. Dès la fin du XVI^e s., des auteurs comme Simon Stevin et Luca Valerio introduisent, par le biais de la statique et de l'analyse barycentrique, des modes de raisonnement plus directs et plus intuitifs, qui reposent sur le passage à la limite. Kepler, dans son *Astronomia nova* (1609), considère que l'essence de la méthode d'Archimède dans la mesure du cercle consiste moins dans le processus de réduction à l'absurde que dans celui de décomposition en un nombre illimité de triangles indéfiniment petits, et, dans sa *Stereometria doliorum* (*Stéométrie des*

tonneaux, 1615), il se sert du procédé pour calculer le volume de certains solides de révolution.

L'ouvrage que publie, en 1635, le père jésuite Bonaventura Cavalieri sur la géométrie des continus (*Geometria indivisibilibus continuorum nova quadam ratione promota*), systématisé l'usage des indivisibles (le terme est d'origine médiévale) en une véritable méthode. Admettant qu'une surface, par exemple, se compose d'un nombre indéfini de lignes droites équidistantes (*indefinitae numero lineae, vel plana* ; sans qu'on se prononce sur le caractère de l'infini, ou sur la nature de la composition), on suppose qu'une règle (*regula*), c'est-à-dire une droite restant parallèle à elle-même, soit mise en mouvement à travers une figure donnée, par exemple sur un plan. Les intersections de cette règle avec la figure plane constituent les éléments, ou indivisibles composant la totalité de la figure. L'expression commune de Cavalieri est « omnes », par exemple « omnes lineae » pour la figure plane, et il importe, en raison des différences conceptuelles, d'éviter l'identification de cette notion à la somme, encore moins bien entendu à l'ensemble, des lignes. L'idée fondamentale de Cavalieri est d'associer deux ou plusieurs configurations sous la forme de rapports, en vue d'en dériver des relations entre les aires et les volumes des figures elles-mêmes : on retrouve le cadre euclidien des rapports et proportions. L'indivisible n'a rien d'infinitesimal : c'est un élément découpé sur une figure, de dimension inférieure d'une unité, susceptible de devenir le terme d'une mise en rapport. Il s'agit d'introduire à une analyse géométrique, non de promouvoir une forme de calcul algébrique. Maniée avec dextérité, une telle méthode permet à Cavalieri d'obtenir tout un ensemble de résultats d'aires ou de volumes inconnus des Anciens (exposé dans les *Exercitationes geometriae sex*, 1647), et de dresser une table d'intégrales définies. Torricelli, lu par Wallis, lui-même lu par Newton, et Hobbes, lu par Leibniz, donneront de la méthode un exposé plus accessible que celui des ouvrages de Cavalieri, et en assureront la diffusion, au prix d'une interprétation de sa pensée.

À la suite de Torricelli, Pascal, qui a été introduit aux indivisibles par la lecture des ouvrages du père Tacquet, propose d'interpréter toujours l'« ordonnée » (le segment perpendiculaire élevé du diamètre jusqu'au demi-cercle) comme un rectangle indéfiniment petit, si bien que la somme de ces ordonnées ne diffère de l'aire du demi-cercle que par une quantité plus petite que toute quantité donnée : d'où le bon usage des indivisibles, celui d'un simple langage, dépourvu de toute aptitude à tromper le vrai géomètre.

Il manquait à ces méthodes, fécondes en résultats, l'unité d'un symbolisme de notation, la puissance de règles universelles de calcul. Ce sera l'apport du calcul infinitésimal de Leibniz et de Newton, surtout dans sa version leibnizienne, qui sera pour cette raison privilégiée.

En octobre 1666, Newton, auquel revient la priorité chronologique, rassemble et organise les résultats de

ses travaux des trois années précédentes sur les courbes, notamment sur le « problème des tangentes », dans un manuscrit qui constitue le premier travail en forme sur le nouveau calcul. Considérant la courbe comme lieu de l'intersection de deux lignes (verticale et horizontale) en mouvement, Newton y décrit le mouvement d'un point de coordonnées x et y , dépendant du temps t , comme composition d'un mouvement horizontal et d'un mouvement vertical. Il construit ainsi un modèle géométrico-cinématique de deux ou plusieurs points parcourant, en des périodes égales de temps, différentes distances sur différentes droites (l'équation de la courbe étant vérifiée en tout temps), à des vitesses qu'il prendra l'habitude, vers 1690, d'appeler « fluxions », et de noter : \dot{x} , \dot{y} , etc., mais qu'il ne prend pas soin de définir, les prenant apparemment comme évidents sur la base d'une intuition cinématique. Il obtient alors, non seulement la relation entre \dot{x} et \dot{y} , mais, à partir de la relation entre x et le rapport de \dot{x} à \dot{y} , la relation primitive entre x et y , c'est-à-dire ce qu'on appelle aujourd'hui le théorème fondamental du calcul.

L'approche leibnizienne est bien différente, elle consiste à introduire explicitement les infiniments petits, aperçus d'abord, à son propre, mais tardif, témoignage, dans le « triangle infinitésimal », formé des (indéfiniment) « petits accroissements » de l'abscisse de l'ordonnée, et de la courbe, d'une figure du traité pascalien *Des sinus du quart de cercle* (1659). Surtout, Leibniz systématisé, à partir des tableaux numériques dressés par Pascal dans ses écrits arithmétiques, l'usage et l'écriture des sommes $\sum_{j=1}^n x_j$ et des

différences $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ de termes de séries. Transformant, par extrapolation à l'infini actuel (on ne peut encore en toute rigueur parler encore de *passage à la limite*), les suites finies de différences (respectivement de sommes) finies en suites infinies de différences infiniment petites (respectivement infiniment grandes), il en vient à écrire ces termes sous forme de différentielles dx (*differentiae* ou *differentiales* ; respectivement de sommes, *sommae*, $\sum x$, et bientôt intégrales, *integrales*, $\int x$). Ainsi se trouvent posés des opérateurs, symbolisés par d et \int , applicables à des termes (différences et sommes) non plus finis mais infinis. Ce sont des opérateurs d'un nouveau calcul, dont Leibniz s'attache ensuite à donner les règles, surtout pour la différenciation : règles pour la somme et le produit, pour l'« itération », ou les différenciations et intégrations d'ordre supérieur (ddx , ultérieurement notée d^2x , et $\int \int x$), pour l'application de l'une sur l'autre, avec le résultat fondamental de réciprocity : $d \int = \int dx$, qui suggère une définition possible de l'un à partir de l'autre ; surtout, la plus profonde sans doute, règle d'invariance de la différenciation par changement de variable, qui permet de traiter par le nouveau calcul toutes les transformations opérées auparavant sur les figures par construction géométrique. On voit la différence, bien marquée par Leibniz, avec la notion d'indivisible : appliquées à une grandeur (« variable »), les

deux opérations du calcul donnent une grandeur de même dimension, mais changent l'ordre d'infinité. Il importe dès lors de veiller à ce que, dans les équations du calcul, les termes aient, outre la même dimension (loi ancienne d'homogénéité dimensionnelle), le même ordre d'infinité (loi nouvelle d'homogénéité transcendantale).

La devenir du calcul

Le plus grand mérite d'un tel calcul est bien, en termes modernes, de fournir des algorithmes pour la détermination des différentielles et intégrales. Tel qu'il se présente chez Leibniz, il ne lui manque guère, pour pouvoir déployer toute sa puissance, que le concept de fonction, dont les mathématiciens, d'Euler à Riemann, vont bientôt devenir familiers. En autorisant la dissociation de la variable en ses deux composantes, indépendante et dépendante, en l'arrachant du même coup à son statut de grandeur géométrique, le concept de fonction libère progressivement le calcul des contraintes liées à ses origines : seul, par exemple, il permet une définition correcte de la dérivée, avec le cortège des applications à la mécanique. Cette dernière forme, même en l'absence de ces deux concepts, le champ privilégié de l'analyse, au sens que lui donne, au XVIII^e s., d'Alembert, Euler et Lagrange.

Un point reste longtemps obscur : le statut de ces grandeurs infinitésimales. Dans les discussions qui accompagnent la naissance du calcul, on retrouve les difficultés des médiévaux concernant l'infini actuel. Si Newton garde le silence, Leibniz hésite entre une conception « finitaire » et une franche reconnaissance de l'infini, et cherche surtout à justifier l'usage pratique du calcul : analogie avec les imaginaires comme fiction fondée, incomparabilité des ordres d'infinité. Les efforts longtemps déployés par les mathématiciens pour éviter les infinitésimaux (Lazare Carnot, Lagrange) montrent la difficulté d'une légitimation mathématique, que pourra seule procurer l'analyse non standard, issue de la théorie des modèles (A. Robinson). Au début du XIX^e s., Cauchy se sert encore des infiniment petits pour donner les premières définitions correctes des concepts fondamentaux de l'analyse (limite, continuité), dont l'arithmétisation, qui sanctionne leur élimination définitive, devra attendre, à la fin de ce même siècle, les cours de Weierstrass.

► ARCHIMÈDE, *Archimedes. Opera omnia...*, I-III, éd. J.L. Heiberg, Stuttgart, Teubner, 1972 (trad. lat.) ; *Œuvres*, I-III, trad. fr. C. Mugler, Paris, Les Belles Lettres, 4 t., 1970-1972. — CAUCHY L.A., « 1821 : Cours d'analyse de l'École royale polytechnique. Analyse algébrique », *Œuvres* (2) 3, Paris, Gauthier-Villars, 1823. — CAVALIERI B., *Geometria indivisibilibus continuorum quadam ratione promota*, Bologne, 1635 ; *Exercitationes geometriae sex*, Bologne, 1647. — EUCLIDE, *Euclidis opera omnia*, éd. I.L. Heiberg & H. Menge, Lipsiae, 1883-1916 (trad. angl.), T. Heath, *The thirteen books of the Elements*, 1^{re} éd., Cambridge, 1908 ; trad. fr. B. Vitrac, livres I-IX, *Les Éléments*, vol. I et II, Paris, PUF, 1990-1994).

— KEPLER J., *Opera omnia*, éd. C. Frisch, Francfort/Erlangen, Heyder & Zimmer, 8 vol., 1858-1870 ; *Gesammelte Werke*, Munich, Beck, 1938 sq. — LEIBNIZ G.W., *Leibnizens Mathematische Schriften*, Halle, C.I. Gerhardt, 1849-1863 (rééd., Hildesheim/New York, Olms, 1971 ; trad. fr. de plusieurs mémoires in Parmentier M., *Naissance du calcul différentiel*, Paris, Vrin, 1989). — NEWTON I., *Mathematical Papers of Isaac Newton*, éd. D.T. Whiteside, Cambridge, 8 vol., 1967-1975 ; *The mathematical works of Isaac Newton*, *ibid.*, Londres, 2 vol., 1964-1967 (trad. fr. du traité *La méthode des fluxions et des suites infinies*, Paris, P. Buffon, 1740). — PASCAL B., *Œuvres*, Paris, Gallimard, 1954 ; *Œuvres complètes*, Paris, Desclée de Brouwer, 1965-1975. — ROBINSON A., *Non standard analysis*, Amsterdam, North-Holland Publ. Co, 1974.

Alain MICHEL

→ Cauchy ; Géométries ; Infini mathématique.

MEYERSON Émile, 1859-1933

Philosophe français né à Lublin en Pologne. Meyerson fit d'abord des études scientifiques en Allemagne. Chimiste, il fut attaché au laboratoire de Schutzenberger au Collège de France. Il tenta l'aventure en Argentine de l'exploitation industrielle de la fabrication de l'indigo synthétique. La trentaine venue, il se tourna vers la philosophie. Sa formation de chimiste en Allemagne marqua sa pensée. Contre le positivisme de Mach et de ses disciples, il défend une position qu'il qualifie de « réalisme ». Dans son premier livre important, *Identité et réalité*, publié en 1908, il avance que la science n'a point pour seule tâche d'ordonner des sensations mais pour ambition d'accéder aux « choses », à « ce qui est réellement ». Il n'accepte pas davantage que la science puisse se contenter de chercher à établir des régularités entre phénomènes ; il soutient qu'elle consiste en une recherche des « identités ». Cette thèse est développée dans son ouvrage *De l'explication dans les sciences* (1921) selon une démarche historico-critique. Elle fait l'objet d'un traitement systématique, dix ans plus tard dans *Du cheminement de la pensée* (1931), au prix d'une discussion serrée des thèses de Frege, Wittgenstein et Whitehead. Dans ce dernier ouvrage, il avance l'idée d'une psychologie de l'intelligence qui devrait résoudre « l'énigme du cheminement de la pensée ». Si la science réussissait pleinement, elle se dégraderait en un ensemble de tautologies. Destin auquel elle n'échappe paradoxalement que parce qu'elle ne surmonte jamais tout à fait l'« irrationnel », le fond inépuisable du réel. Gaston Bachelard a fait de la pensée de Meyerson sa cible permanente. S'il partage avec lui une opposition radicale au positivisme, il récuse son réalisme, sa conception de l'irrationnel et sa vision continuiste de l'histoire des sciences. À *La déduction relativiste* (1925), il oppose *La valeur inductive de la relativité* (1929), pour faire valoir la nouveauté complète des nouvelles doctrines physiques.

● *Identité et réalité*, 1908, rééd., Paris, Vrin, 1951. — *De l'explication dans les sciences*, Paris, Payot, 1921. — *La déduction relativiste*, Paris, Payot, 1925. — *Du cheminement de la*

pensée, Paris, Alcan, 1931. – *Réel et déterminisme dans la physique quantique*, Paris, Hermann, 1933. – *Essais*, Paris, Vrin, 1936. – *Les philosophes et la science*, sous la direction de P. Wagner, Paris, Gallimard, 2002.

► BACHELARD G., *La valeur inductive de la relativité*, Paris, Vrin, 1929. – BROGLIE L. DE, « À la mémoire d'Émile Meyerson », *Matière et lumière*, Paris, Albin Michel, 1937.

Dominique LECOURT

→ Bachelard ; Mach ; Réalisme ; Réel.

MICHELSON Albert Abraham, 1852-1931

Physicien américain. Passion constante de Michelson, la pratique des mesures de précision en physique expérimentale le conduisit, durant l'hiver 1880-1881, alors qu'il travaillait dans le laboratoire d'Helmoltz, à évaluer le mouvement relatif de la terre afin d'invalider l'hypothèse de l'existence de l'éther ubiquitaire et luminifère. La théorie ondulatoire de la lumière, généralement acceptée dans les années 1880, supposait en effet l'existence d'un *medium* luminifère, d'un « éther » venant s'insinuer dans chaque espace intermoléculaire. Cependant, tout en déniait vigoureusement la validité de l'existence d'une telle substance, Michelson ne parvenait pas à concevoir la propagation de la lumière sans l'action de quelque forme d'éther. Dans ses dernières années, il parla de ce « vieil éther bien-aimé » auquel il ne pouvait manquer de se raccrocher encore un peu, bien que celui-ci ait été abandonné par la science. S'il est vrai que les expériences de Michelson sur la « dérive-éthérée » de la lumière ont exercé une influence directe sur les travaux de Lorentz, Fitzerald, Poincaré, W. Thomson, Lodge, Larmor, le rapport existant entre les conclusions de ses propres recherches avec l'élaboration des théories de la relativité d'Einstein apparaît plus complexe à définir. En effet, bien que la légende ait exagéré le rôle joué par l'expérience de Michelson-Morley en lui attribuant le mérite d'avoir apporté la base pour le premier ouvrage d'Einstein consacré à la définition du principe de la relativité appliqué à l'électrodynamique, la contribution de Michelson à la définition de la vitesse de la lumière comme « constante virtuelle » s'avéra incontestablement de la plus grande importance pour la conception des théories de la relativité restreinte et généralisée. De son côté, en dépit des quelques réserves qu'il émettait au sujet des travaux d'Einstein, Michelson était convaincu que ce dernier avait sondé la nature de la lumière et découvert son champ à la fois infini et infinitésimal.

● *Light Waves and Their Uses*, Chicago, 1903. – *Studies in Optics*, Chicago, 1927. – *Albert Abraham Michelson : The Man Who Taught a World to Measure*, publication du Michelson Museum, n° 3, China Lake (Calif.), 1970.

► HOLTON G., « Einstein, Michelson, and the "Crucial Experiment" », *Isis*, 60, n° 202, été 1969, 133-197. – JAFFE B., *Michelson and the Speed of Light*, Science Study series, New

York, Garden City, 1960. – SHANKLAND R.S., « Michelson's Role in the Development of Relativity », *Applied Optics*, 12, n° 10, oct. 1973, 2287 et 2253. – SWENSON L.S. Jr., « Michelson », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1974, t. IX, p. 371-374 ; *The Ethereal Aether : A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments 1880-1930*, Austin (Tex.), 1972. – Coll. : « Albert Abraham Michelson : The Man and the Man of Science », *American Physics Teacher*, 4 fév. 1936, 1-11.

Éric HAMRAOU

→ Einstein ; Éther ; Lumière ; Mesure ; Relativité ; Vision.

MICRO-ORGANISME

Un nom vague mais durable

Le terme de « micro-organisme » ne réfère à aucune unité taxonomique particulière. Bien qu'imprécis, le mot apparut vers 1880 et aujourd'hui consacré par l'usage : il désigne un ensemble composite d'êtres vivants dont la taille est inférieure à la limite de résolution de l'œil humain. Leur observation en tout ou partie nécessite donc l'emploi de microscopes photoniques ou d'ultramicroscopes. Leur dimension est cependant loin d'être uniforme : au contraire des protozoaires qui, pour la plupart, dépassent 10 à 50 micromètres et qui font figure de « monstres gigantesques » (Hooke, 1677), certains virus ne sont guère plus gros qu'une molécule (10 à 20 nanomètres). Le trait commun qui les rassemble – leur petitesse – n'a d'ailleurs pas de signification phylogénétique formelle qui voudrait que les êtres les plus petits soient les plus primitifs. Les micro-organismes représentent la face cachée du monde vivant. Leur diversité métabolique est presque sans limites ; leur présence n'est pas confinée, comme on le pensait, à l'immédiat environnement humain. Ils colonisent, au contraire, les biotopes les plus insolites. Ils sont partout et partout différents. Aussi le champ de l'infiniment petit est-il plus riche et plus varié que ne le laissent supposer les premières estimations.

Imperceptibles et mal assortis

Sous la désignation de micro-organismes sont regroupées, selon les auteurs, de 600 000 à plusieurs millions d'espèces. Les représentants de cet immense ensemble n'ont pas tous le même statut. Et les vues des biologistes à l'égard de cet assortiment hétéroclite sont discordantes. Il faut donc trancher... Retenons d'abord la scission irréductible entre ceux qui présentent une architecture cellulaire et ceux qui échappent au modèle qui semble être l'unité élémentaire et fondatrice de la vie : la cellule. Pour cette raison même, l'appartenance de ces derniers au monde vivant est une incessante remise en question.

Les plans d'agencement des deux archétypes cellulaires, procaryote et eucaryote (Chatton, 1937), qui structurent les espèces de la première subdivision, ne

présentent – quoiqu'on y retrouve les mêmes composantes moléculaires – que de très lointaines similitudes. Le premier type montre une ordonnance simple à génome nu et contraint, composé de deux types d'unités répliquatives (chromosome unique et plasmides) noyées dans le cytoplasme ; la structure générale est dite monocompartimentale. Deux domaines divisent ce premier groupe : celui des *Bacteria* (bactéries ou eubactéries) et celui des *Archaea* (archéobactéries). Le second modèle témoigne d'un arrangement complexe avec un « vrai » noyau, individualisé du reste du corps cellulaire par une membrane, qui abrite un double assortiment de chromosomes (2n) ; la structure générale est pluricompartimentale : elle caractérise le vaste domaine des *Eucarya* dont les protistes ou *Protista* (Haeckel, 1866) ne sont que les formes microscopiques. Certains protistes ou protozoaires (von Siebold, 1845) figurent le plus bas degré de l'échelle zoologique ; certains autres ou protophytes présentent une étroite parenté avec le monde végétal. On associe aux protistes les *Fungi* ou champignons microscopiques, unicellulaires (levures) ou filamenteux (moisissures). À cette classification tripartite en domaines (*Bacteria*, *Archaea* et *Eucarya*), établie par Woese (1990), on peut opposer ou superposer la systématique de Whittaker (1969) fondée sur trois critères fondamentaux : le type cellulaire, le mode de groupement des unités structurales et le type nutritionnel. Ainsi cinq règnes se partagent le monde vivant : *Animalia*, *Plantae*, *Fungi*, *Protista* ; le cinquième, *Prokarya* ou *Monera* est l'égal des deux domaines de Woese, *Archaea* et *Bacteria*. D'où il suit que les micro-organismes se répartissent schématiquement selon deux équations implicitement élaborées par Whittaker (a) et Woese (b) : (a) = *Monera* ou *Prokarya* + *Protista* (protozoaires + protophytes + *Fungi*) ; (b) = *Bacteria* + *Archaea* + *Protista*.

Quoiqu'ils ne puissent entrer dans de tels systèmes classificatoires, les parasites intracellulaires obligatoires, virus et agents infra-viraux ou ATNC (pour « agents transmissibles non conventionnels »), exempts des microstructures et des assises qui déterminent les configurations cellulaires, seront ici associés aux modèles précédents. Virus et ATNC sont vraisemblablement les termes ultimes d'une évolution régressive. Endoparasites cellulaires obligatoires – des végétaux, des animaux ou même des bactéries (ils portent alors le nom de bactériophages ou phages) –, les virus ont emprunté aux cellules hôtes les fonctions minimales qui garantissent leur survie. Quant aux ATNC – viroïdes des plantes et prions des animaux –, leur organisation élémentaire et indivisible, réduite à leur plus simple expression moléculaire (ARN pour les viroïdes, protéine pour les prions), de même que leur mécanisme infectieux, sont toujours controversés.

Découvrir, c'est nommer

Le 7 septembre 1674, Van Leeuwenhoek adresse à la Royal Society de Londres une lettre qui retrace ses

observations relatives à « l'eau d'un lac qui se trouve à deux lieux de Delft [...] ». Parmi les minuscules globules verts, nage une multitude de petits animaux dont certains sont arrondis [...] En ceux-ci, je vis deux pattes près de la tête et à l'autre extrémité deux minuscules nageoires [...] Le déplacement de la plupart d'entre eux était rapide et si élégant que j'avoue n'avoir jamais rien vu de si admirable ». Que sont ces « petits êtres 10 000 fois plus petits que ceux que décrit M. Swammerdam sous le nom de puce d'eau ou de pou d'eau », et qui s'agitent sous l'œil de Leeuwenhoek rivé à l'unique lentille de son microscope ? Des protozoaires... Leur présence n'est-elle qu'occasionnelle ? À partir de 1675, Leeuwenhoek tiendra l'irruption de cette étrangeté pour naturelle car à chacune de ses observations de gouttes d'eau, il reverra les bêtes naines. Quarante-sept lettres, sur les quelque trois cents qu'il écrivit et qu'il adressa durant un demi-siècle à divers correspondants parmi les plus prestigieux de son temps, sont dévolues à cette microflore. Certains de ces animaux sont pourtant si petits « que même au travers du microscope, ils se soustraient à la vue » : c'est dans « l'écume », cette « matière farineuse qui recouvre les dents » que Leeuwenhoek découvre, en 1683, les bactéries. Ces corpuscules sont bien vivants car « ils s'élançant dans la salive comme le fait le brochet ou le brocheton dans la rivière ». Leur turbulence et leur mouvement sans la marque irréfutable de leur animalité. Ni imparfaits, ni animaux sans queue ni tête, ils sont animaux sans nul partage, achevés et définis. Et tels, surgissant de l'imperceptible, ils s'imposent par effraction à notre pensée. Ils ne sont admissibles – comme les habitants de Lilliput aux yeux de Gulliver – que par un seul changement d'échelle : ce sont des modèles réduits de quadrupèdes, de poissons et de vers. Le terme d'animalcules que les traducteurs des *Philosophical Transactions* substituent aux locutions par lesquelles Leeuwenhoek les désigne (dierkens [animals], beesjes [beasties], cleine schepsels [little creatures], ongelaflyk kleijn [incredibly small]...), les englobe tous sans distinction d'origine ou de fonctions dans un ensemble indifférencié qui n'est ni famille, ni classe, ni ordre.

Ce nom réfère à une typologie infinie ; et cette désignation imprécise a sans doute pour seule vocation d'ouvrir toute grande la porte des rêves à ce bestiaire insolite et encore inédit. Leeuwenhoek et la Royal Society leur ont donné un nom : les nommer c'est les placer là où l'on veut qu'ils soient ; dans le clan des bêtes, leur assignant ainsi un statut dont ils auront du mal à se départir. Des « Messieurs Amateurs » les appelleront « atomes animés » (Gassendi, 1656), vermes ou virus (Kircher, 1658), « organismes faits comme des anguilles » (Huygens, 1678), « punaises, insectes ou poissons » (Joblot, 1754) ou plus simplement « microscopiques » (Bory de Saint-Vincent, 1826) « parce qu'ils échappent à l'œil et qu'on ne peut les apercevoir qu'avec l'aide du microscope ». Puisque les bêtes naines naissent des infusions, on les appellera, sous les Lumières, desufioses ou « animalcula

infusoria» (Wrisberg, 1765) et on les assimilera plus tard à des « plantes-animaux » ou *Tierpflanzen* (Perty, 1852).

Les animalcules avaient vécu. À ce terme qui témoignait de leur rang, succède, au moins durant un siècle, celui qui dénote une origine tout à la fois partagée et ordinaire, un « lieu commun » de naissance — ce qui ne laisse pas d'intriguer. Devenus des infusoires, les « atomes animés » se démettent-ils pour autant de leur fonction singulière d'êtres vivants en réduction ? Needham l'admet : les infusoires seraient des « êtres vitaux » qui appartiendraient à « une classe de vie au-dessus de la pure végétation et au-dessous de la pure animalité » (Needham, 1769). Le mérite de Spallanzani, dans la querelle qui l'oppose à Needham, est de restituer aux *animali infusori* leur qualité d'animaux vrais, entiers, complexes et parfaits, et de les « remettre à leur place ». La question de leur inclusion dans l'un ou l'autre des deux règnes qui scinde le domaine du vivant n'est cependant pas si ouvertement tranchée puisque selon Bory de Saint-Vincent (1826) « les infusoires semblent lier les végétaux et les animaux par des nuances infinies ». Entre plantes et poissons, mais aussi entre être vivant et matière inanimée, simples intermédiaires, ils s'établissent dans « l'entre-deux ». Ils sont insaisissables, ce qui ajoute à leur mystère. Ubiquitaires, incertains et versatiles, il fallut pourtant les classer, les inclure dans une collection d'objets qui, nonobstant leur taille, ignorerait leur particularité même. Dans la douzième édition du *Systema Naturae* (1766) Linné distribua les infusoires, en partie dans le *Chaos* à côté d'animaux au corps libre et régulier, privé de membres, et en partie dans le groupe des *Zoophyta*. Une dizaine d'années après la mort de Linné, Müller, dans un ouvrage posthume qui ne sera publié qu'en 1786, reprit la taxonomie des vermes précédemment établie et la compléta. Il introduisit au sein de cette « race d'animaux » (*Microscopica*) peuplant « les eaux imprégnées de particules » de nouveaux genres que conservera la systématique moderne des protistes ; *Monas*, *Voivox*, *Cyclidium*, *Paramecium*, *Vorticella* ; Erhenberg (1838) dans le monumental traité qu'il consacra aux animaux infusoires (*Infusiertierchen*) proposa, quant à lui, une articulation encore confuse des infiniment petits que Goldfuss quelque vingt ans auparavant (1817) désignait déjà du mot de protozoaires, le préfixe renvoyant à des notions d'origine (première ou primitive) et d'organisation (rudimentaire). Ils étaient révoqués au plus bas degré de l'échelle. C'est finalement Dujardin (1841) qui décida de leur répartition en trois classes — flagellés, rhizopodes et ciliés — auxquelles s'ajoute aujourd'hui celle des sporozoaires. L'individuation des bactéries, dont la taille était un obstacle rédhibitoire à la reconnaissance de leurs particularités structurales, ne pouvait encore être concevable, mais déjà von Nägeli (1857), réévaluant leur mode de reproduction végétative par fission binaire ou scissiparité, fonda le groupe des *Schizomycètes* dont l'appellation survécut durant la première moitié du xx^e s.

« Le microbe, voilà l'ennemi »...

À partir de la fin du xix^e s., un nom aura, au moins dans le langage courant, une fortune sans égale : celui que forgea Sédillot (1878) pour mettre fin aux interminables discussions entre tenants des termes de « microzoaires », « microphytes », « vibriens », « monades » et « virus ». « Microbe » remplace alors ces nombreuses désignations synonymes et du même coup efface toutes références à la zoologie et à la botanique, sciences classificatoires des corps organisés. Le terme novateur s'accorde aussi bien avec la petitesse de l'objet (*micro*) qu'il convoque, qu'avec la « force » (*bios*) qui l'anime et que la science déjà triomphante du xix^e s. commence à percevoir et à isoler chez les « êtres vivants doués de vie » (Lamarck, 1797). Toutefois le mot est assez vite déprécié ; converti à sa seule acception péjorative, il sera même récusé. Les microbes, infâmes parce qu'infimes, seront discrédités. Dangereux, ils menacent l'homme. L'équation est simpliste qui identifie, en deux mots, la cause (le microbe) et l'effet (la maladie). Duclaux (1886), par exemple, rebaptise « Le microbe et la maladie » la seconde édition de son ouvrage qui avait pour titre original « Ferments et maladies ». Le terme, dont ne sera conservée dans le langage scientifique que la forme adjectivée (microbien), rallie des forces maléfiques et connote une crainte proche de la superstition : les grandes épidémies qui ont dévasté l'Europe sont encore présentes dans les esprits. La tuberculose et la syphilis font encore des ravages... Pour élargir le champ conceptuel et pour ne pas réduire le monde invisible à ces forces du mal (et, qui sait, pour les conjurer) un autre substantif, immédiatement intelligible, va peu à peu s'imposer : micro-organisme. Terme générique, il laisse de côté toute référence médicale pour s'en tenir, sans distinction, aux cohortes d'êtres vivants microscopiques et libres, saprophytes ou pathogènes.

La substitution des termes, l'un à l'autre, indique bien le degré d'incertitude dans lequel l'examen de ces bestioles, agaçantes d'exister sans raison, plonge les philosophes de la nature puis les biologistes. Les objets de la nature ne sont pas seulement des mots, une syntaxe, c'est-à-dire des signes. Ils sont là bien avant le langage qui les recueille et les appelle. Peu à peu ils acquerront leur statut désignatif, et c'est par ce nom même qu'ils pénétreront et fissureront notre raison : « animalcule » renvoyait à une communauté de traits dont la mobilité semblait à elle seule déterminante ; « infusoire » avait pour référent un lieu d'origine (Littre, 1766) ; « schizomycète » témoignait d'un type de division au sein d'organismes microtubulaires ; « microbe » en appelait à une taille, laquelle décidait de leur place à côté des êtres organisés visibles à l'œil nu.

Une question considérable
ou « La Belle Question » (Ruestow)

Le fond historique de la science des êtres minuscules, science qui s'individualise et se démarque de la

zoologie et de la botanique à la fin du xix^e s. avec Koch, Lister, Pasteur, et bien d'autres, est établi sur les supputations concernant l'origine germinale des maladies et sur la « théorie » de la génération spontanée. On sait le rôle que joua Redi (1668) dans l'éradication de cette croyance : les asticoles qui se « propagent » sur des fragments de viande proviennent d'œufs que les mouches y déposent et non de la substance corrompue et de la force vitale qui l'habite. Stenon, Van Horne, de Graaf, Leeuwenhoek débrouilleront le mythe : ils verseront au dossier de la génération quelques pièces intangibles — œufs ou vers. À la fin du xviii^e s. la cause est en partie entendue : il semble improbable que les lézards ou les crapauds, les souris ou les moulles naissent de la vase ou de toute autre matière en décomposition : « Messieurs Swammerdam, Malpighi et Leeuwenhoek [...] sont venus à mon secours et m'ont fait admettre plus aisément que l'animal et toute autre substance organisée ne commence point lorsque nous le croyons et que sa génération apparente n'est qu'un développement et une sorte d'augmentation » (Leibniz, 1695). La découverte à cette même époque d'êtres vivants, agités et invisibles, si proches des *Moleculae vivae* relance la controverse. Que prédit ce *credo*, cette douteuse théorie dont l'énoncé lapidaire et péremptoire, entendu comme une formule magique, a valeur de loi : tout être complexe et vivant peut naître spontanément de matière inanimée minérale ou organique, non en vertu d'un événement extérieur, mais par le seul pouvoir d'une force occulte ou d'un esprit subtil qui réside dans la matière même et qui, par un enchaînement nécessaires, la rend viable. Une autre lecture, non le pressent, s'imposera très vite : l'inerte produit du nouveau et surtout du vivant... « Hallucination ridicule » (Rabus, 1696) ! Histoire à dormir debout ou plus simplement restes diurnes d'un rêve ancestral qui répondrait à notre demande d'éternité. Si cette opinion divise ainsi le monde des savants et des philosophes c'est parce qu'elle se situe « au voisinage des mystères » (Pasteur, 1861). De cette énigme qui tient les esprits en éveil, Pasteur fera une simple question accessible à l'expérimentation : « La matière peut-elle s'organiser elle-même ? En d'autres termes, des êtres peuvent-ils venir au monde sans parents, sans aïeux ? Voilà la question à résoudre. » Leeuwenhoek avait déjà contesté très tôt le système doctrinal de l'hétérogénéité. Il reprend vers 1684 les expériences de Redi ; son jugement est catégorique et il affirme, prévenant toute objection future : « Je suis fermement convaincu qu'aucun animal vivant, qu'il s'agisse de vers, de mouches, de puces, de poux ou même d'acariens, ne peut naître de la sève ou de ses feuilles d'aucune plante ou d'aucun arbre ou de matière altérée ou putréfiée ou de sueur » (Lettre du 14 mai 1686). Le problème pourrait être liquidé s'il ne s'agissait que de la seule naissance des bêtes manifestes. La mise à jour des « invisibles » remet littéralement tout en question. Les animalcules pourraient figurer le premier niveau du vivant, issu de la conversion initiale de la matière brute, de la boue et des déchets. Leur engendrement signe l'épuisement sinon

la pénurie de la force primordiale, perçue comme force inépuisable qui faisait, naguère, venir au monde, comme le rapporte Diodore de Sicile, des limons du Nil, les crocodiles...

D'où viennent alors les animalcules ? Ils se reproduisent comme les bêtes à poils, à plumes, à écailles ou à peau nue. Ils ont une parenté désignée : « Étant dans l'eau, ils peuvent engendrer et se multiplier comme l'auteur (Leeuwenhoek) dit l'avoir observé » (Huygens, 1678). À moins qu'ils ne proviennent « de l'air ou que la pluie n'apporte leurs graines qui ensemencent l'eau et le reste ». À partir de 1750 une dispute singulière opposera sur le sujet de cette génération contre-nature deux prêtres catholiques : pour Needham, pénétré des idées de Buffon la vitalité qui réside « dans toutes les substances et dans toutes les parties de ces substances jusqu'aux plus petites » est une propriété inaliénable. Pour Spallanzani (1765), les corpuscules qui se meuvent dans les tisanes n'ont rien à voir avec la *generatio ex putredine* empruntée aux croyances superstitieuses. D'ailleurs lorsqu'elles sont convenablement chauffées, les infusions ne livrent aucun signe de vie. Mais alors, n'a-t-on pas amoindri, « affaibli ou peut-être totalement anéanti la force végétative des substances infusées à raison de leur tempérament plus ou moins fort ». N'a-t-on pas « complètement corrompu par les exhalaisons et par l'ardeur du feu, la petite portion d'air qui restait dans la partie vide des fioles » ? Ces nouveaux arguments avancés par Needham replacent au centre de la polémique la chaleur trop intense et la privation d'air dont les effets conjugués ruinent la volonté de la matière d'accéder à un autre statut. Chauffer, évacuer l'air, revient à brouiller l'ordre naturel des faits — et de leur conséquence —, à casser le ressort d'un *organum* : c'est contraindre par l'artifice de l'expérience une nécessité à ne pas produire. Spallanzani n'a pas eu raison des « fantaisies » — qu'il appelait « délires » — alléguées par les partisans de Buffon. Il faudra l'ingéniosité et la détermination de Pasteur pour forcer ces contradictions ; opérer dans des conditions expérimentales telles que la vigueur déterminative ou la vertu génésique, postulée par ses adversaires hétérogénistes, ne soit consumée et que l'air ne soit absent. La formulation de la théorie cellulaire (Schleiden, 1839) et la parution de *L'origine des espèces* (Darwin, 1859) vont réactualiser la polémique. Le débat, vif, s'organise autour du vœu émis par deux commissions de l'Académie des sciences (1861-1862 et 1865) d'en finir avec cette vieille histoire posée hors de la pensée. La controverse oppose Pasteur à Pouchet d'abord — qui vient de publier *Hétérogénéité ou traité de la génération spontanée* (1859) —, à Bastian ensuite. Pasteur aborde le problème avec prudence : « Je suis aussi prêt à déclarer, si l'expérience m'en avait imposé l'aveu, qu'il existe des générations spontanées que je suis persuadé, aujourd'hui, que ceux qui les affirment ont un bandeau sur les yeux. » Il multiplie les essais sur les coctions les plus diverses : infusions végétales, bouillons de viande, eau de levure, urine, sang. Avec les célèbres flacons à

col de cygne, il établit « que seules les poussières de l'air avec les germes qu'elles charrient », sont une condition de vie dans les infusions altérables. Puis il conclut, catégorique : « Dans l'état actuel de la science, la doctrine des générations spontanées est une chimère. » Et c'est publiquement qu'il dénonce l'hérésie. Les hétérogénistes se taisent. La réfutation inattaquable du dogme s'inscrit en cette fin de siècle dans un courant d'idées – et de faits – qui auront secoué définitivement de leur torpéur le corpus social (Commune de Paris) et scientifique (classification périodique des éléments de Mendeleev, lois de la génétique de Mendel, etc.)

La science des petits êtres...

Il y a un siècle que l'on sait que la moule comme le cheval sont issus d'animaux de même espèce ; que le même vient du même, que « rien ne peut venir de rien ». Rien : pas même l'invisible, grouillant, là, et révélé par les modifications ou les biotransformations qu'il induit : le lait surit et coagule, le moût fermente, la viande s'avarie, les légumes pourrissent, la blessure s'infecte, le cadavre pue. La Bible (IX, verset 20-21) rapporte, avec l'ivresse de Noë, la plus vieille fermentation connue de l'homme, avérée en Mésopotamie quelque soixante siècles avant J.-C. Avant que les micro-organismes ne soient « découverts » et conduits dans le champ du visible, la participation au développement de signes morbides, d'entités imperceptibles (le *contagium vivum*) fut à de multiples reprises suspectée par les médecins, témoins des grandes épidémies qui frappaient autant les corps que les esprits. La propagation des maladies contagieuses était le fait de germes disséminés, de « graines ou poissons malins ou de petits vers ailés » (von Hutten, 1519), de *seminaria*, d'*animalia quaedam minuta* (Fracastor, 1546), de *pestilens seminarium* (Van Diemerbrook, 1646) : ces bestioles pénètrent dans les corps qu'elles corrompent comme furent corrompus les corps d'où elles sortent : Kircher, au cours de l'épidémie de peste qui sévit à Rome en 1656, identifie, dans le sang des cadavres et dans l'intestin des mouches qui s'y posent et les sucent, des germes *morbi pestiferi semina* : « ce sont des vers subtils tellement fins qu'ils passent inaperçus » (Kircher, 1658). Quand on ne les voit pas, on les « invente » jusqu'à ce que, rendus visibles, ils soient tous, indifféremment et sans détour, accusés : « Les petits animaux que le microscope nous découvre causent de grandes maladies » (Andry, 1701) : c'est pourquoi Semmelweis (1844) affirmera, envers et contre tous, la contagiosité de la fièvre puerpérale : il incriminera la transmission de l'épidémie par les mains des internes et imposera, avant l'édition des règles d'asepsie, la désinfection par des solutés. Le germe causal, qu'il suspecte, est plus proche, il est vrai, des miasmes – les « particules cadavériques impondérables sont uniquement décelables par l'odeur » – que des agents pathogènes microscopiques identifiés par observations.

Après avoir découvert la dissymétrie moléculaire à l'œuvre dans les processus fermentatifs, après avoir éradiqué l'erreur qui occulta durant plusieurs siècles l'horizon des sciences de la nature, Pasteur va s'employer à percer l'opacité de la « matière vivante », à mettre à jour les lois qui en règlent le dessein, y compris dans ses manifestations les plus inattendues. Ces préalables étant posés, il mènera le combat sur deux fronts : contre les néomécanistes, qui veulent expliquer et produire la vie en ayant recours aux seuls procédés de la chimie ; contre les vitalistes qui postulent l'intervention d'un principe inaltérable. Dans la dispute sur les ferments qui s'ensuivit, Pasteur coupera court à de vains commentaires : il restituera à la matière vivante – comme il l'écrit lui-même – la « particularité singulière », irréductible à des forces occultes ou à de pures réactions chimiques. Matière vivante dont il affirmera, de plus, l'autonomie jusque et y compris dans les minuscules bestioles qui deviennent, chaque jour, un peu moins secrètes, un peu plus distinctes et singulières.

En cette fin du XIX^e s., véritable « Belle Époque » de la science des micro-organismes, la fonction longtemps subodorée des petits êtres est enfin comprise et acceptée. Naguère, les microbes faisaient peur : en quelques décennies ils seront traqués, recensés puis apprivoisés. En 1877, Koch isole le bacille responsable du charbon des ovidés et de l'anthrax de l'homme ; en 1880, Eberth reconnaît et cultive celui de la fièvre typhoïde, puis ce sera le tour, en 1884, du germe du tétanos par Nicolaïer, de l'agent de la dysenterie par Shiga en 1898, de la bactérie de la coqueluche par Bordet et Gengou en 1906. Période fructueuse. Longue litanie de germes pathogènes, nouveaux venus dans le champ de la connaissance, ils sont au goût du jour : on les voit – et on en parle – partout. Il n'en faudra pas plus pour que soit fondée, après l'énonciation de la théorie des germes, une science autonome des êtres microscopiques. La microbiologie devient par stricte étymologie la science d'observation puis la science expérimentale des microbes. Territoire des sciences de la vie, elle se donne pour objet l'étude morphologique, physiologique et génétique des micro-organismes. Pasteur (1888) annonce et salue ainsi sa création : « J'emploie de préférence au mot bactériologie dont l'étymologie me semble trop restreinte, l'expression de microbie ou microbiologie pour désigner cette science nouvelle qui, à peine née, s'impose aux méditations et aux travaux de la physiologie et de la médecine du monde entier. »

Le statut accordé aujourd'hui aux micro-organismes est sans équivoque, légitimant des positions divergentes dans l'échelle du vivant : quelle relation rassemble, en effet, bactérie et virus, protozoaire et prion ? Quelle mesure commune en règle les fonctions ? Ni les uns ni les autres ne sont des êtres vivants ou des entités « archaïques », frustes et rudimentaires non plus que des ébauches : un long cheminement évolutif les conduit à la « perfection » que nous leur reconnaissons. Ce terme n'englobe pas l'idée d'un progrès

vers un degré élevé mais plutôt la lente maturation de structures, qui les rendra plus aptes à la vie, c'est-à-dire capables de se multiplier et de s'adapter dans le lieu qu'ils occupent, dans leur *topos*, dans une niche, même peu ordinaire. Leur extrême petitesse et leur simplicité accordées à leur perfection nous contraignent à les rejeter d'emblée à l'obscurité des origines, puis à postuler des voies et des décisions évolutives qui n'ont ni la même durée, ni la même amplitude, ni la même portée que celles adoptées par les eucaryotes : elles les ont amenés à peupler les substrats les plus singuliers. Le jeu constant des contraintes de sélection, voire des menaces, qu'imposent les paramètres du lieu aux structures génomiques, détermine et explique leur complexité, leur diversité mais aussi leur propension à échapper aux barrières thérapeutiques (antibiotiques et antiviraux). Les événements moléculaires – remaniements, mutations et recombinaisons – dont l'ADN est constamment le siège, donnent de leur génome une image moins rigide (« fixiste ») que celle qui prévalait, il y a quelques années encore, où le gène était considéré comme une entité intangible. Depuis trois siècles les micro-organismes ont hanté notre imagination et notre pensée : ils sont devenus avec l'ère pastorienne nos « bêtes noires », nos plus mortels ennemis. Le sont-ils toujours ? La pandémie du sida et l'extension de l'encéphalopathie spongiforme bovine réveillent d'antiques épouvantes. À l'heure où l'homme s'imaginait être déjà, selon le vœu de Descartes, « maître et possesseur de la Nature », la mort extensive et inéluctable délivrée par ces « êtres » invisibles nous terrifie. Ont-ils déserté nos rêves pour, dorénavant, peupler nos cauchemars et inspirer nos délires ? L'interprétation que les biologistes ont donnée, ces dernières décennies, des processus à l'œuvre dans ces minuscules machines – composées de 1 500 protéines différentes et de quelques millions de molécules, résultat d'un « immense bricolage cosmique » (Jacob, 1996) – a été déterminante dans les progrès fulgurants accomplis par la génétique et la biologie moléculaire. Cette somme de connaissances récemment acquises, qui a amené, par ailleurs, la naissance puis le développement du génie génétique et des biotechnologies, a bouleversé à tout jamais, comme l'avait fait la physique quantique entre les deux guerres, la perception que nous avions du monde sensible. Comment alors éprouver l'entière singularité de ces organismes minuscules « doués de vie » ? Qu'est-ce que la vie ?... Suffit-il de la maîtriser et d'en infléchir le cours, comme de récents travaux nous y invitent, pour en comprendre le sens et la finalité ? Cette vision nouvelle élaborée à partir des petits êtres nous délivrera-t-elle de cette obsédante question...

► BALOWS A., TRUPER H.G., DWORKIN M., HARDER W. & SCHLEIFER K.H., *The Prokaryotes*, New York, Springer Verlag, 1992. – GARRITY G. M., WINTERS M. & SEARLES D. B., « Bergey's Manual Trust », www.msv.edu/bergeys/2001. – GIORDAN A., *Histoire de la biologie*, Paris, Lavoisier, 1989. – JACOB F., *La Logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970 ; « Émergence de la biologie moderne », *C.R. Acad. Sci. La vie*

des sciences, 1996, n° 13, p. 53-57. – LEEUWENHOEK A. van, *Collected Letters*, Amsterdam, Swets & Zeitlinger, 12 vol., 1939 à 1989. – PENSO G., *La conquête du monde invisible*, Paris, Dacosta, 1981. – PICHOT A., *Histoire de la notion de vie*, Paris, Gallimard « Tel », 1993. – PRESCOTT L., HARLEY J.-P. & KLEIN D.A., *Microbiologie*, Bruxelles, De Bocck, 2^e éd., 2003. – ROGER J., *Les Sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e s.*, Paris, Albin Michel, 1993. – WAINWRIGHT M. & LEDERBERG J., *History of Microbiology, Encyclopedia of Microbiology*, New York, Academic Press, 1992. – WHITTAKER R.H., « New concepts of kingdoms of microorganisms », *Science*, 1969, n° 163, p. 150-160. – WOESE C.R., KANDER O. & WHEELIS M.L., « Towards a natural system of microorganisms proposal for the domains Archaea, Bacteria and Eucarya », *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 1990, n° 87, p. 4576-4579.

Philippe BOUTIBONNES

→ Bactériophage ; Cellule ; Épidémie ; Génération spontanée ; Pasteur contre Pouchet ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Virus.

MIESCHER Johann Friedrich, 1844-1895

Titulaire de la chaire de physiologie de l'université de Bâle (1871) laissée vacante par son oncle, Wilhelm His, célèbre anatomiste et embryologiste, Miescher est l'auteur de la découverte de la fonction régulatrice du gaz carbonique dans la respiration, de l'importance des protéines dans la nutrition, ainsi que des mécanismes de la spermiogénèse du saumon du Rhin. Il est cependant principalement connu pour sa découverte des acides nucléiques (1868), composés chimiques riches en phosphore organique et formant le constituant majeur du noyau cellulaire. Ce dernier n'est pas, selon Miescher, « constitué d'innombrables espèces chimiques, mais de quelques-unes, de structure probablement extrêmement compliquée ». D'où l'inutilité de concevoir l'ovule, le spermatozoïde ou la cellule comme « une accumulation de substances chimiques dont chacune serait porteuse d'un caractère héréditaire donné », selon l'opinion des théoriciens de la pangénèse (De Vries et Darwin). Miescher explique en effet la multiplicité des caractères héréditaires par les changements de configuration spatiale (ou modulations stériques) d'un nombre limité de substances chimiques. La stéréochimie constitue par suite, aux yeux du même auteur, « la clef de la sexualité [et de l'hérédité] ». Il en conclut que l'arrangement des « atomes de carbone asymétriques des substances organiques [constituant] les "germes" de la pangénèse de Darwin [...] peut être modifié par la moindre cause ou le moindre phénomène d'origine extérieure, induisant toutes sortes de « fautes » [au sein de ce même arrangement] ». Conclusion valant elle-même comme explication de la production des variations ou caractères héréditaires faisant l'objet de la sélection naturelle. Sur le plan philosophique, Miescher s'oppose au vitalisme. Selon lui, la « tâche centrale et urgente » de la biologie est de « rendre l'humain conscient des innombrables processus par lesquels, à son insu, ses pensées, ses

sentiments et ses actes prennent naissance dans le *substrat matériel* de son existence ».

● L'ensemble des articles de Miescher et une sélection de ses lettres se trouvent dans l'ouvrage intitulé *Die histochemischen und physiologischen Arbeiten von Friedrich Miescher. Gesammelt und herausgegeben von seinen Freunden*, 1897.

► DE MEURON-LANDOT M., « Friedrich Miescher, l'homme qui a découvert les acides nucléiques », *Histoire de la médecine*, 15, 1965, 2-25. — GREENSTEIN J.P., « Friedrich Miescher, 1844-1895, Founder of Nuclear Chemistry », *Scientific Monthly*, 57, 1943, 523-532. — JAQUET A., « Professor Friedrich Miescher Nachruf », *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel*, 11, 1897, 399-417. — OLBRY R., « Miescher », *Dictionary of scientific Biography*, New-York, 1974, t. IX, p. 380-381.

ÉRIC HAMRAOUI

→ ADN ; Darwinisme ; De Vries ; Gène ; Stéréochimie.

MILL John Stuart, 1806-1873

Philosophe et économiste anglais. Le fils aîné de James Mill reçoit, dans la maison familiale de Londres et sous la seule autorité paternelle, une éducation soumise à une planification quasi disciplinaire. En 1823, à l'âge de dix-sept ans, renonçant à une carrière d'avocat à laquelle l'avaient préparé des études de droit, le jeune Mill entre à l'Est India Compagny où son père occupait un poste important ; il y travaillera jusqu'en 1858, l'année même de la mort de Harriet Taylor qu'il avait épousée en 1851. Il s'installe alors dans sa villa d'Avignon et y demeurera jusqu'à sa mort, à l'exception de la période 1865-1868 où il est élu député libéral au Parlement. Le pivot du système de Mill est la critique de l'intuitionnisme sous toutes ses formes. Cette critique se déploie, sur le plan épistémologique, dans le *Système de logique* (1843) et dans *La philosophie de Hamilton* (1865), véritables machines de guerre dirigées contre les fondements théoriques de l'intuitionnisme et qui, sur la base d'un empirisme radical, s'attachent à déjouer toute liaison de l'universalité et de la nécessité indépendamment de l'expérience. Le projet, dans son ambition même, est clairement affiché dans une lettre à Sterling de 1831 : « S'il est une science que je me sente capable de promouvoir, c'est bien, selon moi, la science de la science elle-même, la science de l'investigation, de la méthode. » Puisque, conformément à une certaine tradition « empiriste » qui remonte au moins à Hume, le cours de la nature n'offre, « au premier coup d'œil, qu'un chaos suivi d'un autre chaos », il s'agit de comprendre comment s'installe, néanmoins, à partir d'uniformités observées, la croyance en d'autres uniformités, comment on passe de là à la croyance en l'uniformité générale du cours de la nature et à la reconnaissance conjointe de l'universalité des relations de causalité. Mill promet de cette manière une logique inductive (l'induction étant définie comme « l'opération de l'esprit par laquelle

nous inférons que ce que nous savons être vrai dans un ou plusieurs cas particuliers sera vrai dans tous les cas qui ressemblent aux premiers sous certains rapports assignables ») qui, sans quitter le terrain de l'expérience, procède par généralisations successives dont la portée dépasse inévitablement les circonstances particulières initiales. Que ce mécanisme soit communément à l'œuvre dans la vie courante, c'est ce qui permet de garantir la survie de chacun ; en revanche, il appartient encore à la logique inductive, en tant qu'elle se veut méthode de recherche, de proposer un protocole expérimental qui permette de discerner, au sein de la complexité phénoménale, l'hypothèse explicative que l'on doit retenir. C'est à cet effet que Mill, reprenant à sa manière le protocole élaboré par Bacon, met en place les célèbres méthodes de concordance, de différence, des résidus et des variations concomitantes. Ces canons de la logique inductive permettent, entre autres, de corriger les généralisations grossières par des généralisations plus rigoureuses et de suggérer ainsi les conditions d'une induction scientifique. L'un des bénéfices, non négligeable, de l'opération serait de faire échec aux généralisations aventureuses des pseudo-sciences (l'astrologie par exemple) en confortant les généralisations confirmées par l'épreuve de l'expérience et en renforçant par là même le crédit de la loi de causalité qui, « bien qu'inférée par induction de lois particulières de causalité », se trouve être « plus certaine qu'aucune des lois dont elle a été tirée ».

● *The Collected Works of John Stuart Mill*, éd. J. Robson et al., Toronto/Londres, Routledge, 33 vol., 1936-1991. — *Système de logique* (1843), trad. fr. L. Peisse (1866), réimpr. Liège/Bruxelles, Mardaga, 1988. — *La philosophie de Hamilton* (1865), trad. fr. E. Cazelles, Paris, Germer Baillière, 1869. — *Autobiographie* (1873), trad. fr. G. Villeneuve, Paris, Aubier, 1993.

► BOSS G., *John Stuart Mill. Induction et utilité*, Paris, PUF, 1990. — FRONGIA G., *John Stuart Mill e il metodo scientifico*, Naples, Ed. Scientifique Italiana, 1984. — SKORUPSKI J., *John Stuart Mill*, Londres, Routledge, 1990.

Didier DELEULE

→ Éther ; Induction ; Méthode ; Précaution.

MODÈLE

Le terme « modèle » présente une grande variété d'usages dans les sciences, de la logique aux sciences de la nature et aux sciences de l'homme. De plus, à travers la diversité des usages et des domaines, le sens oscille entre concret et abstrait, figuration et formalisme, image et équation, échantillon et étalon, réalisation matérielle et norme abstraite. Paradoxalement, cette équivocité essentielle est le trait permanent à travers tout le large spectre des différents usages.

1) Le sens originaire est celui de « maquette », le latin *modulus* étant un terme d'architecture désignant la mesure arbitraire servant à établir des rapports de

proportion entre les parties d'un ouvrage. Par généralisation, « maquette » s'applique à toute matérialisation, en dimensions réduites ou grandeur nature, d'un dispositif architectural (édifice), mécanique (navire, avion) ou d'une autre nature (appareils électriques ou autres) dont ne sont reproduites, schématiquement, que les formes et propriétés reconnues essentielles au détriment des détails tenus pour accessoires. Une maquette est plus commodément soumise aux calculs, mesures et tests qui permettent d'améliorer la construction effective de l'objet ou du prototype correspondant. On trouve là, déjà, des caractéristiques générales des modèles, qui sont donc des réalisations ou des figurations utiles à l'avancement des connaissances et des technologies. Tout matériel qu'il puisse être, un modèle n'est pas un objet réel, mais un objet artificiel, qui appartient au registre de l'invention. C'est un intermédiaire entre une situation qui nous paraît énigmatique et les questions que nous posons pour tâcher de réduire l'énigme et comprendre la situation. Les modèles assument donc une fonction heuristique dans le processus de connaissance théorique ou technique. Dans cette fonction, René Thom observe que le modèle a un champ d'application qui dépasse largement la science et englobe des pratiques d'ajustement de nos moyens à nos buts et à nos désirs.

2) Un usage assez proche du précédent est celui qui a cours dans les amphithéâtres de physique et de biologie, où des processus naturels sont imités dans des conditions qui facilitent l'observation et l'étude. Ainsi les planétariums reproduisent la cinématique du système solaire en négligeant partiellement les proportions géométriques et en changeant sa dynamique : pour des raisons pratiques, on exagère les dimensions du soleil et des autres planètes par rapport à leurs distances et on remplace la gravitation comme moteur du système par un mécanisme artificiel comparable à celui d'une horloge. Autres exemples : la machine d'Atwood imitant la chute libre des graves sur une échelle de temps ralentie grâce à une forte réduction de la constante de gravitation ou un modèle de la circulation du sang où la force motrice du cœur est remplacée par une pompe.

3) La prédominance des modèles issus de la mécanique a pu inciter à associer à tout modèle une construction dans l'espace respectant la loi d'inertie, les lois du choc, les principes de conservation, etc. Mais l'expérience physique peut être structurée selon d'autres lois que mécaniques. « Modèle » reçoit alors un tout autre sens, celui de schéma théorique, non matérialisé en général, qui n'est pas censé reproduire fidèlement un phénomène, mais au contraire le simplifie suffisamment pour pouvoir l'analyser, l'expliquer (partiellement au moins) et en prédire (dans certaines marges) la répétition. Le modèle est un simple instrument d'intelligibilité sans prétention ontologique : il est aussitôt remplacé si l'on trouve un modèle meilleur. Ainsi les modèles d'un éther élastique, milieu de propagation des vibrations optiques, qui ont été rendus caduques par la théorie électromagnétique de la lumière, le modèle de Bohr pour

expliquer le comportement de l'atome, qui ne marche bien que pour l'atome d'hydrogène, etc. Plus généralement, toute expérience de pensée constitue un modèle en ce sens. Et même toute théorie constituée peut servir de modèle à la constitution d'une théorie nouvelle.

4) C'est en ce sens qu'il a été fait systématiquement usage de la notion de modèle au XIX^e s., du moins en physique. Comme le note S. Bachelard, cet usage conscient n'est pas contingent. La mécanique, bien établie, a servi de réservoir de modèles, mécaniques ou théoriques, aux nouvelles sciences : électrostatique, électrodynamique, thermodynamique, électromagnétisme, etc. À côté de sa fonction heuristique, le modèle assume une fonction de garantie, de justification et de norme d'intelligibilité des faits et idées nouveaux. En même temps apparaît très clairement ce qui est au fondement de l'activité de modélisation : l'analogie. Par « analogie physique, écrit Maxwell, j'entends cette ressemblance partielle entre les lois d'une science et les lois d'une autre science qui fait que l'une des deux peut servir à illustrer l'autre ». Qu'une théorie puisse en illustrer une autre, en vertu d'identités formelles (les mêmes formes d'équations différentielles ou aux dérivées partielles) suggère une notion de modèle assez large pour englober physique et mathématiques à la fois. D'ailleurs, la reconnaissance systématique de la polysémie d'une théorie advient d'abord en mathématiques, comme conséquence du développement de l'axiomatique, et elle n'a lieu ensuite en physique que grâce, précisément, à l'utilisation des concepts algébriques de groupe et d'invariance par tel ou tel groupe.

5) En mathématiques modèle s'emploie en deux sens nettement distincts et cependant corrélés, comme nous pouvons le pressentir déjà avec le texte de Maxwell et comme nous allons le montrer précisément. Le premier sens est caractérisé aujourd'hui de « logique », bien qu'il soit apparu de façon informelle en mathématiques, et d'abord en géométrie. On a construit en effet, à la fin du XIX^e s., des modèles euclidiens des géométries non euclidiennes (Beltrami en 1868, Klein en 1871-1873 et Poincaré en 1891), c'est-à-dire des espaces euclidiens vérifiant les axiomes des géométries lobatchevskienne et riemannienne respectivement. Ces modèles ont assumé la double fonction justificative et heuristique : ils ont servi à fournir un contenu intuitif aux nouvelles géométries et une preuve (relative) de leur cohérence tout en permettant des applications mathématiques nouvelles. Poincaré (1854-1912) notamment atteste de la fécondité de la géométrie de Lobatchevski pour l'intégration des équations linéaires. Ainsi, un modèle est une représentation concrète dans une théorie familière d'énoncés et de relations, qui sont d'abord perçus comme purement formels. Plus généralement, un modèle d'un ou plusieurs énoncés est un ensemble d'éléments quelconques vérifiant ou, comme on dit encore, satisfaisant ces énoncés et illustrant de ce fait la structure déterminée par eux. C'est l'attribution d'un sens déterminé à des entités *a priori* sans signification tel que les énoncés formels soient vérifiés. Si l'on rappelle

qu'« attribuer un sens » c'est « interpréter ». on voit qu'un modèle est une interprétation de ces énoncés dans laquelle ceux-ci sont vrais. La question du contenu mathématiquement viable et non vide d'un formalisme (entité, équation, théorie) cesse de se poser dès qu'on a un modèle de celui-ci. Ainsi on a cessé de discuter du bien-fondé des nombres imaginaires et de se demander s'ils étaient bien des nombres au même titre que les nombres entiers ou les nombres réels une fois trouvée pour ces entités (au début du XIX^e s.) une représentation par un couple de points du plan euclidien.

David Hilbert (1862-1943) généralisa l'usage de cette notion sémantique de modèle. En 1899, il systématisa dans *Les fondements de la géométrie* la technique de construction de modèles pour prouver la compatibilité ou l'indépendance mutuelle de certains axiomes. Ce faisant, il opère un décrochement important dans la compréhension de la notion de modèle. En effet, les modèles qu'il fabrique sont non pas des visualisations dans l'espace euclidien de théories plus abstraites ou moins familières mais des modèles formels, construits à partir de résultats algébriques ou arithmétiques assez abstraits. La structure de géométrie non archimédienne, par exemple, est réalisée (vérifiée) dans un modèle inimaginable sans tout un savoir sur les formes algébriques et sur les sommes de carrés.

L'algèbre et l'arithmétique permettent ici de valider une construction géométrique alors que traditionnellement c'était plutôt l'inverse, la géométrie euclidienne ayant toujours servi de cadre de représentation intuitive. Il en résulte l'idée moderne qu'une géométrie est un modèle d'un certain langage formel, plutôt que la formalisation de propriétés idéalisées à partir de l'observation de l'espace sensible. C'était bien, du reste, l'idée mise en œuvre par Felix Klein (1849-1925), dès 1872, dans la formulation du problème qui commande « le programme d'Erlangen » et aboutit à la classification des différentes géométries en fonction des groupes de transformations : « Étant donné une multiplicité et un groupe de transformations, quelles sont « les figures » (en un sens analogique) de la multiplicité, qui demeurent invariantes par les transformations du groupe ? » Une géométrie est donc un ensemble de sous-ensembles d'éléments (de « figures ») demeurant invariants par certaines transformations.

C'est là la racine de la définition logique du terme modèle fournie par la théorie des modèles, qui est l'étude systématique des relations réciproques entre ensembles E d'énoncés et ensembles M de modèles de ces énoncés. On appelle langage formel L du calcul des prédicats du premier ordre la donnée de trois collections disjointes de symboles : symboles de relations, de fonctions et de constantes. Une réalisation R de L est constituée par la donnée d'un ensemble non vide d'individus et d'une fonction d'interprétation qui associe un sens déterminé respectivement aux symboles de constantes, de relations et de fonctions. Un modèle M d'un énoncé E de L est une réalisation R (on dit aussi une interprétation) où E est vrai. Une théorie

mathématique spécifique (la théorie des groupes, la théorie des corps, la théorie des espaces vectoriels, etc.) est un langage formel interprété, et elle a généralement plusieurs modèles non forcément isomorphes, ainsi qu'on s'y est maintenant tout à fait habitué par familiarité avec les méthodes de l'Analyse classique d'un côté, de l'Analyse non standard de l'autre.

Le concept de modèle mathématique est souvent aussi utilisé en un deuxième sens, qui est le plus courant aujourd'hui et a donné lieu aux termes modernes de « modéliser » et de « modélisation ». Il désigne alors le processus inverse de celui que nous venons de décrire. Au lieu d'associer un sens déterminé et une illustration concrète à des symboles et énoncés formels, il consiste à associer à un phénomène empirique un schéma symbolique, figurant de manière partielle et simplifiée les propriétés reconnues principales du phénomène et facilitant aussi bien l'expérimentation que la construction d'une théorie le concernant. À son tour la théorie construite à partir du modèle peut être appréhendée comme un « modèle théorique », ainsi que le souligne M. Bunge. Modéliser c'est donc trouver les expressions mathématiques, les équations qui « simulent », c'est-à-dire représentent schématiquement et analogiquement un processus physique, biologique, psychologique, économique, social, etc. Un grand nombre d'observations peuvent être synthétisées par un nombre relativement petit de paramètres : un modèle est forcément réducteur. La modélisation est, depuis toujours, au cœur de la physique mathématique : une série de Fourier avec un nombre fini de termes non nuls, par exemple, est une modélisation des fonctions périodiques, qui sont des modélisations des phénomènes de vibration, de diffusion, etc. Elle s'est étendue aux autres sciences après la Seconde Guerre mondiale, avec le développement de la recherche opérationnelle et de la théorie des jeux, appliquées pour représenter et faciliter l'organisation d'opérations militaires, d'échanges économiques, d'activités administratives, de flux de circulation dans une ville, etc. Les modèles sont des instruments, imparfaits et réducteurs, mais efficaces d'analyse de la réalité. Dans certains cas, ils suppléent l'observation impossible : le retour au big-bang, par exemple, ne peut emprunter la voie expérimentale, mais seulement celle de la modélisation.

La modélisation, dont certains pensent qu'elle constitue une véritable révolution scientifique, a été rendue possible par le rapprochement physique et la collaboration de mathématiciens avec les physiciens, les ingénieurs, les biologistes, les psychologues, les sociologues, etc. La modélisation est au confluent de plusieurs sciences et nécessite une approche pluridisciplinaire des problèmes. Aujourd'hui elle est complétée par la simulation numérique et l'utilisation systématique d'images de synthèse. L'explosion informatique ainsi que les nouveaux paradigmes scientifiques apportés par la théorie des systèmes, la théorie des catastrophes, la théorie des fractals, la théorie du chaos, etc., ont favorisé la prolifération des modèles pour

l'analyse de systèmes d'organisation complexe, physiques (systèmes dynamiques) ou humains (mécanismes de développement économique et culturel).

Il est certain que la pluralité des modèles – la polysémie – d'une théorie est une chose et la pluralité des énoncés non équivalents pour modéliser un processus empirique une autre. Il n'empêche que les deux sens du concept de modèle ne sont que les deux faces complémentaires d'une même activité : interpréter. C'est pourquoi les glissements, qui sont fréquents mais rarement et pour ainsi dire jamais explicitement assumés, d'un sens à l'autre sont parfaitement légitimes. D'autant plus qu'il est fréquent que des modèles sémantiques d'un formalisme soient des modèles théoriques d'un processus empirique. Interpréter est inélectable, qu'il s'agisse d'interpréter un formalisme, ou inversement d'interpréter mathématiquement un ensemble de données. D'une part, parce qu'un langage qui n'aurait pas de modèle n'a aucun intérêt, d'autre part et réciproquement, parce que l'expression n'est pas le miroir de l'expérience : « Nous ne pouvons prononcer une seule phrase qui traduise un pur fait d'expérience... toute traduction de l'expérience par des mots nous oblige à aller au-delà de l'expérience », comme le soulignait judicieusement Boltzmann. Aussi existe-t-il plusieurs manières défendables de concevoir ou d'expliquer le monde, plusieurs modèles du monde. On parle alors de « sous-détermination empirique » des théories, phénomène réciproque de leur polysémie. L'une et l'autre caractéristiques impliquent une philosophie non réaliste de la science. Comme y insiste B. van Fraassen, notre discours, en particulier lorsqu'il traite de causalité et de nécessité, porte sur nos modèles du monde, plutôt que directement sur le monde.

En résumé, sous quelque aspect qu'on le prenne, un modèle fait toujours fonction de médiateur entre un champ théorique dont il est une interprétation et un champ empirique dont il est une formalisation. Sa double face abstraite-concrète le rend apte à remplir le double rôle d'illustration et de support de preuve d'une part, de paradigme et de support d'analogies d'autre part. Un modèle est à la fois la concrétisation opérationnelle d'analogies constatées ou supposées entre des domaines distincts et le terrain expérimental sur lequel peuvent naître de nouvelles analogies. L'efficacité cognitive, heuristique, prédictive et décisionnelle, ou comme on dit d'un terme générique la « pertinence » d'un modèle, ne peut être évaluée indépendamment des objectifs qui lui sont assignés, des stratégies de recherche, de décision et de planification dont il est l'instrument et qui dépendent elles-mêmes des lignes de force du champ socio-politique où elles sont définies.

► BACHELARD S., « Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles », *Élaboration et justification des modèles*, éd. P. Delattre & M. Thellier, Paris, Maloine, 1979, p. 3-19. — BRISAUD M., FORSÉ M. & ZIGHEB A., *La Modélisation, confluent des sciences*, Paris, Éd. du CNRS, 1990. — BUNGE M., « Les Concepts de modèle », *L'âge de la science*, n° 3, juil.-sept. 1968, p. 165-180. — DELATTRE P. &

THELLIER M. éd., « Modélisation et scientificité », *Élaboration et justification des modèles*, Paris, Maloine, 1979, p. 21-29. — FREUDENTHAL H., *The concept and the role of the models in mathematics and natural sciences*, Dordrecht, Reidel, 1961. — KLEIN F., *Le programme d'Erlangen*, texte all. dans les *Mathematische Annalen*, 43, 1893, p. 63-100 (trad. fr., réimpr., Paris, Gauthier-Villars, 1974). — POINCARÉ H., *La Science et l'hypothèse* (1902), rééd. Paris, Flammarion, 1968, chap. III et IV. — SINACEUR H., *Corps et modèles*, Paris, Vrin, 1991, 4^e partie. — TARSKI A., « Contributions to the theory of models », *Collected papers*, III, Birkhäuser, 1986. — TARSKI A., MOSTOWSKI A. & ROBINSON R.M., *Undecidable theories*, Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 1953 (« A general method in proofs of undecidability », chap. I). — THOM R., *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Paris, UGE, 1974. — VAN FRAASSEN B., *Laws and symmetry*, Oxford Univ. Press, 1989 (trad. fr. C. Chevalley, Paris, Vrin, 1995). — WALLISER B., *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*, Paris, Le Seuil, 1977. — Coll. : Article « Modèle » de l'*Encyclopaedia Universalis*. — « La Sémantique du terme modèle », *La Sémantique dans les sciences*, colloque de l'Académie internationale de philosophie des sciences, Paris, Beauchesne, 1978, p. 158-172.

Hourya SINACEUR

→ Complexité ; Référentiel ; Structure ; Théorie.

MOLE

La mole est la septième unité de base du système international d'unités. En 1971, elle a été officiellement définie avec la grandeur *sui generis* qu'elle mesure, la quantité de matière, comme « la quantité de matière d'un système qui contient autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes de carbone dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». Quand la mole est utilisée, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, ou d'autres particules ou des groupes spécifiés de telles particules (*Le Système International d'unités* [SI], 1991, 6^e éd., BIPM, Sèvres). Cette définition présuppose une spécificité de la chimie qui traite d'une infinité de substances. Lorsqu'en 1687 Newton, dans la première « Définition » des *Principia*, désigne « la quantité de matière par les mots de corps ou de masse », il n'indique pas que la nature du corps doit être spécifiée. Newton définit des concepts pour la physique. En 1874, Van't Hoff, dans ses *Études de dynamique chimique*, note qu'une différence importante entre l'étude d'un équilibre physique et l'étude d'un équilibre chimique est « l'étonnante diversité des phénomènes chimiques ». Il s'ensuit qu'« en général la simplicité est moins grande, c'est pour cela que le terme de "système" a dû être substitué à celui de "corps" ». En conséquence, la masse ne convient plus pour donner la composition de ce système, il faut utiliser une quantité moléculaire. L'introduction des mesures physiques en chimie impose celle d'une unité, pour exprimer leurs résultats, qui lui soit spécifique.

Van't Hoff travaille dans les pas de Friedrich Horstmann et applique les lois de la thermodynamique aux

transformations chimiques. Il a démontré qu'une substance en solution infiniment diluée, qu'il appelle idéale, se comporte comme un gaz parfait. Une solution est définie par la concentration des substances qu'elle contient. Dans l'étude expérimentale quantitative des solutions, les résultats des mesures ne sont exploitables que si la concentration est exprimée non pas en grammes par litre mais en quantité moléculaire, à savoir « le poids moléculaire exprimé en kilogramme dans le mètre cube ». Van't Hoff utilise les unités du système métrique qui se met en place, alors que ses contemporains vont plutôt mesurer cette concentration en poids moléculaire exprimé en grammes par litre, ce qui est rigoureusement identique à la proposition de Van't Hoff. L'expression du poids moléculaire, grandeur sans dimension à laquelle on accole une unité de masse, prend le nom de molécule-gramme. En 1883, Alexander Crum Brown, dans l'article « Molecule » de l'*Encyclopædia Britannica*, présente la molécule-gramme comme nécessaire pour exprimer « la constitution actuelle de la matière ». La molécule-gramme définie par C. Brown doit rendre compte « du très grand nombre de molécules réelles », supposé mais indéterminé et des « poids moléculaires confirmés par les moyens chimiques ».

Au tournant du XIX^e et du XX^e s. le poids atomique relatif, grandeur sans dimension, devient molécule-gramme, molécule-livre ou molécule-tonne, selon que l'on a adopté le système métrique ou le système anglais, selon que l'on travaille dans un laboratoire ou dans une usine chimique. En 1893, Wilhelm Ostwald, lassé par la lourdeur et la diversité de ces termes mais conscient de l'utilité du concept, écrit dans son *Hand-und Hilfsbuch* : « Nous appellerons de façon générale "Mol" le poids en grammes numériquement égal au poids moléculaire d'une substance donnée. » En 1902, Alexander Findlay, traduisant les ouvrages d'Ostwald en anglais, fait apparaître « mole » avec cette graphie, de manière à conserver la prononciation allemande. C'est l'orthographe qui perdurera.

La mole ainsi définie est une unité mais que mesure-t-on en moles ? Les physico-chimistes travaillent à l'échelle macroscopique mais leur but est de « connaître les relations entre la constitution et les propriétés chimiques ». Van't Hoff pose comme principe au début des *Études* : « La marche d'une transformation chimique est caractérisée uniquement par le nombre de molécules, dont l'action mutuelle produit la transformation. » Le nombre de molécules qui réagissent à l'échelle microscopique est proportionnel au nombre de moles que le chimiste a mises dans l'éprouvette. Son facteur de conversion est la molécule-gramme qui va être rebaptisée masse molaire. Pendant plus d'un demi-siècle « le nombre de moles », un ersatz de grandeur, va servir à exprimer la « quantité de matière » d'un corps pur dans une réaction. Au niveau théorique, il est la variable chimique qui intervient dans l'expression du potentiel chimique défini par Gibbs (1876-1878) et du degré d'avancement d'une réaction défini par De Donder (1920). Mais en 1913, Jean Perrin

a déterminé le nombre de molécules-particules que contient une molécule-gramme de corps pur. La mole n'est-elle plus dès lors qu'un nombre de molécules ? Dans ce cas, du point de vue métrologique, elle ne peut être l'unité de mesure d'une grandeur physique ; une mise en cohérence avec le système international d'unités, qui se construit, s'impose.

En 1901, Giovanni Giorgi a proposé d'ajouter au système « c.g.s. » (centimètre, gramme, seconde), une quatrième unité de base – l'ampère –, pour les mesures électriques. En 1960, faisant suite à l'idée de Giorgi de définir un système dont les unités de base sont le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère (MKSA), le système international d'unités (SI) est adopté par la 11^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM). Un an après, physiciens et chimistes s'entendent pour adopter l'isotope 12 du carbone comme élément de référence dans la détermination des valeurs des poids atomiques. Les travaux du métrologiste allemand U. Stille et du thermodynamicien anglais E.A. Guggenheim sur le concept d'une grandeur chimique aboutissent. En 1957, Stille a proposé la définition d'une unité de mesure pour la chimie à la commission SUN (Symboles Unités Nomenclature) de l'UAP (Union internationale de physique pure et appliquée) qui l'a communiquée à la Commission de chimie physique de l'UAP (Union internationale de chimie pure et appliquée). À la demande de ces instances internationales, en 1971, la quantité de matière fut introduite par la 14^e Commission internationale des poids et mesures (CIPM).

La durée d'un siècle environ qui sépare l'idée initiale d'Hortsmann d'une quantité moléculaire, de la mole unité de base du SI met en évidence la difficulté de donner le résultat d'une mesure en chimie. En mathématique, mesurer une grandeur c'est lui associer un nombre [$x = 3$]. En physique mesurer une grandeur c'est lui attribuer un nombre multiplié par une unité [$l = 3 \text{ m}$]. En chimie mesurer une grandeur c'est lui associer un nombre multiplié par une unité suivie du nom de l'entité impliquée dans la mesure [$n(\text{S}) = 3 \text{ moles}$ (d'atomes de soufre)] (UAP, 1993, p. 41). L'entité est caractérisée par une formule qui indique sa composition stoechiométrique. On peut ainsi exprimer la mesure de toutes les substances chimiques. La molécule-gramme avait permis l'introduction des mesures physiques en chimie, la définition de la mole, comme unité de base du SI, permet la mise en conformité des mesures chimiques avec les règles de la métrologie.

► CRUM BROWN A., *Encyclopædia Britannica*, 9^e éd., 1883, 16, 610-623. – DEBOER J., « On the History of Quantity Calculus and the International System », *Metrologia*, 32, 1994-1995, 405-429. – GUGGENHEIM E.A., « Units and Dimensions », *Phil. Mag.*, 33, 1942, 479-496 ; « The mole and related Quantities », *J. of Chem. Educ.*, 38, 1961, 86-87. – MACGLASHAN M.L., *Physicochemical Quantities and Units*, 2^e éd., Londres, Royal Institut Chemistry, 1971 ; « Amount of Substance and the Mole », *Metrologia*, 31, 1994, 447-455. – STILLE U., « Avogadro's Constant, Loschmidt's Constant, and the Mole », *Nuovo Cimento*, suppl. vol. VI, 1957, 186-223.

– Coll. : UAP, *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, éd. I. Mills, T. Cvitas, Homann, N. Kallay & K. Kuchitsu, Oxford, Blackwell Scientific Publ., 1993.

Christiane BUES

– Avogadro (Loi d') ; Avogadro (Nombre d') ; Chimie physique ; Molécule.

MOLÉCULE

On appelle « molécule » la plus petite quantité de matière qui peut exister à l'état libre, par opposition à l'atome, qui est la plus petite quantité de matière qui peut entrer dans les combinaisons chimiques. Étymologiquement, atome et molécule se distinguent par le fait que seul le premier est tenu pour indivisible, la notion de molécule (de *moles*, qui signifie « petite masse ») ne comportant aucune prémisses relative à l'indivisibilité. Mais cette distinction est restée sans effet pendant des siècles, car il était impossible dans la pratique de montrer l'indivisibilité desdits atomes. Jusqu'au XIX^e s., les termes « atome » et « molécule » s'utilisent indifféremment.

La philosophie corpusculaire

Pour la théorie corpusculaire, les molécules ou atomes sont les principes immédiats des corps sensibles, les petites corpuscules, aussi petites qu'on peut les imaginer, dont sont formés les corps. Cette hypothèse est suffisamment générale pour expliquer grand nombre de phénomènes physiques : la cristallisation, par exemple, était attribuée au groupement des molécules d'un corps qui se trouvaient suspendues dans un liquide ; le passage de l'état liquide à l'état de vapeur s'expliquait en admettant que leurs molécules s'écartent à cause de l'interposition de la calorique, fluide élastique responsable des phénomènes de la chaleur. Pourtant, l'identité de ces molécules échappait totalement aux physiciens, et tout ce qu'ils pouvaient dire sur leur forme et leurs dimensions n'était que pure spéculation.

Jusqu'à la distinction entre atome et molécule au milieu du XIX^e s., la théorie corpusculaire explique la transformation qualitative de la matière par la considération du rapport entre les corps d'origine et les produits de cette transformation. Le changement qualitatif est décrit en termes des relations simple-composé et constituant-constitué. L'explication des phénomènes chimiques en ces termes est très ancienne. Dans l'Antiquité, Épicure reconnaît l'existence des corps « composés (σύνκριστοις) » et d'autres dont les composés sont constitués ». Vers la fin du XVI^e s., le médecin et chimiste Daniel Sennert préfigure une théorie de la transformation de la matière par décomposition et recomposition. Selon lui, « les corps naturels consistent de ce à quoi ils peuvent se décomposer ». Il conçoit le mécanisme de réaction en deux phases, qu'il appelle respectivement *diacrisis* et *sincrisis* (1619) :

d'abord, les corps se séparent en *minimae particulae* ; ces dernières se réunissent ensuite pour former un nouveau corps.

Le mot « molécule » apparaît au XVII^e s. Pour Pierre Gassendi, les « molécules », qu'il appelle aussi « semences des choses » (1637), se situent à un niveau intermédiaire entre les atomes, inaccessibles à l'analyse, et les corps sensibles (*res concretæ*). La théorie moléculaire de Gassendi est plus proche de la théorie épicurienne des corps composés que de l'atomisme de Démocrite. Le mot « molécule » est employé en Angleterre par Walter Charleton (1620-1707) en 1654. Robert Boyle l'emploie dans *The origin of forms and qualities* (1772) en concurrence avec les termes « particules » ou « corpuscules », qu'il regarde comme les « principes immédiats » des corps naturels (terre, eau, sel), eux-mêmes formés par l'assemblage des *minima naturalia*. En France, le gassendiste François Bernier (1625-1688) n'emploie pourtant pas ce nouveau terme, mais ceux de « petite masse », « petit tas », ou « semence des choses ». Stahl attribue la fermentation au « mouvement de nombreuses molécules composées de sel, d'huile et de terre » (*Zymotechnia*, 1697). Newton explique l'expansibilité de l'air en attribuant « aux molécules une force répulsive qui les oblige à se fuir l'une l'autre » (*Optiks*, 1704).

Au XVIII^e s., le mot « molécule » devient d'usage de plus en plus courant. Il désigne « une petite masse quelconque » (Venel, Lavoisier, Desaguliers, Van Musschenbroek), en concurrence avec des termes plus usités, comme « particule » ou « corpuscule ». Dans certains cas, il est suivi d'un adjectif qui spécifie son sens, telles les « molécules séminales » de Maupertuis (1754), les « molécules organiques » de Buffon et les « molécules intégrantes » d'Hauy. Cette expression apparaît déjà dans le *Dictionnaire* de Macquer (1766). Selon lui, les molécules primitives intégrantes ou simplement molécules intégrantes d'un sel sont les plus petites particules qu'on peut imaginer qui possèdent les propriétés de ce sel et qui ne peuvent plus se diviser sans que l'atome de l'acide et l'atome de l'alcali qui le constituent ne se séparent. La molécule intégrante est donc l'unité minimale d'un corps composé.

Le terme est repris par Romé de l'Isle qui, dans son *Essai de cristallographie* (1773), ajoute l'idée de « forme primitive », polyèdre que possèdent en commun tous les cristaux de la même substance. Indépendamment de Romé de l'Isle, le concept de « forme primitive » est aussi développé par le chimiste et minéralogiste Tobern Bergmann. Les travaux de Bergmann et de Romé de l'Isle ont inspiré l'abbé Hauy qui, dans ses ouvrages, élabore une théorie de structure pour les cristaux où il reprend les termes « molécule intégrante » et « forme primitive » et s'attache à établir les rapports géométriques de l'une à l'autre. Pour Hauy, même forme géométrique de la molécule intégrante implique même composition chimique et inversement (théorie des espèces minérales fixes), idée mise en cause sous peu par la découverte des cristaux isomorphes. Hauy tentera en vain de la sauver, malgré les

preuves contraires apportées par Berzélius et autres minéralogistes.

Atome et molécule

Au XIX^e s., avec le développement de la théorie atomique de John Dalton (1808) et celle de Jacob J. Berzélius (1813), l'atome entre en force en chimie. Dans les mémoires des chimistes, le mot s'emploie pour désigner les particules des corps qui forment les combinaisons. L'atome est aussi l'unité chimique propre à traduire la composition chimique, en concurrence avec les termes « équivalent » ou « proportion ». On disait, par exemple, que « le carbonate de baryte (27.4) est composé d'un atome de base (19.1) et de 3 atomes d'acide (8.3) » (Boussingault, 1825) ; que « l'hyposulfite de strontiane est formé d'un atome ou proportion de base, de 2 atomes de soufre, 2 d'oxygène et 5 d'eau » (Gay-Lussac, 1820). La molécule, en revanche, s'emploie le plus souvent pour décrire un phénomène physique, par exemple le transfert de la chaleur. Seuls Avogadro et Ampère, à vrai dire physiciens plus que chimistes, emploient encore ce terme dans un contexte chimique. Dans le sens où l'utilisait Macquer, c'est-à-dire composé d'atomes, le mot « molécule » est évacué de la chimie et remplacé, dans les théories de Dalton et de Berzélius, par les termes d'« atome composé ».

En 1833, Marc Antoine Gaudin tente de rétablir l'usage du mot molécule dans le langage de la chimie tout en reconnaissant le besoin de clarifier son sens. Il attribue les difficultés de la théorie atomique à ce qu'il n'y avait pas jusqu'alors une distinction tranchée entre les mots atome et molécule. Gaudin propose la définition suivante : « Un atome sera pour nous un petit corps sphéroïde homogène, ou point matériel essentiellement indivisible, tandis qu'une molécule sera un groupe isolé d'atomes, en nombre quelconque et de nature quelconque. » Mais son propos n'a pas été suivi. Seuls quelques chimistes, comme Auguste Laurent (1846) et Charles Gerhardt (1854), adoptent la définition de la molécule comme un groupe d'atomes. La distinction actuelle entre atome et molécule date de la fin des années 1850. En 1858, Stanislas Cannizzaro prend pour guide les densités gazeuses pour définir les poids moléculaires, puis il en déduit les poids atomiques. Au même moment, la physique de Clausius et de Maxwell offre une définition dynamique de la molécule. Physiciens et chimistes s'accordent ainsi pour appeler molécules les particules gazeuses tenues à distances égales. Les atomes seraient donc des constituants des molécules. La distinction entre atome et molécule s'imposera progressivement, même si les chimistes de l'ancienne génération continuent parfois à utiliser le mot atome pour les corps composés (J.B. Dumas, 1881).

Regardés avec le recul, les progrès des années 1850 montrent que pour arriver à établir la théorie atomique telle que l'admet la chimie classique il fallait suivre la marche inverse de celle qui fut adoptée au départ. Dans

le système de Cannizzaro, tout comme dans la physique de Clausius, c'est le concept de la molécule qui est défini en premier. Les densités gazeuses sont proportionnelles aux poids moléculaires. Les molécules sont les particules tenues à distance égale dans un gaz. La molécule est l'entité sur laquelle il faut appliquer l'hypothèse d'Avogadro. L'atome se définit à partir de la molécule, comme constituant de celle-ci. C'est donc tout le contraire de la démarche de Gaudin qui, en 1833, était parti de l'atome pour définir la molécule.

Molécules et structure chimique

La découverte des corps isomères (le mot est introduit par Berzélius en 1830), nombreux surtout en chimie organique, a montré que les propriétés chimiques d'un corps ne dépendent pas seulement de sa composition et qu'il fallait aussi tenir compte de l'arrangement des atomes dans la molécule. En comparant certains corps et leurs dérivés (par exemple, alcool et éther), les chimistes proposent pendant les années 1830 et 1840 de nombreuses théories de « constitution », c'est-à-dire des théories sur le groupement des atomes dans la molécule (théorie de l'étherine, théorie des types, théorie des « noyaux », théorie des substitutions, théorie des radicaux organiques). Un seul corps peut ainsi se représenter par plusieurs « formules rationnelles » (l'expression est utilisée par Berzélius en 1834), selon qu'il s'écrit suivant telle ou telle théorie de constitution.

Les théories sur l'arrangement des atomes dans la molécule subissent une considérable évolution avec l'émergence de la théorie de la valence, établie dans les années 1850 par les travaux d'A. Williamson, E. Frankland, W. Odling et A. Wurtz. En 1857-1858, l'Allemand A. Kekulé, et indépendamment l'Écossais A.S. Couper qui travaille dans le laboratoire de Wurtz, établissent la tétravalence du carbone et la liaison carbone-carbone, deux découvertes fondamentales à la base de la théorie de la structure en chimie organique. En 1865, Kekulé propose la formule hexagonale du benzène. Dans les années qui suivent, la chimie du carbone va connaître un grand essor avec des retombées industrielles, grâce à la synthèse des composés aromatiques. Cependant, la question de savoir si la valence ou atomicité des atomes est constante soulève encore des controverses. Contre Kekulé, qui défend la théorie de l'atomaticité absolue, Wurtz pense que chaque élément possède une atomicité relative, qui dépend de l'autre élément auquel il est associé dans la combinaison. Le débat ne sera pas tranché avant que le concept de valence ne soit redéfini sur une base théorique nouvelle après la découverte de l'électron.

L'expression « structure chimique » est utilisée par le chimiste russe A.M. Butlerov en 1861 pour désigner l'arrangement des atomes dans la molécule tel qu'il peut être connu par les propriétés chimiques d'une substance. Mais le phénomène de l'isométrie optique restait encore sans explication. En réponse à ce problème, le Français J.A. Le Bel et le Hollandais

J.H. van't Hoff proposent en 1873, indépendamment l'un de l'autre, la théorie dite du carbone asymétrique. Avec Alfred Werner, au début de ce siècle, la stéréochimie fait son entrée dans le domaine de la chimie minérale (théorie des complexes).

Une autre classe de molécules, les molécules géantes, est soupçonnée depuis le XIX^e s. Le phénomène de la polymérisation est pressenti par Berthelot (1863), au cours de ses travaux sur l'isomérisation et par Bouchardat (1879), qui étudiait le caoutchouc. Le XX^e s. voit l'essor de la chimie des macromolécules, dans le domaine de la biologie (enzymes, ADN) et de la chimie organique (matières plastiques, fibres, caoutchoucs). Le concept de macromolécule est élaboré par le chimiste allemand Hermann Staudinger (prix Nobel de chimie, 1953) en 1922. Mais la théorie des colloïdes au début du XX^e s. niait l'existence des macromolécules. Elle affirmait que les colloïdes sont formés par la réunion de molécules élémentaires de petite taille. L'existence des macromolécules a pu être démontrée grâce au développement des nouvelles techniques de la biologie moléculaire permettant de mesurer avec grande précision la masse moléculaire. L'ultracentrifugation, mise au point par Theodor Svedberg (prix Nobel 1926) à l'université d'Uppsala en 1924, est aujourd'hui une technique courante pour la détermination des masses moléculaires des protéines.

► BLOCH O.R., *La philosophie de Gassendi. Nominalisme, matérialisme et métaphysique*, La Haye, Martinus Nijhoff, 1971. — KANGRO H., « Daniel Sennert », *Dictionary of Scientific Biography*. — MAUSKOPF S.H., « Crystals and Compounds », *Trans. Amer. Chem. Soc.*, 66, 1976, 1-82. — MORANGE M., *Histoire de la biologie moléculaire*, Paris, La Découverte, 1994. — ROCKE A.J., *The Quiet Revolution. Hermann Kolbe and the science of organic chemistry*, Univ. of California Press, 1993, chap. 7. — USSELL C.A., *The History of Valence*, Leicester Univ. Press, 1971.

Catherine KOUNELIS

→ Atome ; Avogadro (Loi d') ; Chimie physique ; Cristal ; Entropie ; Gaz (Théorie des) ; Matière [physique] ; Mole ; Pasteur contre Pouchet ; Stéréochimie ; Synthèse ; Valence.

MONISME

Le terme de monisme, en philosophie des sciences, désigne tout principe d'explication de la matière ou de l'esprit par une cause unique. Christian Wolff forge le vocable de monisme par opposition au dualisme qui défend la thèse d'une distinction réelle des substances. Dans ses *Petits écrits philosophiques*, à propos du dogmatisme il différencie le monisme matérialiste du monisme idéaliste.

Le monisme a une fonction épistémologique : il justifie d'entretenir des rapports étroits entre la philosophie et les sciences en supposant aux secondes des causalités suffisantes pour fonder la première. Qu'il s'agisse de la physique de l'atome, de la chimie des substances, de l'électricité, du neurone, de la molécule,

le recours à un élément naturel sert à construire la légitimité du monisme.

La totalité dans le monisme scientifique est fondée sur la mise en paradigme d'un élément naturel. Le monisme atomistique repose sur des notions de continuité, de cohérence, de cohésion de tension et de mouvement tonique. Cette tendance à l'unification dans le domaine physique et cosmologique se retrouve dès l'apparition de la thermodynamique et de l'électromagnétisme.

La référence au monisme est présente dans les théories suivantes : une théorie de l'identité (comme celles de J.J.C. Smart ou H. Feigl), une théorie matérialiste de l'esprit (comme celle de D.M. Armstrong), une théorie béhavioriste (comme celle de Skinner), une théorie analytique (comme celle de R. Carnap), une théorie fonctionnaliste (comme celles de H. Putnam ou J. Fodor) ou enfin une théorie computationnelle.

Le monisme du physicalisme

Sous l'influence de M. Hall et de J. Müller, cette école réunit Helmholtz, Virchow, Brücke, Ludwig et Du Bois-Reymond. A travers le modèle physico-chimique la psychologie devient une science analytique. La méthode consiste à décomposer et à comprendre les articulations de la syntaxe phénoménale afin d'analyser le processus dynamique d'association et d'intégration des propriétés des corps.

Dans son ouvrage *le Manuel de physiologie humaine* J. Müller (1801-1858) formule la théorie de l'énergie spécifique des nerfs : ainsi il incline vers une théorie nativiste de la perception en accordant aux récepteurs sensori-moteurs une valeur constitutive dans la représentation du réel. Dès les années 1840 en Allemagne se forme la Berliner Gesellschaft autour de la trilogie Helmholtz-Brücke-Du Bois-Reymond. La charte commune des physiciens et des physiologues date de 1845, même si Du Bois-Reymond en formule le serment avec Brücke dès 1842. Le postulat réductionniste s'exprime à travers 4 thèses : 1) il n'y a de forces, c'est-à-dire de manifestations matérielles (en vertu de l'équivalence force-matière) que physico-chimiques ; 2) contre le vitalisme, seules les forces physico-chimiques agissent dans l'organisme ; 3) l'étude de ces forces physico-chimiques est la seule tâche scientifique ; 4) le principe de la réduction de la méthode physico-chimique s'imposerait face à des modalités jusque-là reconnues comme non réductibles.

Helmoltz (1821-1894), en 1847, publie *De la conservation de l'énergie* où il fait passer le principe de la conservation de l'énergie de Mayer du domaine de la physique à celui de la physiologie. Ses travaux portent sur la vitesse de propagation de l'influx nerveux, la vision et l'audition. Cette dynamique énergétique repose sur une différence de degré qui assure une continuité causale. L'énergétisme est donc le moyen pour la psychophysiologie de se développer sur une base scientifique. Brücke, animateur de la Société berlinoise de physique dans les années 1845, va aussi contribuer à cette extension de la physique dans la physiologie. Les

organismes sont considérés comme des systèmes physico-chimiques ; comme le souligne Assoun (1981) trois étapes caractérisent le modèle brückien : l'anatomie est le terrain analytique ; le travail d'observation est mis en rapport avec la vérification de la théorie génétique du système nerveux ; l'affinement du procédé d'investigation est déterminant. Émile Du Bois-Reymond (1818-1896) est lui aussi élève de Müller. Il est le premier, en 1843, à avoir démontré que l'effet nerveux était en réalité un phénomène électrique. Comme électrophysiologiste, Du Bois-Reymond eut l'idée qu'un mode de transmission chimique intervenait dans la signalisation nerveuse en complément d'une propagation électrique. Il y a désormais une double explication des phénomènes : l'une va développer l'électrophysiologie, l'autre la psychoneuropharmacologie par le vecteur physico-chimique.

Monisme et cybernétique

L'invention du système formel est due en 1903 à Gottlob Frege (1848-1925) dans son livre *Les Lois fondamentales de l'arithmétique*. À partir des travaux de G. Frege, B. Russell (1872-1970), D. Hilbert (1862-1943) et A. Tarski (1901-1983), on dispose d'une notion précise de système formel, c'est-à-dire d'un ensemble d'axiomes et de règles de déduction. La traduction technologique du système formel va produire en 1936 la machine informatique. Alonzo Church (né en 1903), associé à Alan Mathison Turing (1912-1954), affirme que tout calcul peut être exécuté par la machine universelle de Turing convenablement programmée. Tout comportement humain est désormais analysable comme une application de règles formelles. Il peut être simulé par un ordinateur. Durant l'été 1935, A.M. Turing définit dans ces contributions le schéma théorique et abstrait d'une « machine universelle » en montrant que toutes les machines numériques pouvaient y être simulées. Il introduit en particulier la notion d'automate abstrait dont les constituants sont les états internes, la tête de lecture, le programme, la mémoire.

À la fin de 1944 le mariage de la neurophysiologie et de la mathématique s'effectue au sein de la Société téléologique par la rencontre de H. Aiken (le père de l'ordinateur Mark I conçu à l'université de Harvard), de N. Wiener, de W. MacCulloch, de W. Pitts et de J. von Neumann. Les travaux de J. von Neumann servent de références à l'élaboration de cette théorie neurocybernétique du cerveau. J. von Neumann, même si la différence quantitative existe, établit une analogie de structure dans les principes de la mémoire. En décrivant la structure logique du système nerveux, il le conçoit comme le fonctionnement d'un des automates complexes. Il convient du caractère différent du langage utilisé par le système nerveux central et du langage des mathématiques qui ne parvient qu'à fournir une donnée statistique des états neurobiologiques. Sans renoncer au modèle mathématique de la structure logique du système nerveux central, ce texte exprime la

limite de l'arithmétique pour modéliser le cerveau à partir de ces unités, processus et fonctionnement. Il faudra attendre la reprise des travaux de W. Pitts et W. MacCulloch (1947) sur les manières dont un réseau pouvait effectuer des tâches de reconnaissance des formes.

- ARMSTRONG D.M., *A materialist theory of the mind*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1968. — ASSOUN P.L., *Introduction à l'épistémologie freudienne*, Paris, Payot, 1981. — CANGUILHEM G., *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, PUF, 1955. — CARNAP R., « Psychology in physical language », *Erkenntnis* 1932/3, 3, p. 107-142. — CHURCH A., « An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory », *American Journal of Mathematics*, 1936, 58, p. 345-363. — DESCOMBES V., *La dernière mentale*, Paris, Minuit, 1995. — FEIGL H., *The « Mental » and the « Physical » : The Essay and a Postscript*, Univ. of Minnesota Press, 1967. — JACOB P., *Pourquoi les choses ont-elles un sens ?*, Paris, O. Jacob, 1997. — NEUMANN J. VON, *The Computer and the Brain*, New Haven/Londres, Yale Univ. Press, 1958 (trad. fr. P. Engel, *L'ordinateur et le cerveau*, Paris, La Découverte, 1992). — PELISSIER A. & TÊTE A. éd., *Sciences cognitives. Textes fondateurs (1943-1950)*, Paris, PUF, 1995. — PROUST J., *Comment l'esprit vient aux bêtes ?*, Paris, Gallimard, 1997. — SKINNER B.F., *Science and Human Behavior*, Macmillan, 1933. — SMART J.J.C., « Sensations and brain processes », *Philosophical Review*, 1959, 68, p. 141-156. — TURING A., « On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem », *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2^e série, vol. 42, III^e partie, 12 nov. 1936, p. 230-265 et 2^e série, vol. 43, VII^e partie, 20 mai 1937, p. 544-556.

Bernard ANDRIEU

→ Computation ; Empirionisme ; Loi biogénétique fondamentale ; Machine de Turing ; Neurophilosophie ; Objectivité ; Physicalisme ; Sciences cognitives ; Système.

MONOD Jacques, 1910-1976

Biochimiste français qui, avec François Jacob, a élucidé une part importante des mécanismes de régulation génétique en proposant un modèle dans lequel l'état d'activité d'un gène est déterminé par l'état d'une séquence opératrice située en amont du gène. Deux états sont distingués, correspondant à deux régimes d'activité du gène : ou bien une protéine particulière nommée répresseur est fixée sur la séquence opératrice, et dans ce cas, la synthèse de l'enzyme est bloquée, ou bien la séquence est libre et dans ce cas, la synthèse est activée. Ce modèle apportait une solution au problème que Monod avait identifié sous le nom d'« induction enzymatique » : on peut montrer que l'enzyme qui permet la dégradation de certains sucres dans les bactéries n'est synthétisée qu'en présence de ce sucre particulier (induction). En son absence, la synthèse de l'enzyme cesse. Il paraît donc s'agir, à première vue, d'un processus d'adaptation au milieu. Le modèle dit « de l'opéron » rend compte de cette adaptation apparente en avançant que le sucre, lorsqu'il est présent dans le milieu de culture, déplace le répresseur, libérant ainsi l'opérateur, ce qui a pour effet d'activer

les gènes situés sous le contrôle de cet opérateur. Ainsi, le modèle élucidait une question identifiée dès 1940 par Monod : pourquoi les bactéries produisent-elles les enzymes qui correspondent aux sucres présents dans leur milieu de culture ? Pourquoi, lorsque la composition du milieu est modifiée, la synthèse enzymatique est-elle, elle aussi, modifiée ? Comment, en somme, la bactérie connaît-elle le type d'enzyme qu'elle doit produire ? Le modèle de l'opéron s'avéra être d'une grande généralité. Par lui, un aperçu général sur la régulation de l'expression génétique dans son ensemble devenait concevable. Jacques Monod a exposé, sous une forme condensée, l'ensemble de ces conceptions et quelques autres issues de ses travaux et tenté d'en clarifier la problématique générale dans un livre de philosophie : *Le hasard et la nécessité*. Il a reçu le prix Nobel de médecine avec François Jacob et André Lwoff en 1965.

- *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Paris, Le Seuil, 1970. — *Selected papers in molecular biology*, A. Lwoff & A. Ullman dir., New York, Academic Press, 1978. — *Pour une éthique de la connaissance (textes choisis et présentés par B. Fantini)*, Paris, La Découverte, 1988.

- DEBRÉ P., *Jacques Monod*, Paris, Flammarion, 1996. — LWOFF A. & ULLMANN A. dir., *Origins of molecular biology : a tribute to Jacques Monod*, New York, Academic Press, 1979 (trad. fr., *Les origines de la biologie moléculaire : un hommage à Jacques Monod*, Paris/Montréal, Études vivantes, 1980). — SOULIER J.-P., *Jacques Monod : le choix de l'objectivité*, Paris, Frison-Roche, 1997.

Pascal NOUVEL

→ Gène ; Génétique ; Jacob ; Récepteur ; Régulation moléculaire ; Téléologie ; Théorie.

MONSTRE BIOLOGIE

Être organisé dont la conformation s'écarte sensiblement des normes auxquelles obéissent régulièrement les êtres du groupe naturel dans lequel il est né. L'idée d'écart de la nature, on le verra, est à cet égard plus riche et plus pertinente que ne l'est celle, courante et plus lourdement imprégnée de représentations superstitieuses, de conformation contre nature.

La problématique la plus ancienne concernant la monstruosité fait résurgence d'une manière intéressante dans le débat, lui-même ancien, dont s'entoure la question de l'étymologie du mot lui-même.

Le débat sur l'étymologie du terme, qui apparaît, semble-t-il, au début du XII^e s. (1120, Psautier d'Oxford) avec un sens qui l'apparente à son origine latine *monstrum*, est assez tôt révélateur d'une problématique dont la résolution ne sera totalement effective que dans le cours du XIX^e s. *Monstrum* évoque en effet l'exhibition née de l'étonnement suscité par un phénomène à la fois irrégulier et exceptionnel, l'exception

étant liée précisément à l'irrégularité radicale qui semble caractériser à un être échappant par son idiosyncrasie physique à la configuration ordinaire des membres de sa classe ou à la manifestation accoutumée de sa nature. Ce sens originaire de la notion de *monstre* doit donc se rattacher à celui du terme de *prodige*, auquel il sera souvent associé, bien que ce dernier soit d'apparition ultérieure (XIV^e s., Bersuire). Certains étymologistes ont voulu surdéterminer cette origine du terme en le faisant provenir, de préférence ou conjointement, du mot *monestrum*, dérivé du verbe latin *monere* signifiant « avertir, prévenir, annoncer » : cette interprétation prenait en compte le fait que, dans l'acceptation idéologique première (païenne ou chrétienne) de la notion, le monstre en son irruption était considéré comme le signe annonciateur et précurseur d'événements destinés par décision transcendante à bouleverser l'ordre du monde ou de l'Histoire : ainsi, dans l'univers chrétien qui environne les premiers usages du terme de *monstre*, ce dernier tend à désigner une *exception singulière* à l'ordre de la nature, pourvue d'une fonction de *signe* quasi oraculaire de la *colère* de Dieu, et d'annonce menaçante de châtements à venir. Ce sens apparaît notamment dans le *Prodigiorum ac ostentorum chronicon* de Lycosthènes (Bâle, 1557) et dans la liste que donne Ambroise Paré au XIX^e livre (ou au XXV^e, suivant les éditions) de sa *Chirurgie*. Cette signification première implique donc que le monstre soit regardé comme une création absolument *libre* et absolument *particulière* de Dieu, qui en use pour signifier aux hommes un bouleversement des choses sans pour autant porter atteinte à la constance de ce qu'il a par ailleurs lui-même conçu et créé dans le cadre d'un plan obéissant à des lois ou à des visées régulières.

Le monstre est donc, dans cette conception, une « création directe » de Dieu, totalement idiosyncrasique comme l'exige l'infinie liberté du Créateur, et « contre nature » au sens où elle échappe suivant un propos délibéré à l'ordre habituel et régulier de la création. La problématique dès lors se précise : si le monstre est théologiquement pensé comme un individu singulier voulu comme tel par Dieu et se situant du fait de cette volonté même à l'écart des chemins ordinaires de la création, si le monstre est effectivement *contre nature* et exprime par là l'infinie liberté et la toute-puissance éternelle du Créateur, qu'advient-il lorsque l'anatomie et la science médicale opéreront des recensements qui établiront que les monstres rentrent dans des classes « régulières », et qu'ils obéissent ainsi à des lois de constitution dont l'opération échappe à l'absolue singularité dont la métaphysique chrétienne leur faisait initialement l'hommage ? L'histoire de l'anatomie est le terrain sur lequel cette problématique s'est naturellement déployée.

La controverse sur l'origine

La thèse de la préformation des germes monstrueux. — Interne à la discipline anatomique, le débat aura lieu

dans l'Académie royale des sciences de Paris au cours de la première moitié du XVIII^e s., et sera d'abord soumis à la règle d'un compromis préalable avec la métaphysique. Il convient de préciser d'emblée que cette discussion se déroule dans le cadre d'une théorie globale de la génération nettement dominée à ce moment par le préformationnisme oviste (les germes de chaque nouvel être sont préformés dans l'œuf maternel depuis la création d'Ève, laquelle les renfermait en abîme dans ses ovaires, et ne sont susceptibles que d'un simple accroissement dimensionnel) : le monstre suit ainsi la règle providentialiste universelle, et ne peut donc, théologiquement parlant, qu'être lui aussi préformé dans le germe, c'est-à-dire relever d'une conception originelle. Cette obligation métaphysique détermine (premier paradoxe) la théorie de la monstruosité à s'aligner sur la théorie de la génération normale, soit : à soutenir l'idée d'une « préexistence des germes monstrueux » et donc la théorie de la préformation des monstres envisagés comme des « extraordinaires originels » (Régis, l'abbé Bignon, Du Verney, Haller, Winslow), possédant, parce qu'issus de Dieu, leur propre perfection.

La thèse de la formation mécanique des monstres. — Cette thèse, qualifiée d'« accidentaliste » (Tort, 1980), sera soutenue dans l'Académie — contre Du Verney, Winslow et la théorie de la préformation des structures monstrueuses — par l'anatomiste Louis Lémery. C'est la dissection d'un fœtus bicéphale qui donnera à ce dernier, au cours de l'année 1724, l'occasion de produire sa thèse de la formation mécanique des monstres « par excès » (comportant des parties excédentaires), thèse qui s'appliquera naturellement aussi, cas par cas, à la production des monstres « par défaut ». « Pourvu intérieurement de deux œsophages, de deux estomacs, de deux trachées, de deux poumons (quatre lobes), des deux sexes, d'un cœur unique à un seul ventricule et à une seule oreillette, il était doté, quant au squelette, de deux épines dorsales qui se rapprochaient à mesure qu'elles gagnaient la région inférieure. C'est ce dernier indice surtout qui retint l'attention de Lémery. Les deux épines, nettement séparées dans les régions supérieure et moyenne, tendaient à se rejoindre vers le bas, chacune conservant cependant ses caractères propres et un canal médullaire particulier. L'ensemble se terminant par un coccyx double » (Tort, 1980, p. 31-32). La compression de deux œufs dans la matrice expliquait les organes doubles et la destruction de parties d'organes ordinairement divisés en deux. Le fœtus présentait en outre une épine dorsale tierce, arête intermédiaire superposée aux deux épines vraies sur une partie de la région dorsale, et correspondant, selon Lémery, aux vestiges des côtes brisées lors de la compression. Il fallait dès lors affronter la puissante thèse adverse, qu'étaient les plus anciennes croyances, la doctrine préformationniste, la théologie chrétienne et l'argument métaphysique de la perfection singulière des structures déviantes.

La sortie hors de la métaphysique et la laïcisation de la science des monstres. — En matière de monstruosité, les tenants des créations originelles usaient d'un argument physico-théologique classique, concluant de l'existence d'un ordre (déviante, mais constatable en tant que tel dans la plupart des conformations extraordinaires) à un plan issu d'une préconception intelligente : deux horloges brisées l'une contre l'autre ne pouvaient à leurs yeux expliquer la reconstitution d'une horloge fonctionnelle. Lémery répondra à cet argument (en son fond d'ailleurs étroitement « mécaniste » en un temps où la représentation des propriétés spéciales du vivant n'est pas encore installée dans la conscience scientifique) en faisant saillir la contradiction qu'il perçoit entre un tel « plan de vie » singulier et son échec presque universellement démontré par la souffrance, le peu de longévité et, dans la plupart des cas, la non-viabilité pure et simple des organismes monstrueux : un tel échec ne saurait être concilié avec la grande sagesse providentielle et la perfection de Dieu. L'argument métaphysique est ici retourné, et la métaphysique elle-même utilisée à sa propre exclusion, autorisant ainsi le développement d'une étiologie naturelle. Un autre fait tend à ébranler la logique du préformationnisme dans la représentation de la nature et de l'origine des monstres : la plupart des anatomistes descripteurs de conformations exceptionnelles, et parmi eux Winslow lui-même tout particulièrement, ont cédé à la pulsion classificatoire, réunissant les monstres en classes suivant le type de leur conformation, sans apercevoir ce qui dans ce geste contredisait le dogme de leur singularité absolue, et limitait par là même l'étendue de la puissance divine : contradiction du providentialisme, les monstres comme échecs d'un plan de vie et comme susceptibles de regroupements quasi spécifiques interdisent de penser aussi bien leur origine dans la perfection principielle d'une conception transcendante, que leur idiosyncrasie absolue et leur aptitude à prouver par là une toute-puissance créatrice de Dieu s'exerçant hors de toute règle.

La laïcisation de la science des monstres se poursuivra dans le tiers initial du XIX^e s., avec les premières expériences de production artificielle de monstruosité par lésion mécanique du germe dans l'œuf de Poulet, effectuées et réussies par Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (confirmation de l'hypothèse mécanique, qu'accompagne chez Geoffroy un rejet global de toute la théorie préformationniste de la génération), et, peu de temps après, s'achèvera avec la grande systématique des « anomalies de l'organisation » réalisée à partir de 1832 par son fils Isidore. Ce processus peut donner lieu à une périodisation assez précise, dont les phases se chevauchent, et dont nous proposons le résumé suivant : *Premier moment*, 1690-1743, de Régis à Winslow : développement de la théorie des « extraordinaires originels » à partir d'une méditation sur l'impossibilité de concevoir l'organisation déviante comme un produit du hasard. Affirmation (à fortes corrélations théologiques) d'un ordre sous l'apparente irrégularité des structures monstrueuses. *Deuxième*

moment, 1724-1743 et suiv., du premier mémoire de Lémery à sa mort, et au-delà : renforcement argumentatif de la théorie mécaniste des formations accidentelles, évacuation de la métaphysique. Refus de l'idée d'un plan de création séparé pour les organismes déviants, affirmation d'un désordre et d'une pathologie. *Troisième moment* : du dernier quart du XVIII^e s. jusqu'en 1832 : progrès de la représentation générale du vivant à travers l'étude des phénomènes de la croissance végétale, des greffes, des cicatrisations à l'intérieur des deux règnes vivants, des monstruosité propres au domaine botanique (Guettard, Du Hamel du Monceau) ; progrès de l'embryogénie normale (K.F. Wolff, E. von Baer, F. Meckel, E. Serres, E. Geoffroy Saint-Hilaire) ; naissance de l'hypothèse transformiste (Lamarck) ; tératogénèse expérimentale d'E. Geoffroy Saint-Hilaire, fondée en grande partie sur sa propre théorie des arrêts de développement embryonnaire ; publication de la somme tératologique de son fils Isidore Geoffroy Saint-Hilaire (1832-1836), qui se donne comme l'application de la méthode naturelle à la classification des anomalies de l'organisation. Réaffirmation, sur des bases transformées, d'un ordre reconstitué à l'écart de l'ordre dominant, renvoyant à une étiologie cohérente et unitaire, et prouvé par l'établissement enfin réalisé d'une classification méthodique.

Ordre, désordre, écart et transformisme

L'ordre métaphysique s'évacue, on l'a compris, lorsque la structure monstrueuse est démonstrativement caractérisée comme un désordre renvoyant à une pathologie organique. Or la troisième période du processus que l'on vient de résumer opère une sorte de réintégration de l'image du monstre dans l'ordre universel des formations « régulières ». Le monstre, à travers son « écart », renseigne, comme toute maladie, sur la norme d'une nature non pathologique. On le caractérisera souvent comme une « expérience réalisée par la nature », et permettant de mieux connaître les conditions de la complexion « normale ». La logique du déviant est une logique de l'écart résultant de la rupture et de la réfection hétérotaxique de l'ordre. Les formations régulières expriment la grammaire du corps. Les monstres en sont les figures (structures intelligibles, mais qui s'écartent de l'usage régulier de la langue ou du sens littéral des mots).

Cette analogie est féconde, et chargée de résonances anthropologiques : le grand fait tératologique du XIX^e s. apparaît avec Étienne Geoffroy Saint-Hilaire : c'est la réductibilité de l'écart monstrueux à la norme d'une formation régulière. Le monstre est l'expression figurée de la règle. Un regard jeté un siècle en arrière donnera la clef de cette formule. En 1730, le grammairien Du Marsais opère une sorte de refondation de la théorie et de la classification des tropes sensiblement analogue à celle que réaliseront les Geoffroy, au siècle suivant, dans le domaine de la science et de la classification des anomalies physiques.

Le trope, jusqu'alors défini comme une manière non naturelle de s'exprimer — de même que le monstre se définissait comme un écart de la nature (Régnauld) —, retrouve — de même qu'il en sera pour le monstre — une pleine et entière naturalité. Mais cette nature du trope exprime un retard par rapport à l'évolution grammaticale de la langue — exactement de même que le monstre exprimera un retard par rapport au développement complet de l'être. Or ce qui caractérise l'originalité de la démarche de Du Marsais, c'est la prise de conscience du fait que les figures en général exigent, pour être comprises et répertoriées comme « régulières », d'être mentalement réductibles à la littéralité du « sens grammatical », tout comme le monstre avèrera sa réductibilité à un processus régulier de formation. Le trope, trace demeurée d'un figement de l'expression à un stade archaïque de la constitution grammaticale de la langue, résulte lui aussi d'un arrêt de développement.

Les monstres et les tropes ont donc partie liée, et la simple chronologie démontre que la théorie des arrêts de développement est une production idéologique des sciences de l'homme du XVIII^e s. (appliquée comme un véritable topique à la civilisation chinoise, que l'on déclare paralysée dans son progrès et dans son génie inventif, comme doit en convaincre son maintien d'un système d'écriture « hiéroglyphique ») avant d'être une hypothèse scientifique de la tératogénèse du siècle suivant. Par un classique effet de retour, la théorie développée en anatomie pathologique reviendra s'appliquer avec une force accrue aux phénomènes d'écart civilisationnel, ainsi qu'il ressort de cette note d'Isidore Geoffroy Saint-Hilaire : « Non seulement l'idée fondamentale de cette théorie [des arrêts de formation et de développement] commence à éclairer d'une vive lumière presque toutes les branches des sciences anatomiques, de la zoologie, et de la botanique ; mais on entrevoit même dès à présent la possibilité d'appliquer des considérations analogues à l'appréciation de faits d'un tout autre ordre, par exemple, des différences intellectuelles, morales et sociales, existant entre les différentes races humaines, et même entre les divers peuples d'une même race. Il est en effet manifeste que certaines races ou certains peuples sont arrêtés dans des périodes de développement que d'autres ont traversées depuis plus ou moins longtemps : fait d'une haute importance, déjà impliqué par plusieurs philosophes, notamment par M. Balanche, dans sa *Palingénésie sociale*, et qui n'a pas échappé à l'esprit sagace et habilement généralisateur de M. l'abbé Frère » (*Traité de tératologie*, II, IV, p. 413, note ; nous soulignons).

Une autre incidence précoce de la pensée tératologique s'observe dans l'histoire des théories transformistes, et ce dès les premières intuitions concernant l'éventuelle émergence de nouvelles espèces. En 1744-1745, Maupertuis, dans l'essai qui s'intitulera, sous sa présentation la plus célèbre (1745), *Vénus physique*, insiste sur l'hérédité bilatérale du sexdigitisme (polydactylie à six doigts), ruinant le préformationnisme unilatéraliste qui règne sur la théorie de la

génération, et retourne pour sa part à l'ancienne théorie hippocratique du mélange des semences, tout en faisant l'hypothèse d'un engendrement possible de nouvelles espèces à partir de variations ou de déviations anatomiques fortuites. On mentionnera par ailleurs le lien existant entre la tératogénèse expérimentale et le transformisme (notamment expérimental) chez l'un des principaux représentants de la tératologie de la seconde moitié du XIX^e s., rattaché à la théorie darwinienne : Camille Dareste (1822-1899). On rappellera enfin les monstres prometteurs (*Hopeful monsters*) de Richard Goldschmidt (1878-1958) et son idée d'une divergence spécifique régie par des macromutations ou des mutations systémiques, à fort retentissement phénotypique, et assimilables, de ce fait, à des phénomènes « monstrueux ».

▷ DARESTE C., *Recherches sur la production artificielle des monstruosités, ou essais de tératogénèse expérimentale*, Paris, Reinwald, 1877. — DARWIN C., *L'origine des espèces*, 1859; *Variation des animaux et des plantes à l'état domestique*, 1868. — DAVAINÉ C., « Monstre », *Dictionnaire encyclopédique des sciences médicales de Dechambre*, 2^e sér., t. IX, 1^{er} part., Paris, Masson/Asselin, 1914. — GEOFFROY SAINT-HILAIRE I., *Histoire générale et particulière des anomalies de l'organisation (...) ou Traité de tératologie*, Paris, Baillière, 2 vol., 1832-1836. — GOLDSCHMIDT R., *The material basis of evolution*, New Haven, Yale Univ. Press, 1940. — MAUPERTUIS P.-L. MOREAU DE, *Venus physique*, précédé de « L'ordre du corps », éd. P. Tort, Paris, Aubier, 1980. — RABAUD E., *La tératogénèse*, Paris, Doin, 1914. — REGNAULT N.F., *Les écarts de la nature, ou recueil des principales monstruosité que la nature produit dans le genre humain*, 1775. — ROSTAND J., *La formation de l'être*, Paris, Hachette, 1930. — TORT P., *L'ordre et les monstres (Le débat sur l'origine des déviations anatomiques au XVIII^e siècle)*, Paris, Le Sycamore, 1980 (diff. Vrin; comprend une chrono-bibliogr. complète des communications et rapports imprimés dans l'*Histoire* et les *Mémoires* de l'Académie royale des sciences de Paris entre 1699 et la fin du XVIII^e s.); *La raison classificatoire*, Paris, Aubier, 1989 (chap. « La logique du déviant » — autour de la classification des monstres d'I. Geoffroy Saint-Hilaire — et « Le mixte et l'Occident » sur l'histoire de l'androgynie); « Monstre », *Encyclopédie philosophique universelle*, t. 2, Paris, PUF, 1991; « Tératologie », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1995.

Patrick TORT

→ Anatomie comparée; Embryogénèse; Hybride.

MORGAN Thomas Hunt, 1866-1945

On doit à Morgan, biologiste américain né à Lexington, mort à Pasadena, d'avoir avec ses collaborateurs de l'université Columbia, Alfred H. Sturtevant, Calvin B. Bridges et Hermann J. Müller, apporté à la génétique les bases de son prodigieux essor. Depuis la redécouverte des lois de Mendel par Hugo de Vries, Correns et Tschermak, en 1900, l'étude de l'hérédité est très active. En 1909, Wilhelm Johannsen avait donné le nom de gènes aux unités mendéliennes héréditaires, et s'était interrogé sur le rapport entre

chromosomes et gènes. Il revient à Morgan et à son école d'avoir établi la localisation des gènes dans les chromosomes. L'objet d'étude de Morgan, à partir de 1910, est un petit insecte à ventre noir, la drosophile ou mouche du vinaigre, dont la reproduction est rapide, le nombre de chromosomes restreint, les mutations nombreuses. Cet heureux choix fut à l'origine de résultats extraordinaires. En quelques années Morgan, confirmant la théorie chromosomique de l'hérédité, put établir que chacun des chromosomes de la mouche du vinaigre contient un groupe déterminé de gènes. Il parvint en outre à ordonner les gènes sur les chromosomes, établissant ainsi les premières cartes chromosomiques. L'étude génétique ultérieure de nombreux autres organismes, végétaux ou animaux, confère à l'étude pionnière de Morgan une valeur de référence. Auteur de *La Génétique de la drosophile* (1925) et de *La Théorie des gènes* (1926), Morgan obtint en 1933 le prix Nobel de médecine.

▷ FISCHER J.-L. & SCHNEIDER W.H., *Histoire de la génétique, pratique, technique et théories*, Paris, ARPEM et Sciences en situation, 1990. — MAYR E., *The growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance*, Cambridge, Harvard Univ. Press, 1982. — MORANGE M., *Histoire de la biologie moléculaire*, Paris, La Découverte, 1994. — ROSTAND J., *Esquisse d'une petite histoire de la biologie*, Paris, Gallimard, 1945.

Jean Paul THOMAS

→ Gène; Génétique; Lyssenkisme; Régulation moléculaire.

MORT → Cellule; Oncogène; Plasma germinatif; Vitalisme et mécanisme

MOUVEMENT

PHYSIQUE

On a peine à imaginer aujourd'hui que la question du mouvement ait pu donner lieu à des controverses : le mouvement nous apparaît, tout « naturellement », comme le déplacement d'un objet sous l'effet de forces (dont la nature n'a pas besoin d'être précisée pour les besoins de la vie courante) qui lui sont appliquées. Des expressions telles que « mettre » un mobile en mouvement ou « priver » un autre suggèrent l'idée que le mouvement est extérieur à l'objet : d'une part, la qualification du mouvement (par sa trajectoire et sa vitesse, par exemple) est sans relation aucune avec la nature de l'objet en mouvement; d'autre part, et réciproquement, le mouvement conféré à l'objet le laisse inchangé en tant qu'objet, le seul changement observé étant celui de sa position dans un espace « spontanément » considéré comme homogène, isotrope et infini.

Or cette conception, que reflète si « naturellement » le langage courant, n'est apparue qu'au XVII^e s., en opposition à une autre conception que, sans chercher à être précis, l'on peut qualifier d'aristotélicienne. En un sens, il n'y eut pas de controverse plus importante pour

l'histoire des sciences que celle qui, à l'époque, opposa les tenants de la conception aristotélicienne du mouvement à ceux de la conception moderne, dite post-galiléenne (puisque aussi bien Galilée est celui qui s'en fit le héraut au risque de sa liberté sinon de sa vie), et devenue aujourd'hui naturelle. En effet, la science moderne occidentale s'est érigée sur une redéfinition du mot « mouvement ». Si l'on songe que la puissance de l'Europe, qui lui permit de soumettre de gré ou de force les autres continents, ne peut être dissociée de l'existence d'une science qui, de « philosophie naturelle » qu'elle était, est vite devenue un outil de maîtrise de la nature, on ne peut que s'étonner de ce qu'un simple changement de définition, événement théorique s'il en est, ait pu produire de tels bouleversements dans la vie des hommes.

La caractéristique essentielle du mouvement au sens aristotélicien du terme consiste en ce que sa définition et son étude ne peuvent être dissociées de la nature substantielle de l'objet. À vrai dire, l'idée même de « objet », si naturelle qu'il est aujourd'hui difficile de s'en passer pour parler du mouvement, est totalement étrangère à la physique (au sens d'étude de la nature) aristotélicienne. À l'idée moderne d'un objet, élément d'une classe, celle des supports matériels du mouvement, uniquement caractérisé par une grandeur invariante qui mesure son contenu matériel (la « masse »), à l'exclusion de toute autre qualité (composition, étendue, etc.), la conception aristotélicienne oppose l'idée d'un être qui ne peut en aucun cas être réduit à une simple quantité de matière, mais possède des qualités autres, propres à sa substance. Le mouvement est alors conçu comme une modification de certaines de ces qualités, idée particulièrement difficile à concevoir du point de vue logique puisqu'elle implique que l'être ne soit pas complètement être et participe de son contraire, le non-être. Aristote résout la difficulté en établissant une distinction entre l'être en acte (ensemble de qualités actualisées, réalisées) et l'être en puissance (ensemble des qualités que le sujet, par sa nature même, est susceptible d'acquérir). Le mouvement au sens aristotélicien est alors « l'acte de ce qui est en puissance en tant que tel » (*Physique*, III); c'est un processus qui permet à l'être de se réaliser, d'augmenter sa part d'actualité aux dépens de sa potentialité. Le mouvement aristotélicien, on le voit donc, affecte nécessairement l'être et en ce sens il s'apparente à ce que nous appelons aujourd'hui un changement.

Plus même, le mouvement dépend de l'être qui en est affecté. Aristote établit une classification de ces mouvements qui sont pour nous des changements. Il commence par considérer les « mouvements selon la substance »; ces mouvements sont ceux qui affectent la matière vivante, au nombre desquels se trouvent la putréfaction et la génération. À la matière inerte sont associés d'autres mouvements, regroupés en trois catégories selon qu'ils affectent la qualité, la quantité ou le lieu de la substance. À cette dernière catégorie de « mouvement », Aristote réserve le nom de *phora*. La *phora* (terme souvent traduit par mouvement local) est

ce qui se rapproche le plus de ce que nous entendons aujourd'hui, après Galilée et ses successeurs, par mouvement. Toutefois, on aurait tort d'identifier *phora* et mouvement au sens actuel. Ce serait oublier que pour Aristote ce « mouvement »-là, comme les autres, d'une part affecte l'être (la *phora* n'est pas un simple déplacement : tout mouvement selon la qualité implique un déplacement local), et d'autre part dépend de la nature de ce à quoi il est rapporté.

C'est ici qu'interviennent la conception aristotélicienne de l'espace et la notion de lieu naturel, elles-mêmes liées à une vision cosmologique bien particulière. Le cosmos (et donc l'espace) aristotélicien est un cosmos ordonné. Tout d'abord, l'espace est muni d'un centre (occupé par le centre de la Terre) et les mouvements locaux sont repérés par rapport à ce centre : ils sont de trois types, vers le centre, à partir du centre et autour du centre. Ensuite, aux diverses substances sont associés des lieux naturels, et le mouvement dit naturel d'un corps (celui qu'il adopte, s'il n'est soumis à aucune contrainte, si on ne lui fait pas violence) est celui qui l'amène à son lieu propre. Étant donné que le mouvement autour du centre est l'apanage, en tant que mouvement naturel, des corps célestes, les corps sublunaires (terrestres), par leur mouvement naturel, ne peuvent que se diriger vers le centre ou s'en écarter, réalisant ainsi l'« acte de ce qui est en puissance » en eux. Par exemple, « l'acte du léger, c'est le fait d'être en un certain lieu, à savoir en haut » (*Physique*, VIII). Corrélativement, l'acte du lourd est de se diriger vers le centre; c'est d'ailleurs la raison pour laquelle la Terre forme une boule autour de ce centre; c'est aussi la raison pour laquelle les corps pesants tombent.

À ces mouvements locaux naturels Aristote oppose les mouvements violents ayant pour cause une contrainte exercée sur le corps qui l'empêche de rejoindre son lieu naturel, ou qui l'en déloge. Pour l'étude de la controverse sur la nature du mouvement, ces derniers présentent moins d'intérêt que les mouvements naturels. Telle est en effet la question : comment se comporte un corps qui n'est soumis à aucune contrainte ? (il est clair que le mouvement d'un corps soumis à une certaine « force » doit être défini par rapport à celui qu'il adopte lorsqu'il n'est pas contraint). Question que l'on peut reformuler ainsi : quel est l'effet de l'espace seul sur un objet ? On sait que la science moderne a répondu à cette question par le principe d'inertie (sur lequel nous reviendrons), érigé par Newton en première loi : un objet sur lequel rien n'agit, ou bien continue son chemin en ligne droite à vitesse uniforme s'il était en mouvement au moment où a cessé l'action, ou bien reste immobile si rien n'agissait auparavant sur lui. On va voir que, par rapport à la science aristotélicienne, la théorie newtonienne souffre sur ce point d'une incohérence logique.

En effet, dans la conception aristotélicienne, comme on vient de le voir, la question des rapports entre la « matière » et l'espace est inséparable de celle du mouvement : qu'il soit circulaire, rectiligne vers le bas ou

rectiligne vers le haut, le mouvement naturel est le résultat d'une interaction entre l'espace et les choses, interaction qui, en vertu de la conception cosmologique qui sous-tend la physique d'Aristote, dépend de la nature des choses. La physique post-galiléenne repose, on le sait, sur une cosmologie radicalement différente, la cosmologie copernicienne, correspondant à un univers dépourvu de centre (en tout cas, la Terre n'est plus le centre de l'univers), uniforme, sans lieux naturels. Parce qu'aucun de ces points ne peut être considéré comme le lieu privilégié d'une certaine chose (ou catégorie de choses), l'espace de la physique moderne est un pur espace géométrique, un espace sans qualité, indépendant de la matière. Autrement dit : la question des rapports entre la matière et l'espace est résolue de la façon la plus simple qui soit, en décrétant que ces rapports n'existent pas... Deux siècles de physique newtonienne triomphante ont rendu cette idée « naturelle » et la séparation de l'espace et de la matière a été considérée comme allant de soi jusqu'à ce que le philosophe Ernst Mach en fasse la critique à la fin du XIX^e s. Cette simplification du problème des rapports entre la matière et l'espace, dont la physique newtonienne tire sa force et son efficacité, est également son talon d'Achille. En effet, si l'on décrète l'indépendance de l'espace et de la matière, il devient impossible de répondre à la question : quel est le comportement d'un objet sur lequel rien n'agit ? On ne peut même pas dire qu'un objet matériel sur lequel rien n'agit n'a pas de mouvement : une flèche, une fois lancée, continue sa trajectoire bien que la force qui l'a propulsée ait cessé d'exister. On est donc contraint d'ajouter une hypothèse supplémentaire destinée à régler la question du mouvement d'un objet matériel sur lequel rien n'agit ; c'est précisément cette hypothèse qu'énonce la première loi de Newton, ou principe d'inertie : un corps sur lequel rien n'agit a un mouvement en ligne droite (éventuellement, il reste immobile). L'incohérence logique apparaît clairement : on ne peut à la fois décréter l'indépendance de l'espace et de la matière et décréter qu'en l'absence de toute action un corps a un mouvement bien particulier ; ce dernier apparaît alors en effet comme l'empreinte, ou l'emprise, de l'espace sur un objet libre de toute contrainte – en contradiction avec l'hypothèse d'indépendance.

On sait que Leibniz s'est opposé à la conception moderne (newtonienne) du mouvement. Sans adhérer, bien évidemment, à la conception cosmologique d'Aristote, et donc à l'idée de lieux naturels, Leibniz considère cependant que le mouvement n'est pas un pur déplacement dans un espace inerte. Pour lui, le concept essentiel est celui de monade (seule véritable substance) : monade qui, par définition même, ne peut exister de façon isolée mais seulement en interaction avec d'autres monades (en sorte que la question de ce qui se passe lorsqu'un corps n'est soumis à aucune contrainte n'a pas de sens : il est toujours soumis à l'action des autres monades). Pour Leibniz, le mouvement, « en tant qu'il n'est qu'une modification de

l'étendue et changement de voisinage, enveloppe quelque chose d'imaginaire, en sorte qu'on ne saurait déterminer à quel sujet il appartient parmi ceux qui changent si on n'a recours à la force qui est cause du mouvement et qui est dans la substance corporelle » (*Die philosophischen Schriften*, éd. Gerhart, II, 98). La question embarrassante de l'emprise de l'espace sur la matière ne se pose donc pas : espace et matière sont (de façon « concrète », ou dynamique) des composés de monades en interaction.

Cette question, à vrai dire, n'a reçu de réponse satisfaisante qu'avec la théorie de la relativité générale d'Einstein, en 1916. Einstein prend au sérieux la critique de Mach pour qui « le mouvement d'un corps *K* ne peut être jugé que par rapport à d'autres *A, B, C*... Comme nous disposons toujours d'un nombre suffisant de corps relativement fixes les uns par rapport aux autres ne changeant que lentement de position, nous ne sommes pas liés à un corps déterminé et nous pouvons faire abstraction tantôt de l'un, tantôt de l'autre. Ainsi a pris naissance l'idée que ces corps étaient somme toute indifférents » (E. Mach, *La Mécanique*). Or les corps *A, B* et *C*, interagissent avec le corps *K* observé, en vertu de la loi d'attraction universelle (ou gravitation) énoncée par Newton. Plus même, la force est toujours attractive et ne peut jamais être annulée par une autre qui viendrait la compenser (comme c'est le cas pour la force électrique ; ceci tient au fait que la masse gravitationnelle d'un corps ne peut être que positive alors que sa charge électrique peut être d'un signe ou de l'autre). De ce fait un corps n'est jamais soumis à aucune force : il subit toujours au moins l'attraction newtonienne, ne serait-ce que celle produite par les corps de référence par rapport auxquels son mouvement est observé.

De cette constatation il résulte qu'il est impossible de considérer la force de gravitation comme une force ordinaire. En effet, une force ordinaire est définie, en vertu de la deuxième loi de Newton, comme ce qui modifie l'état de mouvement d'un mobile, c'est-à-dire comme ce qui fait que le mouvement de ce mobile se différencie du mouvement de translation uniforme qu'a ce mobile en l'absence de force appliquée (principe d'inertie ou première loi de Newton). Mais comme il est impossible de se soustraire à l'effet de la gravitation, ce mouvement que l'on dit « libre », ne l'est pas et ne peut pas l'être : il fait nécessairement intervenir la gravitation. Autrement dit, la gravitation, loin d'être ce qui fait dévier un corps de son mouvement « libre », contribue à la définition de ce dernier. L'idée d'une « inertie » qui ferait que le corps continue en ligne droite lorsque la force exercée cesse n'est pas correcte : gravitation et inertie sont indissociables. La fameuse emprise de l'espace sur le corps existe bel et bien : elle résulte de l'existence de matière dans l'espace ; c'est la répartition de matière dans l'univers qui régit le mouvement d'un corps sur lequel n'agit aucune autre force que celle d'interaction avec cette distribution de matière. La contradiction dont souffrait la théorie de Newton (on ne peut pas simultanément supposer que la

matière et l'espace sont sans interaction et assigner un mouvement bien déterminé à un corps matériel « libre » dans l'espace) disparaît : la matière et l'espace ne sont pas indépendants. Plus même, ils sont indissociables : l'espace n'existe pas (le temps non plus d'ailleurs) sans matière (ou de façon équivalente, s'il n'y a pas d'énergie). L'espace n'est pas uniforme ; c'est un objet physique (au même titre que le temps d'ailleurs) interagissant avec d'autres objets physiques dits matériels. Temps, espace, matière, tel est le titre d'un ouvrage de Hermann Weyl qui résume bien ce que la physique entend par mouvement aujourd'hui : l'interaction entre ces trois objets physiques que sont le temps, l'espace et la matière.

On pourrait, à ce stade du raisonnement, se demander si la conception einsteinienne (actuelle) du mouvement ne constitue pas un retour à Aristote. Évidemment non ; ne serait-ce que parce que la vision cosmologique aristotélicienne est définitivement abandonnée. Si le mouvement « naturel » d'un corps *K* (entendons le mouvement dit « libre ») n'est pas chez Einstein un mouvement rectiligne uniforme, il n'en reste pas moins qu'il n'est pas déterminé par la nature du corps *K* lui-même (cf. l'idée aristotélicienne de lieu naturel), mais bien par la répartition de matière extérieure au corps *K* ; autrement dit, par tout l'univers à l'exclusion du corps *K* précisément. En ce sens, le mouvement de la physique actuelle ne peut en aucune manière être comparé à un changement, l'actualisation d'un être en puissance : ce qui confère du mouvement à un objet est toujours extérieur à lui-même. La notion de champ rend compte de cette situation : on dit que le corps *K* est placé dans un champ, en l'occurrence inertiogravitational. D'une certaine façon, et rétropectivement, l'idée d'inertie d'un corps, inertie qui le pousserait à poursuivre son mouvement en ligne droite à vitesse constante, constitue un flot aristotélicien au sein de la physique newtonienne. Il apparaît avec Einstein que l'inertie n'est pas une propriété intrinsèque d'un corps mais représente l'effet de la distribution extérieure de matière sur ce corps. On peut donc dire qu'Einstein a poussé jusqu'à son terme la révolution entreprise par Galilée et Newton.

De fait, cette déqualification des corps matériels, qui amène à considérer un corps comme dénué de qualités intrinsèques autres que des coefficients de charge (la masse n'étant qu'une charge parmi d'autres, la charge gravitationnelle, tout comme il existe une charge électrique), doit être mise en rapport avec la desubjectivation qui caractérise l'évolution de la physique depuis Galilée. Pour Aristote l'objectif de la philosophie (et donc de ce que nous appelons aujourd'hui la science) est de trouver une explication par les causes aux divers phénomènes : à chaque phénomène est attribuée une cause, dans laquelle, on l'a vu, interviennent des propriétés ou qualités supposées de l'objet (le léger, le lourd, par exemple). Pour Galilée l'objectif est tout autre : il s'agit de « mesurer ce qui est mesurable et de rendre mesurable ce qui ne l'est pas encore ». Ce qui induit deux conséquences. Tout d'abord, cette

transformation des qualités en quantités mesurables impose de ne pas prendre pour argent comptant les données de l'observation et de rechercher dans la variété de ces données subjectives celles qu'un changement de « perspective » (on verra que ce n'est pas là tout à fait une métaphore) n'altère pas – ce qu'aujourd'hui en physique on nomme des invariants. Il ne s'agit donc pas d'abstraire les qualités des corps à partir des données sensibles (comme le faisait Aristote) mais de rechercher une description du monde qui soit objective, c'est-à-dire qui soit la même pour tous les observateurs (ou à défaut toute une classe d'observateurs) – un peu comme l'on reconstitue un objet solide à partir de ses diverses vues perspectives tout aussi valables les unes que les autres, en sorte que l'objet reconstitué doit être compatible avec toutes ces vues équivalentes. Deuxième conséquence – qui découle en partie de la première –, comme ce qui est à la fois mesurable et invariant est géométrique, l'objectif de Galilée ne peut être réalisé que par le moyen de figures géométriques : « triangles, cercles et autres figures géométriques » (*Il Saggiatore. Opere*, VI). D'où l'idée du grand livre de la nature (le texte italien est : « questo grandissimo libro, io dico l'universo ») écrit « en langage mathématique et que seuls peuvent lire ceux qui ont appris à comprendre ce langage et à connaître les caractères dans lesquels il est écrit ». De ceci il résulte que du monde objectif on ne peut que fournir une représentation à l'aide de symboles. Il faut abandonner l'idée d'assigner une cause à chaque phénomène. C'est le prix à payer pour atteindre l'objectivité. Cela implique évidemment de valoriser plus l'objectivité que l'explication.

On aura reconnu dans cette recherche d'une description du monde qui soit la même pour toute une classe d'observateurs (ou mieux, si possible, pour tous les observateurs) l'essence du principe de relativité. La forme la plus abstraite et la plus générale de ce principe s'énonce en effet ainsi : il existe au moins une classe d'observateurs (ou pour parler de façon plus savante, une classe de référentiels) pour lesquels les lois de la physique prennent la même forme. Galilée, pour sa part, utilise un langage plus imagé : les papillons qui volent de-ci de-là à bord d'un navire à quai volent de la même façon (n'ont pas plus d'effort à fournir) lorsque le navire vogue sur la mer, à condition toutefois que l'allure de ce dernier soit uniforme et sans heurts. Autrement dit, la description du monde (et donc la définition du mouvement), pour être acceptable, doit tenir compte de ce fait : le mouvement d'un corps (le papillon) par rapport à un corps de référence (ici le navire) doit être le même, doit rester invariant, lorsqu'on change de corps de référence, à condition que ce dernier soit par rapport au premier en translation uniforme. En d'autres termes, le principe de relativité, tel qu'il a été énoncé par Galilée, consiste à affirmer qu'il existe une classe de corps de référence (c'est-à-dire d'observateurs) – la classe de ceux qui sont en translation uniforme les uns par rapport aux autres – pour qui le mouvement d'un corps (un papillon ou

n'importe quel objet) est le même. Le point important ici est que la définition même de ce que l'on doit entendre par mouvement est soumise à une contrainte : elle doit obéir au principe de relativité galiléenne (puisque tel est son nom).

Cela impose qu'on doive considérer le mouvement de translation uniforme « comme nul » (ou « oiseux » comme dit Galilée) : le mouvement des papillons de Venise à Alep ne compte pas ; ce qui compte c'est le mouvement par rapport au navire que celui-ci soit immobile, à quoi ou en route sur la Méditerranée. C'est là une forme alternative de ce que nous avons désigné jusqu'ici comme le principe d'inertie ou première loi de Newton : il revient au même de dire qu'un corps sur lequel rien n'agit est animé d'un mouvement de translation uniforme (mouvement inertiel) ou d'affirmer que ce mouvement est comme nul (il ne nécessite aucun effort de la part des papillons). Le mouvement qui n'est pas nul est alors défini par Newton comme celui qui résulte de l'application d'une force (deuxième loi de Newton), et donc comme celui qui diffère du mouvement inertiel. On le voit, l'objectif de Galilée, rendre mesurable ce qui ne l'était pas, est atteint : le mouvement est compté à partir du mouvement inertiel considéré comme nul et l'application d'une force au corps considéré modifie sa quantité de mouvement (au sens littéral de cette expression).

Il apparaît alors que la difficulté logique signalée plus haut (on ne peut pas à la fois séparer l'espace et la matière et supposer un mouvement bien défini à un corps qui n'est soumis à rien d'autre qu'à l'effet supposé nul de l'espace) a pour origine la volonté de Galilée de décrire l'univers en termes géométriques (triangles, cercles et autres figures). En effet les figures géométriques auxquelles pense Galilée ne peuvent être qu'euclydiennes... Et c'est donc tout naturellement qu'il identifie l'espace de la physique avec l'espace euclidien (espace plat, dirions-nous aujourd'hui après Riemann et Einstein). Newton, à la génération suivante, hérite de cette situation et donc de la difficulté logique qui résulte du fait d'avoir identifié l'espace physique à l'espace géométrique. Newton résout cette difficulté en superposant à l'espace physique (qu'il appelle espace relatif), où règnent ses deux lois, et où donc un corps qui n'est soumis à aucune force extérieure est animé d'un mouvement de translation uniforme, un autre espace (l'espace absolu), espace purement géométrique (euclidien) qui étant d'essence purement géométrique n'entretient aucune relation avec la matière. « L'espace absolu, par nature sans relation avec quoi que ce soit d'extérieur, reste toujours identique à lui-même et sans mouvement » (*Principia*, Scholium suivant les définitions I, II et IV). L'espace absolu est donc séparé de la matière avec laquelle il n'interagit pas ; il est uniforme, euclidien. Qu'il doive être inamovible est apparemment en contradiction manifeste avec le principe de relativité ; celui-ci, en effet, en faisant du mouvement de translation uniforme un mouvement « qui est comme nul », implique qu'un objet qui est immobile dans un certain

référentiel peut, de façon tout aussi juste, être considéré comme en translation uniforme par rapport à un autre référentiel, en sorte que le repos absolu est absolument exclu. Pourtant cette contradiction ne constitue pas une faute logique car l'espace absolu qui est séparé de la matière n'est pas un objet physique. En ce sens, il n'est pas soumis au principe de relativité et ce n'est pas un hasard si Newton parle à son propos de *sensorium Dei*.

Einstein, on le comprend maintenant, a simplement résolu de façon plus laïque (mais aussi plus satisfaisante, parce qu'auto-cohérente) le problème que Newton avait hérité de Galilée : l'espace n'existe pas sans la matière et un corps placé dans l'espace subit nécessairement l'interaction (attraction universelle) de la distribution de matière dans l'univers. S'il se trouve loin de toute concentration importante de masse (dans l'espace intersidéral), l'attraction qu'il subit est faible et l'espace physique (à vrai dire il faudrait parler d'espace-temps) n'est, dans cette région du moins, pratiquement pas déformé ; l'espace est euclidien et l'objet est animé d'un mouvement en ligne droite à vitesse constante. En revanche, si un objet est situé près d'une concentration importante de masse (au voisinage de la Terre, par exemple, ce qui correspond au phénomène de chute des corps), l'attraction qu'exerce la Terre sur lui l'emporte sur celle en provenance des autres masses de l'univers (il ne faut pas oublier que la force d'attraction varie comme l'inverse au carré de la distance) ; autrement dit, l'espace (-temps) à cet endroit est fortement déformé et le corps est animé d'un mouvement qui le dirige vers le centre de la distribution de masse que constitue la Terre. À côté de ces deux situations extrêmes, existent toutes les situations intermédiaires qui, pour être correctement décrites, doivent faire intervenir toute la distribution de masse de l'univers.

On aura remarqué que Galilée, dans le texte original du *Saggiatore*, parle d'univers et non de nature (comme l'on croit généralement). Les convictions platoniciennes et coperniciennes de Galilée l'ont conduit à identifier l'univers à un espace euclidien (ou à une partie d'espace euclidien puisque Galilée pensait que l'univers est clos), nécessairement disjoint de la matière et nécessairement uniforme (sans centre, en particulier) ; en ce sens, la conception galiléenne du mouvement apparaît comme la conséquence (terrestre serait-on tenté de dire) d'une certaine vision cosmologique du monde. Einstein, lui aussi, parle d'univers ; la connaissance de la distribution de matière dans l'univers est un préalable nécessaire à la détermination, et même à la définition, du mouvement d'un objet. En ce sens, la théorie de la relativité générale d'Einstein débouche sur une cosmologie. Einstein parcourt le trajet inverse de celui qu'a emprunté Galilée. Partant des problèmes liés à la définition du mouvement, il absorbe la cosmologie au sein de la physique. Galilée va de la cosmologie au mouvement des corps ; Einstein, lui, va du mouvement à la cosmologie. L'univers

est devenu un être physique... tout en restant écrit dans le langage mathématique.

► CLAVELIN M., *La Philosophie naturelle de Galilée : essai sur les origines et la formation de la mécanique classique*, Paris, A. Colin, 1968. — COHEN B.I., *Introduction to Newton's Principia*, Cambridge (Mass.), Cambridge Univ. Press, 1973. — DUGAS R., *Histoire de la mécanique*, Neuchâtel, Le Griffon, 1950. — DUHEM P., *L'évolution de la mécanique* (1903), rééd., Paris, Vrin 1992. — GALILÉE, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, trad. fr., M. Clavelin, Paris, A. Colin, 1970 ; *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, trad. fr. R. Fréux & F. de Gandt, Paris, Le Seuil, 1992. — JAMMER M., *Concepts of Force. A Study in the Foundation of Dynamics*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1957. — MACH E., *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch dargestellt*, Leipzig, 1883-1912. — NEWTON I., *De Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Londres, 1687. — WEYL H., *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1949.

Françoise BALIBAR

→ Causalité (Principe de) ; Équivalence (Principe d') ; Espace-temps ; Force ; Gravitation ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Masse ; Nature (Système de la) ; Relativité.

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

Établissement qui associe la recherche et l'enseignement, l'entretien des collections et le laboratoire de pointe, l'inventaire de la bio-diversité et la mémoire des sciences naturelles, le musée pédagogique et l'exposition-spectacle, l'étude d'espèces vivantes et l'agrément des visiteurs, le Muséum a oscillé entre des vocations plurielles sédimentées au cours d'une longue histoire et la menace d'obsolescence sous les coups d'une micro-biologie efficace mais réductrice. Un grand nombre d'illustres naturalistes, géologues et chimistes ont travaillé là, entre Seine et Bièvre, au milieu d'une nature mise en ordre, densifiée et disciplinée. Mais trois siècles et demi ont tricoté l'innovation et la routine, voire l'aveuglement, car aucune institution polymorphe n'est restée au même endroit durant si longtemps en superposant la continuité des missions conservatoires et la discontinuité des révolutions théoriques, le risque assumé des ruptures et le retour rassurant à la tradition.

L'invention italienne, le jardin botanique attenant aux Facultés de médecine se répand en Europe aux XVI^e et XVII^e s. comme lieu de culture des herbes médicinales (les « simples ») et, plus tard, d'acclimatation des végétaux exotiques. Après Montpellier (1593), le monarque procure les moyens de créer à Paris (1633-1640) un Jardin qui acquiert plusieurs traits originaux : indépendance et rivalité vis-à-vis de l'Université ; un enseignement (en botanique, chimie et anatomie) prononcé en français et ouvert à tous ; des titulaires des charges alliant l'étude et l'enseignement ; l'interdiction de délivrer des diplômes. Les trois premiers traits forment un atout durable, le dernier un handicap. Contre la médecine hippocratique de la Faculté

de Paris, on y diffuse la théorie de Harvey sur la circulation sanguine et une pharmacopée à base de chimie minérale, présentée au Cabinet des drogues. Le Jardin royal des plantes médicinales s'inscrit parmi les institutions scientifiques d'État léguées par la monarchie (du Collège de France à l'Institut) et son intendance revient alors au premier médecin du roi.

La réussite des administrateurs réside d'abord dans un recrutement audacieux ; on doit ainsi au surintendant Guy-Crescent Fagon la présence des botanistes Tournefort et Antoine de Jussieu ainsi que le soutien aux voyageurs-naturalistes, à un moment où l'on commence à distinguer les cabinets de curiosités des cabinets d'histoire naturelle (Lamarck achèvera plus tard de séparer le rare pour l'œil et l'utile pour le savoir). Si bien qu'au début du XVIII^e s. la botanique prend le pas sur la vocation médicale, ce que consacre le long règne de Buffon (de 1739 à 1788) qui fera du Jardin du Roy, comme l'écrit Yves Laissus, « l'un des phares scientifiques de l'Europe ». À côté de son œuvre propre et de sa forge de Montbard, Buffon mena à bien de vastes aménagements doublant la superficie du Jardin, la nomination d'officiers remarquables (tels Fourcroy en chimie, A.-L. de Jussieu et A. Thouin pour la botanique, Lamarck qui passera des végétaux aux invertébrés qu'il « invente »), la collecte de milliers d'espèces et de minéraux venus du monde entier ainsi que l'aide active aux voyages d'exploration naturaliste. Mais l'hostilité au système de Linné retarde une présentation sérielle des collections au profit de l'art de « captiver l'attention ». Daubenton, en charge du cabinet d'histoire naturelle depuis 1745, regrette que « l'ordre méthodique » qui plaît à l'esprit ne soit pas le plus agréable aux yeux.

La Révolution a besoin des savants lorsqu'elle combat les monarchies coalisées, et Fourcroy, par exemple, met au point un procédé de fabrication d'armes blanches ainsi qu'un moyen rapide de séparer le cuivre et l'étain dans le métal récupéré. Une fois surmontées les tentations iconoclastes du vandalisme, on se félicite que le Jardin des plantes ait jeté depuis longtemps des lumières nouvelles sur les œuvres de la nature et désire servir la nation autant que l'humanité ; plusieurs de ses enseignants participent aux travaux du Comité de l'instruction publique. Aussi la Convention décide-t-elle, le 10 juin 1793, la création du Muséum d'histoire naturelle en adoptant un projet formulé trois ans plus tôt par les « officiers » eux-mêmes ; il confie la gestion à une assemblée de douze professeurs (treize en 1794) dans une parfaite égalité des droits (mais les divisions et les conflits resurgiront ensuite). Cette « République des professeurs » rêve de réaliser une « métropole de toutes les sciences utiles à l'Agriculture, au Commerce et aux Arts ». La confiscation des biens des émigrés, l'expédition d'Égypte et les campagnes napoléoniennes grossissent considérablement les collections dont les techniques de conservation s'améliorent.

Les naturalistes du Muséum déterminent sans cesse de nouveaux types (le spécimen de référence de chaque

espèce), mais leur réputation universelle tient d'abord à l'innovation théorique, en liaison avec la manipulation de milliers de pièces. On voit ainsi s'affirmer la paléontologie stratigraphique et l'anatomie comparative avec Cuvier et Brongniart, la phytogéographie et la classification naturelle par subordination des caractères avec Jussieu (et de Candolle), le transformisme avec Lamarck et Geoffroy Saint-Hilaire, la cristallographie avec l'abbé Haüy, la classification embryologique avec Milne-Edwards... Possédant les plus riches collections au monde (minéraux, roches, fossiles, représentants végétaux et animaux) ainsi qu'un jardin et bientôt une ménagerie de qualité, attirant les naturalistes et les géologues européens, supervisant des correspondants dans les cinq continents, le Muséum connaît l'espace d'un demi-siècle une renommée exceptionnelle. Balzac, Sainte-Beuve, George Sand ou Delacroix y puisent des idées, des images ou des ambiances. Si certains professeurs restent des savants de cabinet déléguant à des auxiliaires la collecte des spécimens vivants ou fossiles, un enseignement et des Instructions aux voyageurs (1824) encadrent une vaste exploration scientifique de contrées mal ou peu connues. Mais ce succès inégalé accroît aussi les tensions doctrinales (notamment avec Lamarck, puis entre Cuvier et Geoffroy Saint-Hilaire dans la fameuse querelle des analogues livrée en 1830) ainsi que les rivalités personnelles (de véritables dynasties se partagent les postes). En outre, la professionnalisation des sciences naturelles marginalise progressivement l'apport des « amateurs ».

Au milieu du XIX^e s., le Muséum s'ouvre à l'expérimentation en accueillant Antoine Becquerel (nouvelle chaire de physique appliquée) puis Claude Bernard (physiologie) et en acceptant d'être dirigé par des chimistes (Chevreul puis Frémy) ; mais il est concurrencé par le Collège de France et les grandes écoles qui créent des laboratoires en s'inspirant du modèle allemand. La puissance publique, soutien financier indéfectible du Muséum, projette plusieurs réformes ouvertement combattues par les administrateurs qui craignent pour leur indépendance et la polyvalence du lieu. Le vieillissement des enseignants et l'inertie des missions traditionnelles conduisent à parler d'une fin de « l'âge d'or » des sciences naturelles françaises, surclassées par leurs rivales anglaises et germaniques (dans un contexte de spécialisation croissante, il est vrai). D'ailleurs des marginaux (F. Gérard, J. Marcou, J.-H. Fabre, A. Giard, C. Dareste) moquent le dogmatisme frileux du Muséum. Si celui-ci contribue à l'ouverture de stations biologiques marines (il existe aujourd'hui le laboratoire maritime de Dinard) et à l'étude des faunes cavernicoles ou abyssales, il est à la traîne en matière de biologie cellulaire.

Toutefois, à la faveur du redéploiement de la « grandeur » française dans la colonisation, les nouveaux responsables légitimement à la fin du XIX^e s. le primat des objectifs strictement naturalistes (classification et conservation) en enrôlant le Muséum dans l'exploitation scientifico-utilitaire des productions d'outre-mer.

Un « Enseignement spécial pour les voyageurs » connaît un succès réel à côté de L'École coloniale ; des réserves naturelles sont placées sous le contrôle du Muséum, notamment à Madagascar ; la faune et la flore de l'Empire français sont soigneusement recensées ; dans les années 1920-1930, deux nouvelles chaires exclusivement consacrées aux colonies compléteront le dispositif. Initiée par Alphonse Milne-Edwards (directeur en 1890-1900), qui exalte les savoirs indispensables dans « la lutte pour se faire une large part dans ces contrées lointaines », cette orientation sera poursuivie par Edmond Perrier et Louis Mangin. La notabilité et les privilèges conférés par des moyens accrus justifient le repli sur une tradition nationale et plusieurs organismes sont rattachés au Muséum : le musée d'ethnographie du Trocadéro en 1928, le zoo de Vincennes inauguré en 1934, et encore un arborétum, des parcs animaliers, une station alpine (plus tard, un jardin exotique).

Mais si le mariage de l'observation descriptive et de l'expertise coloniale consacre le retour en force de l'histoire naturelle sous la protection de la III^e République, il empêche la reconnaissance des conquêtes scientifiques de la biologie internationale (génétique des populations, modèles mathématiques, écologie et néodarwinisme). Ainsi, en 1936, le géologue et directeur du Muséum Paul Lemoine publie une violente attaque antitransformiste en concluant le tome V de *L'Encyclopédie française*, dirigée par Lucien Febvre. Il y résume les contributions de ses collègues en affirmant que « la théorie de l'évolution, sous ses diverses formes, est à la veille d'être abandonnée ». L'impudence du procédé est telle que certains corédacteurs obtiennent la publication d'un débat contradictoire dans lequel Georges Teissier et Marcel Prenant (qui n'appartiennent pas au Muséum) déplorent l'incompréhension de la synthèse évolutionniste qui s'impose déjà dans les pays anglophones. Lemoine avait démissionné mais la note dominante au Muséum, comme en Sorbonne, oriente la biologie française sur des voies de garage ; seize des dix-neuf chaires concernent encore l'histoire naturelle au sens traditionnel.

Après la Seconde Guerre mondiale, le Muséum tente d'échapper au déclin en redéployant son activité dans plusieurs directions : « la conservation de la nature » et la protection de l'environnement ; la paléontologie (avec plusieurs expéditions fructueuses) ; la préhistoire, l'ethnographie et l'anthropologie (en liaison avec le Musée de l'homme, mais le Muséum eut une chaire d'anthropologie dès 1832). Aujourd'hui, les 26 laboratoires se répartissent entre la physico-chimie du vivant, la gestion de la bio-diversité, l'écologie et la systématique ainsi que les sciences de l'univers et les sciences de l'espèce humaine. La macro-évolution et son interprétation néodarwinienne ont connu une réhabilitation fastueuse à l'occasion de l'ouverture de la Galerie de l'évolution en 1994. On disposait autrefois les collections selon la représentativité des embranchements et l'intérêt « décoratif » des animaux naturalisés, accessoirement selon une marche progressive des espèces

fossiles (à partir de 1898, dans la galerie de paléontologie dirigée par G. Pouchet et A. Gaudry). Le nouvel espace visualise une histoire normée par la sélection naturelle : on y montre la diversité biologique, puis l'évolution du vivant et enfin le rôle de l'homme dans la modification des écosystèmes. Alors qu'en 1959 encore le Muséum se singularisait en commémorant Lamarck pour minimiser Darwin, il donne à voir aujourd'hui toute la biologie « à la lumière de l'évolution » moderne comme s'en félicite Stephen Jay Gould (*in* G. Bezombes, p. 9) et non plus une Arche de Noé laïque ou une exhibition encyclopédique. C'était la seule façon de rejoindre le courant dominant mondial tout en évitant de subir l'omnipotence de la biochimie.

Mais des questions demeurent. Comment harmoniser une reorientation pédagogique, dans laquelle le vivant est scénographié afin de mieux responsabiliser le visiteur, avec les contraintes et l'éclatement de la recherche internationale ? Le compromis nécessaire entre la fonction de préservation des objets et celle de communication sera-t-il plus facile à réaliser que dans les autres musées des sciences ? Sans parler de l'illusion de saisir, durant une brève visite, un processus se déroulant sur des milliers de siècles, fallait-il adopter le principe des expositions thématiques finalisées par l'évolution au moment où les objets de la biologie (cultures *in vitro* ou banques de gènes) et les procédures d'expérimentation ont perdu toute dimension spectaculaire ? À la fois fidèle à ses vocations initiales (conservation, recherche et diffusion) et impatient de rejoindre l'épicentre de la compétition scientifique, le Muséum cherche sa voie dans l'élaboration d'une nouvelle systématique (bien au-delà de la détermination d'un spécimen, il s'agit de mettre en évidence les relations de parenté, de définir les causes de la diversification et de confronter la pertinence des différents systèmes de classification en utilisant des facteurs moléculaires et biochimiques autant que cytologiques et anatomiques). À côté de l'inventaire complet de la biodiversité passée et présente, laissant à d'autres la cartographie du patrimoine génétique humain, le Muséum pourrait contribuer à un atlas universel de la phylogénèse et des relations entre formes vivantes.

Cuvier initia la reconstitution des espèces disparues (par catastrophes ou extinction continue) dont la fossilisation gardait quelques traces. À présent que les musées d'art reconstruisent les ateliers d'artistes simultanément détruits par la frénésie immobilière, les muséums s'appliquent à « recréer » les espèces anéanties par l'inlassable activité humaine et à dresser la liste des espèces menacées. À une mémoire-reconstitution des ancêtres du monde actuel s'ajoute un conservatoire-mémorial des destructions en cours et à venir. Musée du patrimoine de la vie, il expose le travail de la mort annoncée en espérant la conjurer.

Dates clefs : Louis XIII fonde par l'édit de mai 1635

un Jardin royal des plantes médicinales (ouvert en 1640). Le 10 juin 1793, un décret de la Convention crée le Muséum d'histoire naturelle. La réforme de 1863 institue un directeur nommé pour cinq ans et oblige les professeurs à rédiger des *Rapports annuels* d'activité. La Galerie de zoologie est inaugurée lors de l'Exposition universelle de 1889. Profondément transformée, elle devient la Grande galerie de l'Évolution en 1994. La même année, l'assemblée des professeurs-administrateurs, datant de 1793, est remplacée par trois conseils (d'administration, des laboratoires et scientifique).

Intendants ou Directeurs : Guy de La Brosse (fondateur, mort en 1641), Guy-Crescent Fagon (1673-1718), Buffon (1739-1787), Bernardin de Saint-Pierre (1792-1793), Eugène Chevreul (1836-1879), Edmond Frémy (1879-1890), Alphonse Milne-Edwards (1890-1900), Edmond Perrier (1900-1919), Louis Mangin (1920-1931), Paul Lemoine (1932-1936), Roger Heim (1950-1965), Jean Dorst, Philippe Taquet, Henri de Lumley...

Les collections : 243 000 minéraux, 300 000 roches, 2 000 météorites, 2 millions de fossiles, 7 millions de cryptogames et 8 millions de plantes à fleurs en herbier (dont 450 000 types), 150 millions d'insectes, 1 million de poissons et de reptiles, 200 000 oiseaux, 150 000 mammifères, 35 000 crânes humains, 1 million de pièces préhistoriques, 300 000 objets ethnographiques, 25 000 plantes vivantes et 5 000 animaux vivants (d'après Yves Laissus). Seuls le Natural History Museum de Londres et la Smithsonian Institution de Washington soutiennent la comparaison.

► BEZOMBES D. dir., *La Grande galerie du Muséum*, Paris, Muséum, 1994. — DELEUZE Ph.F., *Histoire et description du Muséum royal d'histoire naturelle*, 2 vol., 1823. — DENISE L., *Bibliographie historique et iconographique du Jardin des plantes et du Muséum*, 1903. — LAISSUS Y., *Le Muséum national d'histoire naturelle*, Paris, Gallimard « Jeunesse », 1995. — LAISSUS Y. & PETTER J.-J., *Les animaux du Muséum, 1793-1993*, Paris, Imprimerie nationale, 1993. — LIMOGES C., « The development of the Muséum d'histoire naturelle de Paris, c. 1800-1914 », in FOX R. & WEISZ G. éd., *The organization of science and technology in France, 1808-1914*, Cambridge, New York, 1980, p. 211-240. — LOISIEL G., *Histoire des ménageries, de l'Antiquité à nos jours*, 3 vol., 1912. — ROULE L., *Rapport sur les muséums d'histoire naturelle et leur rôle dans l'enseignement public*, 1923. — SCHNITZER C., « Le développement du Muséum au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle », *Revue d'histoire des sciences*, Paris, 1996, 49/1, p. 53-97. — TAQUET Ph., *Les bonnes feuilles du Muséum*, Paris, Muséum de Paris, 1991. — VAN PRAËT M., « Le Muséum national d'histoire naturelle », *La science en scène*, Paris, Palais de la Découverte, 1996, p. 217-230.

Gérard MOLINA

→ Académies ; Classification [BOTANIQUE] ; Cuvier ; Enseignement des sciences ; Fossile.

NAGEL Ernest, 1901-1985

Épistémologue et logicien américain, né à Nové-Mesto (République tchèque), il s'est illustré en particulier par des travaux sur la théorie des probabilités et sur les théorèmes de Gödel. Sa philosophie des sciences est à la conjonction du pragmatisme de Peirce et de l'empirisme logique : comment allier un réalisme qui permette de limiter la fonction des conventions ? en postulant une distinction, non déterminable empiriquement, mais essentielle, entre l'ensemble des lois expérimentales et celui des lois théoriques. Nagel montre que la structure de la science (composée : 1) d'une syntaxe ou calcul abstrait, qui définit implicitement les notions de base du système ; 2) des ensembles de règles qui assignent un contenu empirique au calcul abstrait ; 3) d'une interprétation ou modèle pour le calcul abstrait) produit des termes qui ne sont plus de l'ordre ni de la logique ni du sens commun, non réductibles à des *sense-data*, mais déterminables par des ensembles d'opérations. Le but de la science n'est donc pas une généralisation à partir de faits, mais une explication systématique mettant en relation le « fait » à expliquer avec des « vérités nécessaires », selon des paradigmes explicatifs différenciés (déductif, probabiliste, téléologique, génétique). Nagel rend compte de sciences très différentes (logique, probabilité, physique, biologie, histoire) en fonction de leur contexte et tente des réductions de l'une à l'autre, car la réduction est elle-même une sorte d'explication.

- *On the Logic of Measurement*, Columbia Univ., 1930.
- *Principles of the Theory of Probability* (1939), in *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. 1, n° 6, Chicago, Univ. of Chicago Press, rééd., 1953.
- *Sovereign Reason*, Glencoe (Ill.), Free Press, 1954.
- *Logic without Metaphysics*, Glencoe (Ill.), Free Press, 1957.
- *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Londres, Routledge & Kegan, 1961.
- *Teleology revisited*, New York, Columbia Univ. Press, 1979.
- NAGEL E. & COHEN M.R., *An Introduction to Logic and Scientific Method*, New York, Harcourt, Brace & Co., 1934.
- NAGEL E. & NEWMAN J.R., *Gödel's Proof*, New York, New York Univ. Press, 1958.

► MORGENBESSER S., SUPPES P. & WHITE M. éd., *Philosophy, Science and Method. Essays in Honor of Ernest Nagel*, New York, St. Martin's Press, 1969.

Anne-Françoise SCHMID

⇒ Cercle de Vienne ; Peirce ; Pragmatisme ; Réductionnisme.

NATURE

Dire quelle conception nous avons aujourd'hui de la Nature est une gageure, puisque le recul est impossible à prendre, et ce n'est pas le moindre des paradoxes concernant la notion de cette nature objet de nos soins et de nos précautions : à quelle conception, à quel concept correspondent ces soins qui se prodiguent, et tant de précautions prises ? Il y a un cercle herménéutique, plus encore qu'épistémologique, à tenter de saisir notre pensée la plus actuelle, tandis que précisément une telle mise au point nous paraît de la plus grande urgence, et que les tâches pratiques engagées appellent la clarté du concept à la rescousse.

Nous connaissons la nature objet d'actions et d'entreprises, prétexte aux idéologies, soumise au droit, riche d'un passé philosophique prestigieux. On se souvient qu'il y a eu Dame Nature, que la Nature était mère, qu'elle a été Dieu même, armé d'une Providence dont nous étions couverts, ainsi que dotés d'un destin. Il serait bien difficile de dire d'un mot où nous en sommes dans cette veine littéraire, philosophique et théologique. On cherche à légiférer, on « protège » comme un patrimoine le legs de la nature en nous et hors de nous, on nomme « génétique » ce patrimoine, en faisant et en parlant comme si nous étions les orphelins de la nature, et qu'il nous fallait rassembler ses biens pour les pérenniser. Mais de qui héritons-nous un tel « patrimoine » ? Et de quel mort, ou quelle morte, sommes-nous ainsi faits les exécuteurs testamentaires ? On brandit une conception de la nature pour combattre, promouvoir, légitimer ; tantôt la nature nous veut inégaux, tantôt tous frères également aimés ; le droit politique légitime le souverain au nom de la nature et du « droit naturel », qui départagerait entre mille impostures et abus de pouvoir, mais la puissance invoquée reste muette et nous parlons pour elle. On exploite la nature pour ensuite la protéger, on ménage les airs respirables et les eaux potables dont dépendent notre santé et notre survie, après les avoir empoisonnés pour le plus grand profit de nos industries et de nos finances, mais aussi au nom du progrès. Dans cette affaire, est-ce bien la nature qu'on atteint et qu'on sauve, ou nous les hommes, individuellement et collectivement, *homo œconomicus, politicus, faber, sapiens*. Il manque donc l'essentiel dans cette controverse universelle, qui habite les esprits et qui les mobilise :

savoir clairement de quoi on parle, quel est l'objet du débat. Il reste à conceptualiser la nature après l'avoir convoquée, après avoir parlé et agi en son nom et pour son bien.

Déjà cependant, le soupçon naît qu'on l'aurait perdue depuis longtemps déjà, sans cesser de la nommer et de croire que son nom correspond à un objet réel. Pour désigner le problème à éclaircir : la nature a-t-elle, est-elle la puissance ? Une autre puissance s'est-elle substituée à elle, dans la pensée comme dans la pratique ? La puissance que le XVIII^e s. philosophique nommait nature n'a-t-elle pas émigré vers d'autres instances ? Quelle est la puissance contemporaine, et quelle relation entretient-elle avec « la nature » : identité, rivalité, maîtrise, ignorance ?

Le paradoxe de la puissance

La philosophie classique. — La grande période d'une philosophie de la nature, même si Schelling et Schopenhauer l'ont illustrée dans la première moitié du XIX^e s., c'est le siècle des Lumières, qui se souvient lui-même de l'*Éthique* de Spinoza. Chez Spinoza, Nature est le nom de Dieu, *Deus sive Natura*, ainsi que celui de Sa création. La nature est puissance créatrice, non au sens d'un geste initial, mais au sens de la conservation et du déploiement de ce qui fait les êtres : *natura naturans*. C'est encore le nom de ces êtres, conservés et déployés : *natura naturata*. Spinoza dénonce de ce fait la personnalisation anthropomorphique de la nature, mais c'est pour l'identifier à la puissance même. L'homme croit être la puissance, mais il tient sa nature qu'il croit puissante de la véritable puissance qui l'exécute, et qui le maintient dans le degré de puissance qui est le sien en tant qu'être fini. Toute puissance est dès lors Nature, que ce soit comme degré fini de la nature naturée, ou comme mode de la puissance infinie.

Spinoza pose la puissance et même l'être comme unité, c'est pourquoi Dieu est « La Nature », et non les êtres finis qui en sont les modes. Le jeu de l'unité et de la pluralité est le devenir, qui n'est pas toute la réalité, puisque ce qui devient ne devient pas être, mais l'est déjà. C'est ce jeu qui constitue la tradition des philosophies de la nature, même lorsqu'elles prennent la forme d'une réflexion sur les fins de l'histoire humaine. Rousseau étudie l'homme « sorti des mains de la nature », afin de le distinguer de ce que la société des hommes en a fait, et pour retrouver le sens d'une éducation fondée sur la puissance qui se déploie dans son être véritable. Kant, dans l'*Idée d'une histoire universelle d'un point de vue cosmopolitique*, nomme Providence la puissance qui préside au devenir des hommes dans l'histoire, en ce sens que la puissance divine a pourvu la nature humaine de caractéristiques positives et négatives, qui conditionnent dès le départ les directions et les virtualités de son devenir en tant qu'espèce. L'anthropomorphisme, croyance en la toute-puissance de l'homme et en son antériorité par rapport à toute autre conception de la puissance, trouve sa limite dans

ces dispositions naturelles et providentielles, que l'homme doit reconnaître s'il veut accomplir pleinement son destin.

La philosophie moderne. — L'affirmation de l'unité même de la nature comme puissance, ou comme « volonté », à l'image d'une volonté non humaine, mais divine, où l'acte se confond avec la pensée, est portée dans le *Monde comme volonté et comme représentation*, seconde et dernière œuvre systématique de Schopenhauer. Il y a une unité de « l'essence du monde », et la représentation, qui correspond à un mode particulier d'existence finie, celle de l'homme doué d'intellect au service de sa volonté finie, ne peut y accéder. L'essence de la nature est volonté, puisque avec l'homme, elle fait partie du « monde », ou totalité des existants. C'est par son corps, « objet immédiat », que l'homme peut prendre conscience de l'identité de tous les phénomènes entre eux, y compris lui-même, et de leur commune appartenance à la volonté une. Schopenhauer estime qu'il existe une doctrine de cette unique essence, mais il la trouve dans les *Veda* (le voile de Maya) et non dans la tradition occidentale, qui est trop esclave de la divinisation de l'intellect pour appréhender une essence volontaire de toutes choses.

Dès lors, il a fallu raisonner en fonction d'un degré de puissance, d'une force affectant les êtres, en un sens dont la science de la nature hérite plutôt qu'elle ne l'a inventé. Si la nature est puissance, elle n'est plus cette inertie, ce mécanisme aveugle que Descartes avait proposé pour rendre sensible le décret divin, conçu comme une forme d'artisanat portée à la perfection. La nature est plutôt vie qu'inertie, même si « inertie » et « artisanat », rapprochés par Descartes, ne pouvaient l'être qu'en dépit du sens littéral, puisque l'un signifie la négation de l'autre, *in-ars* et *ars*. Le vivant représente mieux que l'inorganique le « naturel » aux yeux de la nouvelle philosophie de la volonté, et c'est cette philosophie, après Schopenhauer, qui ouvre la voie à la réflexion sur la puissance en général, « la technique » en particulier. Comme l'art nous révèle davantage que la science ou l'empirisme aveugle les secrets de la création et de l'évolution, la nature est art, la puissance est art, et toutes les formes d'art qui excèdent le champ de l'esthétique et des beaux-arts traditionnels deviennent l'énigme du monde, la serrure à ouvrir, et bientôt la clé pour le faire.

Le XX^e siècle. — Dans ce rapide synopsis d'une histoire récente de la nature en philosophie, venons-en au nœud le plus actuel du problème, qui agite la pensée depuis, *grosso modo*, l'année 1900. Les temps modernes sont futuristes à plus d'un titre, et notamment dans leur dimension prospective, on n'ose dire prophétique. Nietzsche, schopenhauerien repent, a voulu connaître l'avenir, comme si cet avenir contenait la promesse d'un renouvellement, en différant du passé, ce que le maître niait. En « inactuel », il a appréhendé les caractères des temps au-delà du sien, dans les

deux sens : vers la Grèce antique, et vers les siècles à venir, dont le nôtre. Sa doctrine de la volonté de puissance, (*Der Wille zur Macht*), demeurée inchoative mais néanmoins publiée et republiée dans des versions dont il n'a voulu ni pu reconnaître aucune, pose la nature comme volonté, mais aussi comme art. Cet art englobe les nôtres, si bien que la fameuse opposition entre l'artificiel et le naturel a vraiment vécu avec lui. Art signifie d'abord chez lui une opposition : il n'est pas connaissance, représentation fidèle, il est surtout position, ordonnance, hiérarchie et de ce fait, il est méthode ; en un sens fort. On croit volontiers que la méthode servirait à élaborer la science, qu'elle déterminerait le premier à connaître, ou à exposer. On néglige le fait que la méthode pose le premier dans l'absolu, non dans la seule connaissance, qui serait seconde, et respecterait une donnée antérieure. Poser le premier, l'instituer comme tel, c'est ordonner, hiérarchiser, c'est créer. La nature le fait, mais si « nous » le faisons, nous sommes nature, nous faisons être ce que nous posons.

Nietzsche nomme arts, artistes, les formations qui deviennent et font devenir, celles qui ordonnent une réalité dont les rudiments tout trouvés étaient chaos, brouillons. Il abolit la séparation romantique entre le génie de la sensibilité et le génie actif ou pratique, celle que Goethe croyait intangible. Il fait du grand homme d'État, du fondateur de religion, de l'organisateur, des arts, parce qu'ils offrent un devenir aux choses et aux hommes pris dans le champ de leur création. Nommer après lui « nature » un état premier des choses, vierge d'un tel devenir, c'est reprendre à son compte une conception représentative, où la fidélité au donné premier se confond avec une ontologie éternitaire, valorisant l'état le plus confus et le plus brut, le non-devenir. C'est aussi une attitude « historique », où les hommes, loin de se donner un destin, croient le recevoir tout défini des mains d'une puissance inconnue, dont les relations avec la nature sont d'identité et de continuité : l'histoire, cette fiction mise au point par « la racaille du sens de l'histoire ».

Nietzsche évite entièrement, croyons-nous, de « retomber » dans une conception anthropomorphique de la nature comme puissance créatrice, et ne nomme jamais « humaine » sa conception de la puissance ; le mot « surhumain » (*Übermenschliches*), rarement appliqué à des hommes particuliers (« les surhommes »), désigne négativement ce qui surpasse l'homme et les hommes dans la puissance de l'art, commune à la nature et à l'histoire, étrangère à leur opposition traditionnelle. Il est alors possible que la nature soit désinvestie de la puissance, sans que celle-ci ne devienne celle de l'homme, puissance rivale, contrenature. C'est de cette perpétuité que nous héritons. C'est à partir d'elle que se constitue notre problème avec la nature, problème juridique, idéologique, technique ou pratique.

L'écrit fameux d'Ernst Jünger, *Le Travailleur* (1931), donne le coup d'envoi d'une croisade antihumaniste, dont Heidegger et plus tard Althusser, pour ne citer que les plus brillants, ont été les combattants enthousiastes. Il réconcilie en même temps « nature » et « art », puisqu'il

fait de la figure en gestation du Travailleur une puissance qui a maîtrisé ce qu'il appelle « l'élémentaire ». Son interprétation toute personnelle de la volonté de puissance, rapportée à Nietzsche dans la seule mesure où celui-ci aurait été le premier à l'élaborer, la rattache à ce qu'il appelle la Figure (*Die Gestalt*), qui structure l'histoire en périodes successives discontinues. Elle se détache également de toutes les interprétations rivales formulées en termes d'individualisme « bourgeois » ou humaniste-universaliste ; c'est chez Jünger, non chez Althusser, que l'antihumanisme « théorique » de Spinoza, anti-anthropomorphisme, commence à prendre la tournure pratique d'un hymne au Proletaire allemand, insurgé contre l'individualisme bourgeois (et son traité de Versailles félon). Heidegger n'attendra que quelques années pour transformer la chose en « destin » historique de la métaphysique, d'où l'idée qu'il lui reviendrait à lui seul la mission suprême de l'accomplir, en une pensée du Temps dont on attend encore le fin mot.

Cette tempête métaphysique a beau être oubliée pour une large part, elle exerce encore ses ravages dans nos idéologies. Elle marque notamment nos conceptions de la « nature », terme qui dépasse certainement en ambition et en généralité les différentes problématiques qu'on a cherché à distinguer plus haut, mais aussi qui les fédère et les unifie. Il y a bien, chez nous, une crise de « la nature » et du « naturel ».

La « protection de la nature »

On admet implicitement aujourd'hui que la Puissance est passée du côté de la Technique, et que la puissance dominée, sur laquelle s'exerce sa domination, est « nature », au sens de ce qui n'est pas « technique », pas artificiel, ni organisation ou ordonnance programmée. On refait le procès intenté par Rousseau à la civilisation, on défend un état premier et innocent des choses contre l'homme, contre la machination dénaturante. À l'encontre d'un droit qui s'identifierait à la force pure, on accorde, on octroie des droits à ce qui ne peut les soutenir sans un porte-parole, on se fait interprètes de la nature muette, on s'en prend à l'« homme » comme s'il était le bourreau de la création. De l'autre côté, chez les « antiécologistes », on soutient la puissance qui se passe de soutien, en valide, on légitime l'exercice de la force sans le droit, on jette l'anathème, on qualifie de « nazi » le naturisme juridique, la défense des animaux et des plantes, la prise de parti en faveur du sauvage, du brut, du vierge. « Vert » devient vert-de-gris. Une chatte n'y reconnaîtrait pas ses petits, mais la pratique de la dénonciation calomnieuse a tant d'ancienneté que ces invectives croisées n'ont plus d'arbitre impartial depuis longtemps. D'où l'urgence de « passer au concept », si c'est possible. On tentera modestement de faire une revue schématique des problèmes les plus brûlants, où la crise du concept se déclare le plus visiblement.

Le patrimoine génétique. — C'est dans le domaine de l'inventaire et de la gestion du patrimoine génétique que les paradoxes de la puissance prennent la forme la plus critique. On ne protège pas le patrimoine contre des destructions extérieures, on entend le protéger de « notre » propre puissance, on veut le mettre à l'écart du rayon de puissance des technologies ; on englobe dans la sphère menacée le patrimoine génétique des espèces, autres que l'humaine, mais qui ouvriraient la porte à tous les excès si on entamait leur effraction. La loi s'en mêle, des pratiques ayant déjà cours ici ou ailleurs sont mises au ban, on protège le maïs contre l'amélioration de sa race à coups de manipulations du génome.

Dans un monde où le naturel à l'état vierge est un mythe, on affecte de redouter les effets imprévisibles de l'introduction d'une espèce mutée parmi les autres, supposées innocentes. Une science-fiction à la McCarthy envahit les champs. On pourrait s'étonner d'une chose : si Dieu avait voulu que sa création soit protégée contre les piratages technologiques, aurait-il usé de dispositifs recopiables et manipulables, aurait-il codé ses créatures en une langue si déchiffirable ?

Le langage de la protection va de pair avec celui de la gestion. On traite la nature comme une population de populations, comme une « masse » hétérogène régie par la statistique et la loi des grands nombres, cette doctrine de l'approximatif qui a permis aux sciences de progresser sans devenir exactes. De ce fait, les agents pathogènes semblent cachés au sein de la masse des autres, comme un tueur isolé dans la foule anonyme qui le protège. Il faut faire plus que les découvrir, il faut les « isoler » : tracer un cercle autour de la zone à risque, le resserrer, le fermer sur l'agent dangereux, puis l'appréhender et l'isoler vraiment, l'empêcher de se mêler de nouveau à la foule. C'est un film policier, avec carte du terrain, lumières qui clignotent, rayons tracés au feutre ou grâce à l'électronique. Lorsque les vaches ont été reconnues victimes d'une maladie inconnue dans son étiologie, mais identifiée dans sa symptomatologie, on a cherché à « isoler » l'agent pathogène, et le résultat rapide a été de tracer le cercle maudit autour du « prion », terme abrégé désignant une chaîne de synthèse des protéines, puis de chercher comment lutter contre son inversion en agent de l'encéphalite, son « retournement » au service de la puissance ennemie, la maladie de Creutzfeld-Jacob. Des domaines entiers sont soumis à cette investigation criminelle visant à « isoler » la cause, à remonter la chaîne jusqu'à l'agent double. Le sida, le cancer demeurent de tels domaines où les vérifications de routine et les actions exceptionnelles alternent pour éradiquer le fléau.

Les deux croisades, la gestionnaire-policrière et la protectrice-maternelle, se rejoignent dans un nœud de la puissance technique avec elle-même. Le drame humain, familial, individuel du mongolisme devient enquête et isolement, détection et prévention de la trisomie. Le syndrome de Down, « trisomie 21 », atteint une fraction chiffrée de la population des nouveau-nés,

1/700^e environ. On soupçonne que le gène responsable de la trisomie le soit également de pathologies éloignées dans leurs effets, comme la maladie d'Alzheimer, la leucémie, qui d'ailleurs atteint les trisomiques dans une proportion singulière et abrège leur espérance de vie. L'étiologie de la leucémie touche elle-même de près à celle du cancer, dont elle est une forme. L'enquête s'oriente vers l'isolement du ou des gènes responsables, on fait ses comptes, on s'aperçoit en comptant les chromosomes de l'espèce humaine que les trisomiques présentent trois copies, et non deux, du 21^e chromosome, d'où le nom (trisomie 21) et l'isolement de la copie surnuméraire, le 47^e chromosome dans une espèce définie par le nombre 46. Un ordinateur ne se dépannerait pas autrement.

Mais qu'on « dépanne » l'homme du mongolisme ne va pas sans perplexité devant la nouvelle attitude de la puissance technique envers la nature. On ne le dépanne pas, d'ailleurs, et le drame humain évoqué demeure menaçant, mais la possibilité de passer de l'isolement en laboratoire ou sur écran, à l'isolement de fait, la mise hors d'état de nuire, est à la portée des institutions et obligerait à appeler « un mal » une malformation, à l'instar des maladies comme leucémie ou Alzheimer, liées par ailleurs, dans leur étiologie, aux découvertes (isolements) réalisées récemment dans la « vache folle ». La redistribution des biens et des maux, des puissances mauvaises ou bénéfiques, s'ensuit nécessairement. Si la prévention éradique une malformation comme si c'était un mal, elle est bénéfique, et « la nature » qui ne remédie pas à elle seule à ce mal le porte en elle. La puissance technologique, armée de ses projets, de ses programmes et de ses coordinations, ainsi que Heidegger l'exprime en 1938 dans « Epoque des conceptions du monde » (in *Chemins qui ne mènent nulle part*, Paris, Gallimard, 1962, en trad.), est à même de transmuter en mal ou en fléau à isoler et à éradiquer les fatalités d'antan, dès lors qu'elles entrent dans la sphère de son efficace, sphère qu'elle tend par nature à étendre.

Un autre exemple peut faire sentir le vacillement des conceptions et des partages à l'époque de la puissance technique : c'est celui des animaux porteurs de substances médicamenteuses qui ne les affectent pas eux-mêmes, mais en font des laboratoires vivants, des installations de synthèse. On frémit devant la possibilité de transformer « à leur insu » des animaux vivants et normaux en usines pharmaceutiques. Pourtant, personne ne considère les laboratoires existants, du moins dans le principe, comme des enfers modernes, des marmites de Satan, sinon au Cambodge, où les Khmers rouges coupaient le bras des enfants vaccinés par les diables impérialistes. Ces animaux-relais prennent une valeur exorbitante, et sont protégés comme des musées où l'on aurait enfermé des trésors. La créature de Frankenstein, ce cauchemar de Mary Shelley, était très en deçà des réalités artificieuses de ces technologies du remède, et c'était sa simplicité, et même son impossibilité, qui en faisaient le monstrueux. Le complexe, le possible ne sont plus monstrueux, ils sont au-delà, dans

une sphère de grande puissance qui appelle la reconnaissance et la régulation intelligente : choix, moyens, objectifs.

La brevetabilité du vivant. — Le droit suit tant bien que mal le mouvement plutôt qu'il ne l'anticipe, et dresse des barrages devant, mais plus souvent derrière l'avancée de la puissance technique. Le droit entérine le fait, faute de l'avoir prévu ! Il cautionne une évolution objective qu'on ne pourrait devancer qu'en étant à la place de la puissance même, et non à celle d'une digue impuissante à arrêter le cours des choses. Sous cet aspect, la controverse adopte une tournure d'une rare violence, comme en témoigne la conclusion d'un article ancien de Bernard Edelman sur « Le droit et le vivant », paru dans *La Recherche* (n° 212, été 1989) : « Breveter la plante, c'est à terme, breveter l'homme. Pourquoi pas ? Hitler a pris les traits, aujourd'hui, de la folie génétique. » Hitler et la folie ! La génétique appliquée au vivant a beau avoir le droit à ses basques, elle a contre elle, et à quel point, les juristes pensants. La cause du vivant et celle de l'homme apparaissent à ceux-ci comme celle du faible devant l'agression du fort, celui-ci se nommant Industrie, profit, capital.

L'historique du droit d'intervenir sur le vivant illustre cette position de repli constant de la partie faible devant une irrésistible et condamnable progression. On étudie l'avancée par petits pas de l'inéluctable : *Plant act* de 1930, aux États-Unis, protégeant d'un brevet la plante cultivée, « invention de l'homme » et non produit de la nature. Convention de Paris, 1961, appelant « machines vivantes » les inventions horticoles ; protection des variétés « arrêtées » et stabilisées dans la loi promulguée la même année ; brevets accordés à des biotechnologies (ex. : mise au point de composants dotant la plante de propriétés de résistance aux pesticides) qui se situent en amont de la variété même ; reconnaissance de la « brevetabilité » d'organismes végétaux en 1985, par la Cour d'appel des brevets ; brevet accordé à des plantes obtenues par une technique d'augmentation du contenu en protéine des cultures fourragères... d'où la mutation juridique du végétal, breveté, qui rejoint le statut des « choses », et ouvre la voie à un statut analogue du vivant non humain, puis enfin, humain : la nature comme « chose » appropriable, exploitable, profitable, sortirait alors du « droit » au fur et à mesure de son évolution en fait.

La faiblesse dénoncée ici de l'institution juridique ne fait qu'accuser davantage celle de cette nature qu'il aurait fallu protéger par une résistance éthique avant d'être juridique, politique en même temps qu'éthique, à la puissance technique, industrielle, financière. Le procès de la faiblesse du droit, qui entérine et blanchit le fait, renvoie au fait même, à la progression des techniques de manipulation du vivant, au « génie génétique ». Cette avancée, on en a déjà évoqué la phase terminale, la puissance de remédier aux maux humains par un regard et une intervention sur la génétique, cette fabrique du corps. En parlant ainsi au nom du droit et

en même temps contre lui, contre le « droit de fait » insuffisant et complaisant, on ne va pas jusqu'au bout d'une idée neuve, sans doute féconde, qui est de doter « la nature » d'une voix humaine, de la poser en sujet de droit, de l'inventer comme partie civile dans le procès de la puissance, ce qui veut aussi bien dire : dans son processus. Réinventer la nature, ce serait lui redonner « la puissance » que l'homme croit détenir contre elle ou sur elle, ce serait repenser la puissance. Poser une nature « sortie tout droit des mains du créateur », c'est l'asservir au décret divin, à une époque où le « créationnisme » a vécu après avoir reculé longtemps devant l'évolutionnisme ; la biologie, depuis un siècle et plus, parle en faveur d'une nature dynamique, en devenir, dotée de lois qui régissent les passages et les métamorphoses, non d'une nature dont la vérité serait à l'origine, et qui ne subirait qu'une lente et navrante dégradation. C'est que la biologie étudie des phénomènes de néguentropie, et non des processus de dégradation, comme dans la thermodynamique. L'idée d'une nature dotée de puissance est plus forte que celle d'une nature soumise, passive, inerte devant la puissance de l'intelligence humaine, si bien que les avancées du génie humain en général, génétique en particulier, révèlent une intelligence du vivant en même temps que le vivant humain se l'approprie dans ses propres artéfacts. En dénonçant une logique du profit, on plaide, croit-on, pour une éthique de sauvegarde, de protection, de prise sur soi. On méconnaît aussi qu'une logique plus audacieuse que celle du seul profit à court terme, aveugle, marchand, pourrait et devrait sortir d'une aussi grandiose avancée de la puissance conjugée du naturel et de l'humain. On ne projette pas assez en défendant, en érigeant en martyr la nature-objet, on ne « se » projette pas, tandis que la technologie vit, elle, sur le mode du projet et du programme.

La nature et ses idéologies. — Il manque donc une idéologie de la nature, ou du moins, il manque une idéologie de l'âge de la puissance, tenant compte des données actuelles du problème. À la définition de la nature comme « Providence » correspond son usage comme fondement du droit politique, en tant que « droit naturel ». Pourtant, les grandes démocraties ne peuvent protéger qu'en cultivant une surpuissance, sans la confondre avec la force pure : cette situation originale, héritée de la victoire sur le totalitarisme et la tyrannie de forme technologique, mais aussi grevée d'anciennes conceptions de « la race », mériterait d'être repensée grâce à une redéfinition de la nature. Les controverses idéologiques, au pire sens du terme, sur l'éthique impliquée dans la génétique (gène égoïste, utilitarisme du vivant, etc.) datent également d'une autre époque, et ressuscitent les préjugés du XIX^e s. concernant l'inégalité des races humaines, la suprématie d'une race (blanche) sur les autres, en un temps où la puissance, en devenant planétaire, a effacé de telles analogies végétalisantes ou animalisantes (les « races » de pommes, de poires, de chevaux, de

chiens...). Jünger s'est attaché, dans *Le Travailleur*, à souligner dès son temps combien le particularisme national ou racial date déjà, face aux formes inédites que prennent les grandes organisations. De ce fait, les problèmes nouveaux que soulève la technique dans sa relation avec ce que la tradition nommait « nature » souffrent tous d'un handicap terminologique et idéologique, ainsi que d'un retard sur l'événement, que la philosophie doit au moins constater, afin de le surmonter.

► AMBROSELLI C., *L'éthique médicale*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1988. — DESCARTES R., *Discours de la méthode*, 5^e et 6^e parties, comm. E. Gilson, Paris, Vrin, 1987. — EDELMAN B. & HERMITTE M.A., *L'homme, la nature et le droit*, Paris, Bourgois, 1988. — GUARD O. & MICHEL B., *La maladie d'Alzheimer*, McGraw Hill, 1989. — GUÉRY F., *Heidegger rediscuté*, Paris, Descartes & Cie, 1985. — HEIDEGGER M., *Nietzsche II*, trad. fr. P. Klossowski, Paris, Gallimard, 1971 ; *Chemins qui ne mènent nulle part*, trad. fr. W. Brockmeier, Paris, Gallimard, 1962. — JÜNGER E., *Le travailleur*, trad. J. Hervier, Paris, Bourgois, 1989. — KANT E., *Idée d'une histoire universelle d'un point de vue cosmopolitique*, trad. L. Ferry, Paris, Gallimard, 1985, p. 187 à 206. — LECOURT D., *Prométhée, Faust, Frankenstein, Fondements imaginaires de l'éthique*, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1996. — NIETZSCHE F., *La volonté de puissance*, Paris, Gallimard, 1947. — ROUSSEAU J.-J., *Discours sur l'origine de l'inégalité parmi les hommes*, Paris, Aubier-Montaigne, 1976. — SCHOPENHAUER A., *Le monde comme volonté et comme représentation*, trad. fr. Burdeau, Paris, PUF, 1966 (notamment livre II : *Le monde comme volonté, premier point de vue : L'objectivation de la volonté*, p. 135 à 218). — SPINOZA, *Éthique*, Première partie : De Dieu, scolie de la proposition XIX, in *Œuvres complètes*, trad. fr. Caillois et al., Paris, Gallimard, 1954, p. 338-339. — TANZI R.E. et al. éd., *Molecular genetic approaches to Alzheimer disease*, Collection Springer Verlag. — Coll. : *La Recherche*, n° 218. — Fondation Narangopoulos, *Expérimentation médicale et droits de l'homme*, Paris, PUF, 1988.

François GUÉRY

→ Biotechnologies ; Génétique ; Heidegger et la question de la technique ; Nature (Système de la) ; Technique.

NATURE (Système de la)

Ce mot de nature viendrait de *nascor*, *natus* (le participe passé du verbe latin) et orienterait vers l'idée de naissance et même de vie, par opposition à ce qui serait fabriqué seulement ou à ce qu'on peut simplement acquérir. La désinence *ura* souligne le résultat de l'opération ; on en rapprochera le mot « nation », lui aussi tiré de *nascor* et *natus*, qui caractérise ceux qui peuvent se prévaloir d'une origine commune. Ce mot de nature revêt des sens multiples : il indique aussi le fond, la puissance, l'essence même. « On peut bien connaître l'existence d'un être, remarquait Pascal, sans connaître sa nature. » Personnifiée, la nature exprime alors la capacité de créer ou du moins d'élaborer, qui ne se compare par aux actions humaines, limitées, chétives, ne touchant pas aux assises des choses. Dans son *Interprétation de la nature*, Diderot en donne un aperçu :

« La nature est opiniâtre et lente dans ses opérations. S'agit-il d'éloigner, de rapprocher, d'unir, de diviser, d'amollir, de condenser, de durcir, de liquéfier, de dissoudre, d'assimiler, elle s'avance à son but par les degrés les plus insensibles. L'art, au contraire, se hâte, se fatigue et se relâche. La nature emploie des siècles à préparer grossièrement les métaux, l'art se propose de les perfectionner en un jour. La nature emploie des siècles à former les pierres précieuses, l'art prétend les contrefaire en un moment » (XXXVII).

Ce mot polysémique s'est surtout différencié à travers les époques : chacune de celles-ci a même ouvert des controverses ou des discussions interminables. Aussi nous proposons-nous d'étudier cette nature de façon spectrale, à travers sa propre évolution ; nous distinguerons même quatre périodes.

1) Les Grecs, les premiers, ont valorisé ce mot. Comme ils ont connu des divisions et même des guerres incessantes, ils ont recherché, plus que d'autres, ce qui pourrait assurer leur équilibre, leur conférer la sérénité. La nature leur a semblé pouvoir régler non seulement les problèmes nés des relations des hommes entre eux (le socio-politique) mais aussi ceux qui viennent de leur lien avec le monde extérieur (ainsi vaincre ses désirs, plutôt que l'ordre du monde). Nous en donnons quelques illustrations :

a) La médecine hippocratique le met nettement en évidence ; il s'agit ici de lutter contre un désordre (organique). Le médecin va justement aider la maladie à s'achever elle-même, car le pathologique est souvent dû à un trouble humoral — une sorte de coction insuffisante, qui entraîne une stase, avec ses conséquences immobilisantes ; il convient de hâter la crise libératrice. *Natura sola medicatrix*. Ou encore, si l'abcès purulent ne peut pas être évacué, avec sa lancette, le médecin lui ouvre une issue. Par là, il devance ou accomplit ce que le corps affaibli ne réalisait pas assez. Mais c'est la nature qui a montré le chemin au thérapeute. A plusieurs reprises, Platon met en garde contre les drogues ; il leur préfère la gymnastique et non moins la frugalité, une diététique élaborée, qu'accompagneront baignation, ablutions, eaux lustrales, ce que nous nommons aujourd'hui un traitement « naturiste ». Dans le *Gorgias*, Platon blâme la flatterie culinaire : le cuisinier — le sophiste du corps — corrompt l'organisme, en même temps qu'il l'enlaidit (avec ses mets abondants et onctueux). Il convient d'exercer le corps lui-même, de favoriser ses propres rythmes : « De tous les mouvements, le meilleur est celui qu'un corps produit par lui-même et en lui-même, parce que c'est celui qui est le plus proche parent du mouvement de l'intelligence et de celui de l'univers. Le mouvement qui vient d'un autre agent est moins bon mais le pire est celui qui, venant d'une cause étrangère, meut le corps partiellement, pendant qu'il est couché et en repos » (*Timée*, 88e).

b) Aristote se chargera de réveiller l'idée de nature et même de l'amplifier, opposant radicalement la *techné* (la technique, la fabrication, le dehors) à la

phusis (la nature, l'intérieur). L'artisan qui réalise un lit, par exemple, inscrit la forme qui convient dans un substrat ; cet agencement obéit d'ailleurs à une nécessité, la fonction ; toutefois, selon Aristote, le menuisier se borne à apposer cette forme sur ou dans le bois ; l'hylémorphisme (de *morphé*, la forme, et *ulé*, la matière) connaît là un demi-échec, du fait de la non-symbiose entre l'idée et ce qui la porte. Antiphon, un disciple, l'exprime de façon originale ; si on enfouit ce lit en terre, à la limite, il pourrait en jaillir un arbre, non pas un lit, car cette figure n'a pas été vraiment inscrite au cœur de la chose qui l'a reçue en quelque sorte du dehors. Le manufacturé souffre d'insuffisance et d'une césure ontologique. Qu'est-ce qui caractérise la nature, sinon l'union indissociable entre ses constituants (la forme et la matière), dont l'être vivant donne la meilleure concrétisation ? Aristote distinguait encore quatre types de cause, à la base de l'objet fabriqué : la cause matérielle (ce avec quoi il est fait, tel le bois de la statue), la cause formelle (ce que l'artiste a tenu à représenter avec sa statue), la cause efficiente (l'agent même qui taille le bois), enfin la cause finale (pour qui travaille-t-il ? Quel est le commanditaire ?). Or, dans la nature, ces quatre causes distinctes n'en font qu'une seule. « Sont choses naturelles toutes celles qui, mues d'une certaine façon continue par un principe intérieur, parviennent à une fin » (*Physique*, II, 8, 199b). Si le naturel frappe par l'union, il se définit plus encore par l'automouvement qui l'anime et témoigne de sa puissance (l'arbre se développe jusqu'à ce qu'il atteigne son être — d'où avec lui le passage de la potentialité à la réalisation, de même le fruit va à son mûrissement). Qu'est-ce que la nature, sinon l'union profonde, l'automouvement, l'achèvement, tandis que nos objets ne se remarquent que par leur inertie, leur désunion ?

c) Mais, si elle nous offre un modèle que nous devons suivre, en quoi la nature nous sauvera-t-elle des guerres et des rivalités entre les hommes ? C'est qu'il convient que la cité renonce aux arrangements artificiels, à la violence et au désir, qu'elle inspire une « mététrique » — la science des proportions, les égalités, mais conformes aux inégalités, les justes distributions, l'ordre cosmique ; la cité doit se calquer sur cette régularité (dont le dehors nous donne l'exemple), tant il est vrai que la nature joue un rôle normativisant.

Les Stoïciens insisteront sur la concorde qui intègre toutes les parties (le mal est absent, ne correspondant qu'à l'isolement d'un fragment) et nous inciteront à nous dépêcher de ce qui dépend de nous, pour vivre conformément à cette nature harmonieuse. La cité platonicienne voudra aussi se bâtir sur une hiérarchie qui respecte les dispositions de chacun et donc assure le commandement aux meilleurs, aux plus compétents. Cette quasi-religion de la nature — référence constante chez les Grecs — explique leur refus de l'entrée des engins ou des machines dans leur économie ou pour leurs travaux. Héron d'Alexandrie a bien fabriqué des automates ou encore l'éolipyle (de l'eau chauffée dans une enceinte métallique, d'où s'échappe la vapeur dont

on connaît la puissance). Archimède a non seulement conçu la célèbre vis mais livré des applications tirées de l'hydrostatique, les Grecs ne donnèrent pas de suite à ces inventions. S'ils avaient l'agriculture et l'élevage (le pasteur et le berger), ils préférèrent encore les ressources arbutives (la récolte des fruits) plutôt que les ressources céréalières (car il faut labourer, ouvrir le sol avec le soc de la charrue).

Ne favorisons pas la violence, le déchaînement et une production qui, intensifiée, va corrompre la cité ! Tout repose sur la tempérance et la stabilité (le non-changement). Ce naturalisme va loin : il prône la soumission à l'ordre de l'univers ; il reconnaît la supériorité du non-fabriqué, ce dont le vivant nous gratifie. Rappelons-nous le supplice de Prométhée, qui vola le feu à l'Olympe, ou la mort d'Icare (le fils de Dédale, le constructeur de statues animées) qui chercha à s'envoler, grâce à des ailes qu'il s'attacha avec de la colle ; mais celle-ci fondit au soleil ; le malheureux s'écrasa au sol. On ne s'évade pas, on ne saurait quitter « la nature ».

2) Va être renversé ce que les Anciens ont vénéré : le cosmos, sa beauté, son harmonie, sa prétendue intelligibilité (le modèle souverain). Copernic, Galilée, les cartésiens substitueront la mécanique rationnelle à la physique (de *phusis*, la nature) qualitative. Le mot même de nature tend à s'éclipser, et, quand il subsiste, il signifie seulement l'univers (Descartes énonce bien « les lois fondamentales de la nature » mais ce sont celles qui expliquent notre monde). Plus net encore, Descartes écrit dans le *Traité de la lumière* : « Par nature, je n'entends point ici quelque déesse ou quelque autre puissance imaginaire mais... la matière et les règles suivant lesquelles se font ses changements. » Bornons-nous à évoquer trois piliers de cette science — l'antithèse de la nature :

a) Le mouvement local (le choc) — jusqu'alors déconsidéré — va suffire à rendre compte des autres formes qui s'expriment dans la génération, l'altération et la croissance. Non seulement la pierre qui tombe obéit à la loi de « la chute des corps » mais, si elle rejoint le bas, ce n'est pas en raison d'une attirance (rejoindre son lieu naturel) mais du fait des inévitables tourbillons qui viennent peser sur elle et l'obligent à gagner le centre de l'univers (la pesanteur). De même, l'hypermécanisme cartésien défend une conception épigénétique, en ce sens que la formation du fœtus ne déroge pas aux lois matérielles, qui suffisent à expliquer sa naissance et son développement.

b) La conduite animale est évidemment tenue pour « machinique » : nul besoin d'en appeler à une nature ingénieuse et rusée, capable de prouesses (à travers l'instinct). La bête n'est qu'un ensemble d'engrenages, de courroies, de poulies, de réservoirs et même d'un foyer, grâce auxquels nous comprenons ses attitudes comme ses déplacements. Les hirondelles sont assimilées à des horloges. En physiologie, le bastion de la vitalité (physiologie, *phusis*, la nature), la pulsation régulière du cœur se conçoit par référence à l'éolipyle :

la vapeur d'un sang qui est chauffé soulève sans cesse les valvules, après quoi celles-ci retombent ou se ferment, et ainsi de suite. La perdrix artificielle que Descartes aurait construite prouverait la validité de ces vues.

c) Enfin, triomphe de la *technè* (l'anti-*phusis*), les machines commencent à arriver et à nous procurer des résultats d'importance. Déjà, les instruments physicaux comme l'orgue de nos églises (qui nous donne une variété de sons) ainsi que la célèbre horloge, montrent jusqu'à quel point vont les fabrications (tant les dispositifs pneumatiques que les ressorts – le spiral qui commande, dans l'horloge, au mouvement du balancier). Le règne de la nature semble avoir pris fin : on éloigne les inclinations secrètes, les entités (les puissances occultes) qu'on lui prêtait et qu'on jugeait inimitables.

Mais ce nouvel « impérialisme » qui se substitue à la scolastique sera tenu pour dangereux par les nouveaux naturalistes : en conséquence, ceux-ci vont nous découvrir une nature dotée de propriétés jusqu'alors inconnues ; ils réinventent une idée de la nature et vont s'en servir comme arme de guerre.

a) D'abord, que de vivants qui se régénèrent après décapitation et même écrasement, à l'exemple du polype de Trembley qui, inversé (le biologiste a mis le dehors au dedans, retournant cet être mi-animal mi-végétal comme un gant), n'en continue pas moins à vivre comme auparavant. La nature se définit alors par sa plasticité et son possible débordement : elle est, mais elle est aussi ce qu'elle n'est pas encore ou ce qu'elle n'a jamais été, puisqu'elle tolère les pires modifications ; nous croyions l'empêcher, mais elle s'oppose à nos interventions ; surtout, elle subsiste, d'où son fond inépuisable et même indéradicable ; elle renaît de ses quasi-cendres.

b) Ce qui caractérise encore cette nouvelle idée de la nature – à suivre Charles Bonnet (*Contemplation de la nature*, 1764) – c'est qu'elle ne se prête plus à nos divisions, à travers lesquelles nous la répartissions (la gradualité, les niveaux ou les échelons). Nous opposions, par exemple, les végétaux et les animaux : ces derniers, à leur tour, avaient été soigneusement et méthodiquement distribués. Aristote avait jeté les bases d'un tel partage (la taxinomie). Mais la nature nouvelle ignore de tels découpages : elle obéit au principe de la continuité (la nature ne fait pas de sauts) qui garantit sa densité comme sa complétude spectrale. Aussi Charles Bonnet va-t-il jusqu'à imaginer tel ou tel maillon qui manque, lorsqu'il croit apercevoir une lacune le long de la chaîne des êtres.

c) Il devait s'ensuivre des décisions ou des vues sociopolitiques : la physiocratie (le gouvernement fondé sur la nature) devait soutenir, en plein XVIII^e s., la stérilité des fabriques (dans la manufacture, le travailleur se borne à changer seulement la forme, à diviser, à creuser ou bien à souder, à agglomérer) ; la nature (la terre) seule produit et augmente ; le grain de blé qui lève donnera un épi qui multipliera la semence : nous semons peu, nous récoltons beaucoup ; la terre permet

cette sorte de proliféité et d'abondance réelle. En conséquence, le politique doit limiter le nombre comme le poids des ateliers, afin de favoriser la culture des champs, en raison de cette nature nourricière et généreuse. Selon le mot de Turgot, c'est la farine qui nous sauvera de la famine.

Si la physiocratie a vite conduit la société à l'échec économique et politique, l'idée d'une nature débordante allait susciter l'essor des disciplines expérimentales (zoologie, botanique, agronomie, géologie) ainsi que la fièvre des voyages et des expérimentations.

3) La troisième période naît de ce que le monde industriel tentaculaire crée vite un milieu délétère et invivable (fumée, bruit, noirceur, entassement) en même temps qu'il déverse sur lui un flot de marchandises uniformes (la camelote). De même, l'usine soumet les travailleurs aux cadences infernales de la machinerie et ruine leur santé. Partout l'empirement la misère, la laideur, la dégradation. Aussi de toutes parts, se lèvent ceux qui croient pouvoir puiser dans la nature un remède à cet univers paléo-technique : nous entrons dans le temps de l'hygiène et d'une nature médicatrice, rédemptrice de nos maux (la sortie, grâce à elle, de ce cauchemar).

a) Certains en appellent à une gymnastique, à la respiration au grand air, à ce qui devrait revigorer la santé. b) Se développe une esthétique végétalisante, dont Ruskin sera le thuriféraire. c) Des urbanistes veulent rendre à la cité ses plages de verdure et d'aération, en même temps qu'ils éloigneraient les matériaux industriels, le fer, la fonte, le verre (de là le retour au bois, à la pierre, à l'argile). Corrélativement les géographes en arrivent à se soucier des paysages et demandent à ce qu'on les protège (la nature fragile). La nature devient ici une source d'énergie (le réservoir dynamologique) qui éloigne les lignes trop raides (le quadrillage) et fête la salubrité. Le romantisme a participé à cette campagne (et très indirectement, les physiiciens de la thermodynamique, puisque l'énergie rend compte tant des phénomènes mécaniques que des phénomènes psychologiques). Le darwinisme, au même moment, renouvelle ou consolide cette idée de nature : les êtres vivants ne dérivent plus d'une sorte de plan ou de *scala naturae* qui aurait rempli une à une les cases d'un échiquier (la rationalité de la complétude et de la série) mais de luttes entre eux comme d'une adaptation aux conditions extérieures. L'emportent ceux que leurs infimes variations cumulatives (la nature ne cessant pas de bouger et de se différencier) avantagent.

4) La quatrième période que nous distinguons est celle dans laquelle nous nous trouvons : elle renfloue, plus que jamais, l'idée de nature. Ce second souffle nous semble d'ailleurs d'autant plus dangereux qu'il risque de dégénérer en une mythologie (le retour à un âge d'or) ou même en l'obligation de se ressourcer à un fond originnaire ; mais, pourquoi, de nos jours, une telle résurgence ?

a) Dans la mesure où la biologie moléculaire a volé

au vivant les procédures de son autoreconstruction et même de son organisation, elle est devenue capable de le « déprogrammer » ou de le « dévoyer » (la transgénose). Est alors brisé ce que la nature concrétisait depuis toujours, un verrou opposé aux tentatives les plus démesurées, ce qui nous prive de la stabilité et de l'inviolabilité (le sanctuaire de la vie). Nous sommes entrés dans l'ère de la transnaturalité qui a perdu ses anciennes limites. b) La génération elle-même (et n'oublions pas que le mot de nature y renvoie, puisqu'il vient de *natus*, ce qui est né) n'échappe plus au prométhéisme : la fécondation *in vitro* l'atteste, ainsi que l'actuel clonage, qui indique, à sa manière, que nous renonçons à la biodiversité et que nous travaillons à la répétition du même (la duplication, le recopiage). c) De son côté, l'agronomie non seulement multiplie les engrais et la chimisation à outrance mais entrave la polyculture (l'alternance heureuse des végétations, la balance, la non-uniformité) ; à la limite, elle s'oriente vers la culture des plantes en dehors du sol. d) L'entrée en force du nucléaire fait peser sur les eaux et les airs les risques de l'irradiation : les sociétés tablent de moins en moins sur les « ressources » du globe, qu'elles ont d'ailleurs gaspillées, sinon épuisées, mais en recourant à la radioactivité et en se dotant de « centrales » qui peuvent répondre à leurs besoins énergétiques, elles courent le risque d'un non-contrôle.

Bref, la nature signifiait un vaste territoire qui englobait les vivants (plantes et bêtes), ainsi que les principes premiers (l'air, l'eau, la terre et même l'ensoulement). Or, nous assistons à leur « corruption » ou, du moins à leur accaparement par certains, qui en tirent avantage. Tout a donc été, à nouveau, bouleversé ; la biurgie commande aux vivants ; quant à l'air, l'eau, la terre et même le soleil, ils ont été confisqués par les uns ou contaminés par les autres. Hier, ils appartenaient à tous (un bien connu) ; aujourd'hui, ils relèvent d'un environnement dégradé, livré aux intérêts particuliers. C'est pourquoi le mot de nature a pris un tour nouveau et décisif : il inspire un mouvement de révolte, ennemi de ce faux progrès (dévastateur) comme de la course à la production qui ne va pas sans la destruction. Il est même invoqué comme salut par ceux qui livrent la guerre à toutes les techniques, et, à travers elles, à la science jugée responsable ; ceux-ci préconisent, par exemple, le retour aux énergies dites douces, celles que notre monde nous offre – le vent, la marée, le soleil.

Si nous ne descendons pas cette pente (régressive), nous conservons le mot de la nature et lui accordons un double rôle : a) D'abord celui d'un garde-fou (la rationalité écologique) : il défend l'éco-industrie, chargée de lutter contre les méfaits incontestables du système productif (l'insécurité, les nuisances, la pollution) ; cette métatechnique se greffe sur la technique afin de la réguler : elle donne lieu à des savoirs et à des moyens liés tous à la décontamination ou à la recyclisation (la transformation des déchets en matériaux utilisables). b) Celui d'indiquer un territoire où règne une rationalité d'un type approprié : s'il ne s'écarte pas de la physique, il la singularise et la complexifie ; en effet, le

vivant appelle des principes et des lois spécifiques qui rendent compte de son fonctionnement ; celles-ci nous empêcheront de verser dans le « réductionnisme », contre lequel le mot de nature devrait nous protéger.

► ARISTOTE, *Physique*, trad. Hamelin, 1907. – BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1938. – BONNET C., *Contemplation de la nature*, in *Œuvres complètes*, 1781. – BUFFON, *Des époques de la nature*, 1778. – CABALLERO F., *Essai sur la notion juridique de nuisance*, 1981. – EDELMAN B. & HERMITTE M.A., *L'homme, la nature et le droit*, Paris, Bourgeois, 1988. – EHRRARD J., *L'idée de nature en France dans la première moitié du XVIII^e s.*, Sevpén, 1963. – HEGEL, *Philosophie de la nature*, trad. Vera, 1863. – MAUPERTUIS, *Système de la nature*, 1751. – MOSCOVICI S., *Essai sur l'histoire humaine de la nature*, Paris, Flammarion, 1991. – PELLICIER A., *Natura, Étude sémantique et historique du mot latin*, 1966. – TOCANE B., *L'idée de nature en France dans la seconde moitié du XVII^e siècle*, Paris, Klincksieck, 1978.

François DAGOGNET

→ Agronomie ; Automate ; Mouvement ; Nature ; Vitalisme et mécanisme.

NATURPHILOSOPHIE

Depuis le milieu du XIX^e s., la notion de Naturphilosophie évoque une sorte de *Sturm und Drang* de la science allemande, un carnaval de la pensée spéculative post-kantienne, où les philosophes et les poètes auraient prétendu concurrencer les sciences positives sur leur propre terrain tout en cédant à la fascination de l'irrationnel, et où les sciences positives elles-mêmes se seraient laissées séduire par ses sirènes philosophiques. Cette image commença à se former dans les années 1840, à l'époque où les philosophies hégélienne et schellingienne perdaient de leur influence, où les savants et les philosophes éprouvaient soit le besoin d'élaborer une vision matérialiste du monde plus conforme aux enseignements des sciences, soit le souci d'en revenir à un Kant censé garantir un rapport plus sain de la philosophie et des sciences. Si l'on en croit J. von Liebig, la Naturphilosophie devrait être comparée à la grande peste : Hegel, « le plus grand philosophe et métaphysicien du siècle entraîna la jeunesse étudiante à l'admiration et à l'imitation : qui pouvait alors échapper à la contamination » ; « Qu'ils sont nombreux, ceux parmi les plus doués et les plus talentueux, que j'ai vu disparaître dans ce tourbillon, que j'ai entendu plus tard se plaindre d'avoir complètement gâché leurs vies » (*Über das Studium der Naturwissenschaften und über der Zustand der Chemie in Preussen*, 1840). Si l'on en croit M.J. Schleiden, la Naturphilosophie serait même responsable du retard de la science allemande : elle aurait « tristement inhibé le progrès des sciences organiques de la nature, et plus grave encore, paralysé et retardé l'aspiration aux connaissances positives et approfondies, au nom de la foi en une prétendue sagesse supérieure » (*Schellings und Hegels Verhältnis zur Naturwissenschaft*, 1844). Mais le mouvement philosophico-scientifique de la

Naturphilosophie ne correspond pas à ces caricatures. Il s'agit en fait d'un vaste programme de recherche aux orientations multiples, qui s'engage dans l'étude de nombreux objets et qui mobilise des méthodes, de même que des positions philosophiques et épistémologiques, extrêmement variées, parfois même contradictoires. La Naturphilosophie ne commence véritablement à exister comme mouvement intellectuel identifiable qu'au milieu des années 1790, avec les *Idées pour une philosophie de la nature* de Schelling (1797) et les premiers ouvrages de C.A. Eschenmayer (*Sätze aus der Naturmetaphysik auf chemische und medizinische Gegenstände angewandt*, 1796 ; *Versuch die Gesetze magnetischer Erscheinungen aus den Sätzen der Naturmetaphysik mithin a priori zu entwickeln*, 1797). Ce programme de recherche perd de son dynamisme dès la fin des années 1810.

Le contexte philosophique et scientifique de la Naturphilosophie

La vision du monde de Goethe et Herder. — La Naturphilosophie allemande dépend d'un contexte scientifique et philosophique déterminé. Sa position philosophique générale est déterminée par les œuvres de Herder et de Goethe, même si, comme nous le verrons, à cette première d'influence vient s'ajouter celle de la philosophie kantienne. On peut dire avec J. Hoffmeister que la Naturphilosophie est tributaire d'une vision du monde formulée tout d'abord par Herder, principalement dans ses *Idées pour la philosophie de l'histoire de l'humanité* (1784-1787) et par Goethe dans ses écrits scientifiques, avant d'être fondée philosophiquement par Hegel et Schelling : « Hegel découvre cette vision, Goethe la construit » ; « Schelling transcendantalise et Hegel logicise la vision goethéenne du monde » (*Goethe und der Deutsche Idealismus, eine Einführung zu Hegels Realphilosophie*, p. IX). Les Naturphilosophies systématiques de Hegel et Schelling, de même que la Naturphilosophie romantique de Novalis et la Naturphilosophie théosophique de Baader, trouvent effectivement chez Herder et Goethe une puissante source d'inspiration. La vision goethéenne du monde se caractérise par trois traits principaux. Elle repose tout d'abord sur l'idée d'une continuité de la nature et de l'esprit, ce qui fera dire à Schelling dans l'introduction de ses *Idées pour une philosophie de la nature*, que la nature est l'esprit visible et que l'esprit est la nature invisible. Cette vision du monde repose ensuite sur une compréhension de la nature comme lieu d'extériorisation d'un ensemble de forces gouvernées par la polarité : attraction et répulsion mécanique, polarité magnétique, électricité positive et négative, forces chimiques de l'acide et de l'alcalin, irritabilité et excitation organique en sont les différentes formes. Elle repose enfin sur l'idée suivant laquelle les différents phénomènes naturels correspondent aux différents degrés d'une métamorphose dans laquelle la nature s'élève de l'inférieur au supérieur : c'est le schéma

appliqué par Herder pour décrire l'élévation progressive de l'inorganique jusqu'à l'histoire, par Goethe pour décrire la métamorphose des plantes, par Schelling et Hegel pour décrire le système de la nature. De cette vision du monde résultent quelques conséquences méthodologiques générales. La thèse de l'identité de la nature et de l'esprit conduira à voir dans la nature un être total, même une totalité organique, dont la philosophie et la science devront restituer l'unité. En outre, la nature étant considérée elle-même comme le développement de l'esprit, la connaissance de la nature pourra être interprétée soit comme une recréation de la nature par la pensée, soit comme une pénétration de la vie naturelle par empathie, une empathie dans laquelle l'esprit se retrouve dans la nature, dans laquelle il vit intellectuellement la vie physique de la nature. Quant à l'idée d'une élévation graduelle de la nature par métamorphose, elle conduit à valoriser le rôle de l'analogie dans la connaissance et engage à l'élaboration de morphologies. Elle incite en effet à rechercher des analogies entre les phénomènes naturels d'ordre différents afin de faire apparaître leur lien naturel, et à rapporter les différents phénomènes d'un même genre à un phénomène originaire (*Urphänomen*) livrant à la fois leur structure commune et la loi qui gouverne leur développement.

Telles sont les grandes caractéristiques d'une vision du monde qui, loin de fournir une définition de la Naturphilosophie, ne définit qu'un cadre général. Chaque type de Naturphilosophe retiendra certains des traits de cette vision du monde, pour les combiner et les interpréter librement, tout en rejetant certains autres. La démarche analogique, revendiquée par Herder, Novalis et Baader, sera dénoncée par Goethe, Schelling et Hegel. L'idée d'une identité de la nature et de l'esprit sera nuancée par Hegel qui verra dans la nature l'aliénation de l'esprit. Alors que cette identité de la nature et de l'esprit conduit Herder à une apologie de l'ignorance et un mépris de l'expérience, le jeune Schelling et le vieil Hegel insisteront sur la nécessaire articulation du savoir philosophique et du savoir positif, Goethe interprétant pour sa part le savoir véritable comme une description intégrale de l'empirie. Le paradigme de la polarité n'était pas non plus admis par tous. Novalis voyait dans la nature l'image d'une harmonie plutôt que celle d'un conflit d'opposés. Au contraire, le Schelling des *Idées pour une philosophie de la nature* (1797), suivant en cela Eschenmayer, tentait de combiner la polarité des forces d'attraction et de répulsion dont Kant avait fait le présupposé des *Principia* de Newton (*Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*, 1787), avec l'opposition originaire des deux activités du Moi dont Fichte avait fait le fondement de la philosophie transcendantale (*Fondation de la doctrine de la science*, 1794). Le paradigme de la polarité était ainsi interprété en un sens à la fois physique et transcendantal, alors qu'un Baader trouvait le sens de la polarité des forces dans une lecture des ouvrages de J. Boehme. Il n'est pas jusqu'à l'idée d'une élévation progressive de la nature qui ne soit

l'objet de divergences. Ainsi Hegel réservera-t-il la métamorphose des niveaux de la nature à notre pensée de la nature, en refusant toute idée d'un passage réel des niveaux les uns dans les autres.

Le contexte institutionnel et épistémologique. — Les grandes thèses constitutives de cette vision goethéenne du monde définissent donc le cadre général dans lequel s'inscrit le programme de recherche de la Naturphilosophie. La Naturphilosophie ne peut cependant pas être réduite à un simple mouvement philosophique, et sa spécificité ne relève pas que de ces quelques thèses relatives à l'être de la nature et à ses rapports avec l'esprit. Elle constitue un programme de recherche, indistinctement philosophique et scientifique, dont la mise en œuvre fut conditionnée par les modalités de l'interaction de la science et de la philosophie dans l'Allemagne de l'époque.

Contrairement à la science française et à la science anglaise du début du XVIII^e s., les sciences positives n'y disposent pas alors d'une autonomie institutionnelle leur garantissant une indépendance vis-à-vis de la philosophie. L'enseignement des sciences de la nature est encore dispensé dans les facultés de philosophie, ce qui rend possible et encourage les échanges entre scientifiques et philosophes. Dans ce contexte, les scientifiques n'hésitent pas à chercher chez les philosophes la clarification des fondements de leurs disciplines, alors que les philosophes n'ont pas encore abandonné l'espoir de répondre à leurs attentes. Ainsi s'explique le fait que les hypothèses dynamistes, que Kant formulait dans les *Premiers principes métaphysiques de la nature*, aient pu trouver un accueil si favorable dans la science de l'époque. Kant avait tenté de montrer que les principes de la mécanique newtonienne exigeaient que l'on abandonne les représentations atomistes ou corpusculaires, et que l'on affirme l'antériorité des forces sur la matière. Le conflit des forces d'attraction et de répulsion apparaissait ainsi comme premier, et la matière comme le résultat de l'équilibre de ces deux forces. Ces thèses, largement acceptées par les physiciens de l'époque, allaient définir le programme de recherche de la science allemande du tournant du siècle.

Le contexte institutionnel n'explique pas tout. Le formidable écho des thèses kantienne dans la culture scientifique de l'époque résulte également d'une conjoncture épistémologique bien déterminée. L'époque est celle du plein essor de la chimie et de l'électrologie, de l'étude du galvanisme (notamment animal) et du magnétisme. Dans la mesure où elles étudient des phénomènes faisant intervenir des forces polarisées, ces disciplines semblent confirmer certaines des intuitions de Kant. Nombreux furent ceux qui tentèrent de prouver que tel est effectivement le cas. Il s'agissait alors de compléter les *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*. Kant n'y avait appliqué les principes de la dynamique qu'à la mécanique, il fallait les appliquer aux phénomènes magnétiques, électriques, chimiques, puis à l'intégralité des phénomènes étudiés par les sciences physiques,

voire à la nature organique elle-même. Tel est le projet de scientifiques et de vulgarisateurs qui, comme C.F. Link (*Beiträge zur Physik und Chemie*, 1797) et F. Hidelbrandt (*Anfangsgründe der allgemein dynamischen Naturlehre*, 1807), s'engagent dans des synthèses des différentes sciences physiques pour en faire apparaître la conformité avec la philosophie dynamiste. Telle est également l'ambition affichée d'un philosophe comme Schelling, qui dans les *Idées pour une philosophie de la nature* s'applique aux différentes sciences physiques, avant d'en venir dans *l'Âme du monde* (1798) aux phénomènes organiques. Par ce deuxième ouvrage, il se propose d'effectuer la synthèse des deux sources kantienne de la Naturphilosophie : les *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature*, et la *Critique de la faculté de juger* (1790), où Kant étudiait notamment les conditions de l'attribution de la finalité à la nature et la structure de l'organisme. On voit donc que si la vision du monde de la Naturphilosophie renvoie à Herder, la pratique de la science à l'âge de cette même Naturphilosophie puise dans une philosophie kantienne qu'il s'agit de prolonger et d'accomplir à la fois philosophiquement et scientifiquement. Ces deux orientations sont aussi indissociables que le sont alors philosophie et science. C'est ce qui suffit déjà à interdire de faire de l'irrationalisme une caractéristique générale de la Naturphilosophie.

L'interprétation des savoirs philosophiques et scientifiques semblait requise tout particulièrement dans les disciplines de la physique alors en plein développement. Les principes y étant peu assurés, la réflexion philosophique était partie prenante de la pratique scientifique. Les hypothèses dynamistes y remplissaient une double fonction. D'une part, elles étaient chargées de caractériser la nature des différents types de forces agissant dans les différents niveaux de la nature physique, et de préciser le rapport spécifique des forces et de la corporéité en chacun de ces niveaux. C'est en ce sens que l'on trouve dans la plupart des manuels de chimie rédigés à l'époque des références aux *Principes* de Kant et aux *Idées* de Schelling (par exemple : J.F.A. Götting, *Grundrisse der Chemie. Nach den neuesten Entdeckungen entworfen*, 1798-1800 ; J.B. Richter & D.L. Bourguct, *Chemischer Handwörterbuch*, 1798-1805 ; J.B. Trommsdorf, *Systematisches Handbuch der gesammten Chemie zur Erleichterung des Selbststudiums dieser Wissenschaft*, 1800-1803 ; P.M. Klaproth & F. Wolf, *Chemisches Wörterbuch*, 1805-1810 ; F. Hidelbrandt, *Encyclopädie der gesammten Chemie*, 1809). L'usage de la dynamique kantienne avait également une seconde fonction : fournir une théorie de la spécificité de l'ensemble des sciences physiques. Le programme scientifique de la Naturphilosophie apparaît sur ce point précis comme une réponse au programme réductionniste du cercle de Laplace. Alors que les efforts de Laplace et de ses collaborateurs, Biot, Haüy, Berthollet, Poisson, reposaient sur l'idée d'une continuité de la mécanique et de la physique, et qu'ils tentaient d'appliquer les principes de la mécanique newtonienne

aux différents phénomènes physiques (électricité, chaleur, cristaux, affinités chimiques...), la dynamique kantienne permettait de rendre compte d'une véritable spécificité des sciences physiques par rapport à la mécanique. La fondation dynamiste de cette spécificité pouvait prendre deux formes différentes. Soit, avec Kant, l'on considérerait seulement que les phénomènes physiques se définissent par le fait que la polarité des forces y prend une forme qualitative et non plus seulement quantitative ; c'est la position adoptée par Link et Hildebrandt. Soit l'on allait jusqu'à considérer, avec H.C. Oersted qui s'inspire alors de Schelling plus que de Kant, que les sciences physiques étudient pour elles-mêmes les forces véritables dont la mécanique n'étudie que l'extériorisation dans le mouvement : « Peut-être suivrait-on encore mieux le développement de la science en réunissant en un tout ce qu'on a jusqu'ici appelé physique ou chimie. On définirait donc désormais la physique comme la science des lois générales de la nature, et on la diviserait en deux grandes parties, celle qui contient les lois du mouvement, et celle qui contient les lois des forces intérieures. On pourrait appeler ces deux parties la partie mécanique, et l'autre la partie dynamique » (*Recherches sur l'identité des forces électriques et chimiques*, 1812). Cette seconde option revenait à inverser le programme laplacien et à considérer que la physique est la vérité de la mécanique. Elle pouvait soit conduire à un rejet pur et simple de la mécanique newtonienne et à une substitution d'un organicisme à un réductionnisme – c'est l'option privilégiée par Schelling et par le jeune Hegel –, soit à une tentative de refonte des principes de cette science à la lumière des principes de la philosophie dynamiste – c'est la solution privilégiée par le Hegel de la période de maturité.

Ce contexte institutionnel et ce contexte épistémologique ont contribué à donner à la science allemande de l'époque sa forme spécifique. Puisant son ontologie dans le dynamisme, n'hésitant pas à s'aventurer dans une réflexion philosophique sur ses fondements, elle ne pouvait que susciter les critiques des représentants de la science française et de la science anglaise (voir par exemple la préface du traducteur français de l'ouvrage d'Oersted cité ci-dessus). Et ce contexte contribua également à la constitution d'un style philosophique particulier. Le recours des scientifiques à des concepts philosophiques justifiait en retour que les philosophes quittent le strict point de vue de l'abstraction de la philosophie transcendantale et qu'ils s'engagent par eux-mêmes dans l'étude des modalités de l'application des principes généraux aux phénomènes particuliers. C'est là une caractéristique méthodologique fondamentale de la Naturphilosophie. Elle fut parfois l'occasion de revendiquer un véritable impérialisme philosophique comme chez le Schelling de l'*Esquisse d'un système de Naturphilosophie* (1799) qui soutient que la Naturphilosophie doit construire *a priori* l'intégralité des phénomènes de la nature, qu'il n'y a pas d'autre explication que l'explication philosophique, que les

sciences positives doivent se cantonner à la simple observation de la nature et à la vérification de ce qui a été déduit par la philosophie (introd., § 4). Mais cette même caractéristique méthodologique pouvait également conduire Hegel à critiquer la prétention de la philosophie à étudier la nature par elle-même, sans recourir aux médiations d'un savoir positif qui seul peut lui accorder sa concrétion véritable (*Encyclopédie des sciences philosophiques*, 1827, 1830, § 246 sq et add., § 268 add.).

L'essentiel est sans doute que l'époque de la Naturphilosophie est celle où les frontières de la science et de la philosophie s'estompent, et où il est difficile de distinguer nettement entre un scientifique s'inspirant ponctuellement de la philosophie dynamiste (par exemple J.B. Richter, dans *ses Anfangsgründe der Stöchiometrie oder Messkunst chemischer Elemente*, 1792-1794), un scientifique tentant de donner une confirmation scientifique des principes fondamentaux de la Naturphilosophie (c'est le cas d'Oersted), un philosophe tentant de tirer en scientifique les conséquences scientifiques d'intuitions philosophiques et esthétiques (Goethe entre dans cette catégorie), un philosophe tentant de dévoiler la philosophie de découvertes récentes (Schelling dans *ses Idées*) et un philosophe tentant d'effectuer une synthèse du savoir scientifique de son temps (comme par exemple Hegel de la maturité). Il n'est pas surprenant que certains, dans ce continuum des savoirs philosophiques et scientifiques, aient trouvé l'occasion de développer des discours prétendant être scientifiques, mais n'hésitant pas à combiner les normes du savoir positif et celles de la physique spéculative (J.J. Winterl, *Darstellung der vier Bestandtheile der anorganischen Natur*, 1804 ; J.W. Ritter, *Beweis das ein beständiger Galvanismus den Lebensprozess in dem Thierreich begleitet*, 1798, *Das Elektrische System der Körper*, 1805).

Lorsque Liebig et Schleiden s'emportent contre la Naturphilosophie, ils expriment leurs insatisfactions personnelles et le regret d'avoir été les contemporains de cette période de la vie intellectuelle allemande. Mais ils témoignent également du fait que les temps ont changé, que les savoirs n'obéissent plus aux mêmes partages disciplinaires et que le paysage de la science s'est modifié. Hegel le déplorait déjà à la fin de sa vie : « Si les physiiciens allemands ont admis pendant un temps cette dynamique pure, la plupart de ces physiiciens, pendant les derniers temps, ont trouvé à nouveau plus commode de revenir au point de vue atomistique et, contre l'avertissement de leur collègue, le regretté Kästner, de considérer la matière comme constituée de corpuscules infiniment petits nommés atomes, lesquels atomes seraient ensuite mis en relation les uns avec les autres par le jeu des forces attractives et répulsives attachées à eux, ou encore d'autres forces quelconques. Il y a alors ici également une métaphysique dont il existerait assurément un motif suffisant de se garder, du fait de l'absence de pensée qui la caractérise » (*ibid.*, § 98, add. 1).

Les formes de la Naturphilosophie

Schleiden et Liebig ne tiennent pas non plus compte des différents styles de Naturphilosophie et des différents types de rapport de la philosophie et des sciences qui en résultent. Nous avons suggéré que les Naturphilosophies peuvent être classées suivant les modalités de la combinaison des rationalités philosophique et scientifique. Elles peuvent également l'être suivant leur orientation philosophique générale : il convient à ce propos de distinguer les Naturphilosophies romantiques, théosophiques, transcendantales, métaphysiques et dialectiques.

Les différents projets de la Naturphilosophie. – Les catégories de « philosophie romantique de la nature » et de « science romantique », utilisées par certains historiens de la science pour caractériser la Naturphilosophie dans son ensemble, ne peuvent que prêter à confusion, car s'il existe bien une forme romantique de Naturphilosophie, celle-ci doit être distinguée d'autres formes de Naturphilosophie. On peut considérer *Les disciples à Sais* et l'*Encyclopédie* de Novalis (posthumes, l'auteur est mort en 1801) comme des exemples caractéristiques de la Naturphilosophie romantique. Fragmentaire et anti-systématique, elle voit dans la nature un produit de l'imagination et un symbole de l'esprit humain. Postulant que le tout peut être retrouvé en toute chose, elle part à la recherche des analogies entre les phénomènes de différents ordres, tentant ainsi d'accéder à un savoir supérieur, où poésie et philosophie sont censées s'unir l'une à l'autre. Une telle Naturphilosophie doit déjà être distinguée de la Naturphilosophie théosophique de Baader dont l'objectif est de procéder à une rechristianisation des sciences de la nature en retrouvant la science des choses divines dans celle des choses naturelles. Elle doit également l'être d'une Naturphilosophie empirique, celle de Goethe qui entend que le savoir s'emploie à une description intégrale de l'empirie tout en rendant compte de sa dimension esthétique, et celle d'A. von Humboldt qui destinait son *Cosmos* (1845) à donner « une vue empirique du tout de la nature sous la forme scientifique d'une peinture du monde ».

La Naturphilosophie romantique doit être distinguée plus nettement encore des Naturphilosophies que l'on peut nommer systématiques dans la mesure où elles s'inspirent de la philosophie transcendantale et de la tentative fichtéenne visant à constituer la philosophie en « science de la science » ou en « théorie de la science » (*Wissenschaftslehre*) (*Sur le concept de la doctrine de la science*, 1794). Parmi ces Naturphilosophies, il faut distinguer les Naturphilosophies transcendantales de Fries ou Link, et les Naturphilosophies métaphysiques qui correspondent aux travaux de Schelling de 1799 à 1809, à ceux de l'école schellingienne, et également à un ouvrage comme *De la volonté dans la nature* (1836) de Schopenhauer, où il s'agit de retrouver la trace du principe métaphysique de la volonté dans les différents êtres naturels. On doit

enfin mentionner Hegel, qui comme Schelling, fera de la Naturphilosophie une partie du « système de la science », mais qui propose en fait un projet original combinant certains traits des Naturphilosophies transcendantales et de la Naturphilosophie schellingienne.

La première philosophie schellingienne de la nature, celle des *Idées pour une philosophie de la nature* et dans une moindre mesure celle de *L'Âme du monde*, constitue encore une tentative visant à appliquer les principes de la philosophie transcendantale aux différents phénomènes de la nature. C'est seulement à partir de l'*Esquisse d'un système de Naturphilosophie* (1799) et dans la *Déduction générale du processus dynamique* (1800) que la philosophie de la nature prend la forme d'une physique spéculative visant à construire la nature *a priori* en dérivant l'intégralité des phénomènes naturels à partir des forces originaires de la nature. Il s'agit de recréer la nature par la pensée, la « construire » en montrant comment chaque niveau de la nature représente une étape, ou une « puissance » (*Potenz*), de la production de la nature par la polarité originaires d'une force d'expansion et de rétraction. Cette physique spéculative est une physique, dans la mesure où elle suppose un point de vue absolument réaliste et non plus seulement transcendantal : elle ne voit plus dans les forces de la nature seulement la marque de l'activité d'un sujet de la connaissance, mais bien l'activité de la nature elle-même. Mais cette physique est une physique spéculative, car l'activité de la nature est ici activité inconditionnée, productivité absolue, et non plus seulement l'activité conditionnée et dérivée que les sciences de la nature se représentent par le concept de « force » (*Esquisse*, introd., § 1-3). Les principes de cette physique spéculative furent appliqués à la nature par Schelling lui-même et par différents auteurs qui peuvent être considérés comme les représentants d'une école schellingienne (notamment L. Oken, *Lehrbuch der Naturphilosophie*, 1809, et H. Steffens, *Grundzüge der philosophischen Naturwissenschaft*, 1806), bien que Schelling ait toujours exprimé des réserves sur la valeur de leurs travaux.

Avant de faire l'objet de dénonciations positivistes et néokantienne, ces Naturphilosophies métaphysiques furent critiquées par les tenants de la Naturphilosophie transcendantale et par Hegel. Les tenants du transcendantalisme kantien lui reprochèrent de prétendre connaître la nature *a priori*, sans prendre assez en compte la science empirique. Un auteur comme J.F. Fries ajoutait que Schelling procède à une ontologisation abusive des modalités de notre connaissance de la nature et que le sens qu'il donne aux forces originaires de la nature revient à les priver de toute signification physique (*Reinhold, Fichte und Schelling*, 1803). Hegel critiqua la Naturphilosophie pour des motifs semblables, ainsi que pour son schématisme, c'est-à-dire l'application mécanique de l'idée d'un équilibre des forces opposées à tous les phénomènes, et pour son formalisme, l'articulation seulement extérieure et souvent arbitraire de la spéculation et de l'empirie (*Phénoménologie de l'esprit*, 1807, Préface ;

Encyclopédie, 2^e partie, add. introductif). Les Naturphilosophies transcendantales se distinguent de la physique spéculative par leur contenu comme par leur méthode. Par leur contenu parce qu'elles considèrent que la polarité des forces appartient aux conditions de la pensée des phénomènes avant d'appartenir à la nature elle-même. Aussi refusent-elles de donner à la polarité des forces une autre existence que celle des différentes forces physiques considérées par Schelling comme secondaires et dérivées. Ces Naturphilosophies se distinguent également de la physique spéculative pour une raison de méthode. Conformément à l'esprit de la philosophie kantienne, elles conçoivent leur entreprise comme une explicitation des conditions de possibilité des différentes sciences de la nature et elles rejettent toute entreprise visant à construire la nature *a priori*.

Le projet hégélien est souvent confondu avec le projet schellingien. Pourtant, sur plusieurs points, il s'apparente à celui des Naturphilosophies transcendantales. On retrouve en effet chez Hegel le refus d'une spéculation détachée des savoirs positifs et la réduction des forces aux forces physiques étudiées par les savoirs positifs. Par ailleurs, si la nature apparaît dans l'*Encyclopédie* comme un système de niveaux, Hegel refuse toute idée d'un passage réel d'un niveau dans un autre, interdisant par là même la lecture de sa Naturphilosophie comme une histoire de la production de la nature (§ 249). En définitive la Naturphilosophie hégélienne se présente comme un type de fondation original des sciences de la nature plutôt que comme une recréation de la nature par la pensée. Comme les Naturphilosophies transcendantales, elle refuse de considérer une autre nature que celle qui se donne dans la phénoménalité et qui est étudiée par les sciences positives. Elle en propose une fondation originale, tributaire du réalisme de la physique spéculative : incarner les principes des sciences dans l'être total de la nature, en les faisant apparaître comme les différents moments de l'être du niveau particulier de la nature étudié par une science particulière, puis en faisant apparaître ces différents niveaux comme les différents moments de l'être total de la nature. C'est la dialectique qui permettra d'intégrer le savoir positif dans le discours spéculatif tout en conservant et en en déduisant la vérité.

Une critique des sciences modernes ? — On a coutume de considérer que le projet de la Naturphilosophie est solidaire d'un rapport fondamentalement vicieux de la philosophie aux sciences. Nous avons déjà noté que ce jugement repose pour une part sur une illusion rétrospective. On doit ajouter que la Naturphilosophie fut l'occasion de progrès scientifiques en physique, avec la découverte de l'électromagnétisme par Oersted (fortement influencé par Schelling, Ritter et Winterl), tandis que des auteurs comme Goethe et Oken, ou comme le physiologiste J. Müller (fortement influencé par Hegel), contribuèrent au développement des sciences de la vie au début du XIX^e s. Cependant, la Naturphilosophie s'est également rendue célèbre soit

pour son mépris des savoirs positifs, soit pour de retentissantes polémiques contre certains des savoirs positifs qui semblaient les mieux fondés. Mais là encore, il faut nuancer.

Le mépris du savoir scientifique est surtout le fait des Naturphilosophies romantique et théosophique qui prétendent toutes deux accéder à un savoir supérieur au savoir rationnel. C'est là une ambition qui est dénoncée par Schelling à l'époque de ses philosophies de la nature, par Goethe et par Hegel, ainsi que par les Naturphilosophies transcendantales. Il reste néanmoins que par certains traits, la vision goethéenne du monde constitue une réaction contre la vision mécaniste de la nature, qu'elle était appelée à entrer en contradiction avec la théorie newtonienne, et par là même, avec certains des fondements de la science moderne de la nature. Il s'agit pour Goethe et pour bien d'autres philosophes et scientifiques de l'époque de substituer l'image d'une nature hétérogène, qualitative, dynamique, évolutive et dotée de structures internes, à l'image mécaniste d'un monde homogène, quantitatif, inerte, statique, et régi par de simples rapports de composition. Aussi la philosophie de la nature devait-elle entrer en conflit frontal avec les théories de Newton. De tels conflits sont associés au nom de Hegel et de Goethe. Ce dernier s'en prit à l'*Optique* newtonienne dès ses *Beiträge zur Optik* (1791), avant de donner à sa critique la forme magistrale de sa *Farbenlehre* (1810). Goethe reproche à Newton de représenter la lumière comme un être composé, contenant en lui les différentes couleurs, alors que celles-ci s'expliquent selon lui par la polarité de la lumière et de l'obscurité. La *Théorie des couleurs* tente de rendre compte de l'intégralité des phénomènes faisant intervenir la lumière et la couleur en s'appuyant sur de nombreuses expériences (partie didactique), elle comporte également une analyse critique de la théorie newtonienne (partie polémique) et une histoire de l'optique (partie historique). Elle séduisit Schopenhauer, de même que Schelling et Hegel qui l'intégrèrent à leurs philosophies de la nature.

Le jeune Hegel est également célèbre pour une violente polémique contre la théorie newtonienne. Dans sa dissertation d'habilitation, *Sur les orbites des planètes* (1801), il dénonce à la fois l'usage du principe d'inertie et la fonction conférée aux mathématiques par Newton. Le principe d'inertie est jugé incapable de jouer le rôle de principe physique général dans la mesure où il ne peut rendre compte de la vitalité interne de la nature. Pour ce qui est de la place des mathématiques dans les *Principia*, Hegel déplore que Newton ait confondu les rapports mathématiques et les rapports physiques et qu'il ait tenté d'expliquer mathématiquement des lois qui ne peuvent l'être que philosophiquement. Cette critique radicale de la mécanique newtonienne ne fait que tirer les conséquences de certaines thèses de la naturphilosophie schellingienne. Schelling soutenait que la nature est originairement un tout organique (*Esquisse*, 1^{re} partie), et que les phénomènes étudiés par la mécanique s'expliquent par la tendance de la matière à

s'organiser (2^e partie). Il en concluait à l'erreur fondamentale de la mécanique newtonienne : « Les modifications ou déterminations dont la matière ainsi considérée abstraitement et seule capable, et où n'est jamais d'essentialité, sont par exemple la diversité de lieu, de figure, de grandeur, etc. [...] Ce sont ces diversités purement passives de la matière pour l'ensemble est nommé mécanisme. La conception mécaniste de la nature repose donc sur de pures abstractions, elle prend naissance lorsque l'on fait abstraction de toute réalité et positivité de la matière pour prendre en considération ce qui est nul » (*Aphorisme sur la philosophie de la nature*, 1806, § CXXIV-CXXV).

De tels excès ne signifient pas que la vision goethéenne du monde interdisait une pratique de la science et de la philosophie qui eût été conforme aux principes de la science moderne. L'influence des principes de la Naturphilosophie sur la science allemande de l'époque suffit déjà à le montrer. L'exemple de la *Naturphilosophie* du Hegel de la maturité permet de le confirmer. Pour lui comme pour d'autres philosophes et scientifiques d'alors, il ne s'agissait pas tant d'opposer la vision goethéenne du monde à la vision mécaniste du monde, que de les articuler l'une à l'autre. Sa *Naturphilosophie* est composée de trois parties intitulées mécanique, physique, organique. Si la troisième est conçue suivant le paradigme de l'organisme et la seconde suivant le paradigme du conflit des forces (ce qui justifie notamment le choix de l'optique goethéenne au détriment de l'optique newtonienne), la première partie est bien interprétée comme le lieu de la combinaison newtonienne de l'inertie et de la gravitation. Il ne s'agit plus tant de contester la théorie de Newton que d'en rectifier les concepts afin de les rendre conformes à l'ontologie dynamiste de la nature. Hegel considère qu'il existe une contradiction entre la représentation de la matière qui est impliquée par le concept d'inertie et celle qui dépend du principe de la gravitation universelle. Le principe d'inertie implique en effet que les forces soient extérieures à la matière alors que la gravitation suppose au contraire que la matière ait la capacité d'agir sur elle-même. Hegel décide de trancher en faveur de la gravitation. Sa mécanique entreprendra de tirer toutes les implications du principe newtonien de l'universalité de la gravitation et proposera à cette fin une refonte des concepts newtoniens. Mais elle n'en viendra pas pour autant à refuser toute pertinence au principe d'inertie, pivot de la vision mécanique du monde et cible des Naturphilosophies organicistes de l'école schellingienne. Bien au contraire, Hegel en fera un symbole de l'extériorité et de la finitude irréductible qui définit l'être de la nature en général (*Encyclopédie*, § 247, 263).

► AYRAULT R., *La genèse du romantisme allemand*, t. 4 : *En vue d'une philosophie de la nature*, Paris, Aubier, 1976. — BACH T., « Kiehlmeier als "Vater der Naturphilosophie" ? Anmerkungen zu seiner Rezeption im deutschen Idealismus », in TORSTEN KANS K., *Philosophie des organischen in der Goethezeit*, Stuttgart, Franz Steiner, 1994, p. 232-251. — BONSIEPEN W., *Die Begründung einer Naturphilosophie bei Kant*,

Schelling, *Fries und Hegel*, Stuttgart, Vittorio Klostermann, 1997. — CHATELET G., *Les enjeux du mobile. Mathématique, physique, philosophie*, Paris, Le Seuil, 1993. — CUNNINGHAM A. & JARDINE N., *Romanticism and the Sciences*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1990. — DURNER M., « Die Rezeption der Zeitgenössischen Chemie in Schellings früher Naturphilosophie », in HECKMANN R., KRINGS H. & MEYER R.W., *Natur und Subjektivität. Zur Auseinandersetzung mit Schellings Naturphilosophie*, Stuttgart-Bad Cannstatt, Frommann Holzboog, 1985, p. 15-38. — ÉLIE M., *Lumière, couleurs et nature. L'optique et la physique de Goethe et de la Naturphilosophie*, Paris, Vrin, 1993. — ENGELHARDT D. VON, « Quellen und Zeugnisse zur Wechselwirkung zwischen Goethe und den romantischen Naturforschern », *Acta Leopoldina* 20, 1992, p. 31-55 ; « Naturwissenschaften und Medizin in den "Jahrbüchern für wissenschaftliche Kritik" (1827-1846) », in JANME C., *Die Jahrbücher für wissenschaftliche Kritik*, Hegel Berliner Gegenakademie, Stuttgart-Bad Cannstatt, Frommann-Holzboog, 1994, p. 505-530 ; « Wissenschaft der Natur und Philosophie der Natur um 1800. Principien, Dimensionen, Perspektiven », in TORSTEN KANS K., *Philosophie des organischen in der Goethezeit*, Stuttgart, Franz Steiner, 1994, p. 252-263 ; « Einleitung », in STEFFENS H., *Was ich Erlebte*, Bd., Stuttgart-Bad Cannstatt, Frommann-Holzboog, 1995, p. 9-79. — FAIVRE A., *Philosophie de la Nature. Physique sacrée et théosophie XVIII-XIX siècle*, Paris, Albin Michel, 1996. — FALKENBURG B., *Die Form der Materie. Zur Metaphysik der Natur bei Kant und Hegel*, Francfort, Athenäum, 1987. — FARRAR W.V., « Science and the German University System, 1790-1850 », in CROSLAND M.P., *The Emergence of Science in Western Europe*, Londres, MacMillan, 1975, p. 179-192. — FERRINI C., *Guida al "De orbitis planetarum" di Hegel ed alle sue edizioni e traduzioni*, Berne, Paul Haupt, 1995. — FINK K.J., *Goethe's History of Sciences*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1991. — FOX R., « The Rise and Fall of the Laplacian Physics », *Historical studies in the Physical and Biological Sciences*, 4, 1974, p. 89-136. — FREULER L., *La crise de la philosophie au XIX siècle*, Paris, Vrin, 1997. — GLOY K. & BURGER P., éd., *Die Naturphilosophie im Deutschen Idealismus*, Stuttgart-Bad Cannstatt, Frommann-Holzboog, 1993. — GOWER B., « Speculation in Physics : the History and Practice of Naturphilosophie », *Studies in the History of Philosophy of Science* 3, 1973, p. 301-356. — GREGORY F., « Romantic Kantianism and the End of the Newtonian Dream in Chemistry », *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 34, 112, 1984, p. 108-123 ; « Kant's Influence on Natural Scientists in the German Romantic Period », in WISER R.P. et al., *New Trends in the History of Science*, Amsterdam, Rodopi, 1990, p. 53-72. — HÖSLE V. & WANDSCHNEIDER D., « Die Entäusserung der Idee zur Natur und ihre zeitliche Entfaltung als Geist bei Hegel », *Hegel-Studien* 18, 1983, p. 173-199. — IHMING K.N., *Hegels Deutung der Gravitation*, Francfort s. M., Athenäum, 1989. — JAHN I., « On the Origin of Romantic Biology and its Further Development at the University of Jena Between 1790 and 1850 », in POGGI S. & BOSSI M., *Romanticism in Science : Science in Europe, 1790-1840*, Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1994, p. 75-90. — KNIGHT D.M., « Steps toward a Dynamical Chemistry », *Ambix* 14, 1967, 179-196 ; « German Science in the Romantic Period », in CROSLAND M.P., *The Emergence of Science in Western Europe*, Londres, MacMillan, 1975, p. 161-178 ; *Ideas in Chemistry. A history of Science*, Londres, Athlone Press, 1992. — KUHN S., *La tension essentielle. Tradition et changement dans les sciences*, Paris, Gallimard, 1990. — LACOSTE J., *Goethe, Science et philosophie*, Paris, PUF, 1997. — MELHADO E.M. & FRÉNUSMYR T., *Enlightenment Science in the Romantic Era. The Chemistry of Berzelius and its Cultural Setting*, New York, Cambridge Univ. Press, 1992. — MOISO F., « Schellings

Elektrizitätslehre, 1797-1799 », in HECKMANN R., KRINGS H. & MEYER R.W., *Natur und Subjektivität. Zur Auseinandersetzung mit Schellings Naturphilosophie*, Stuttgart-Bad Cannstadt, Frommann Holzboog, 1985, p. 59-97. — NEUSER W., « Newtonianism am Ende des 18. Jahrhunderts in Deutschland am Beispiel Benjamin Martin », *Hegel-Studien* 24, 1989, p. 195-203 ; *Natur und Begriff*, Stuttgart-Weimar, J.B. Metzler, 1995. — PETRY M.J., « Introduction et notes », in HEGEL G.W.F., *Philosophy of Nature*, trad. angl. M.J. Petry, Londres/New York, Allen & Unwin, 3 vol., 1970 ; (éd.), *Hegel in die Naturwissenschaften*, Stuttgart-Bad Cannstadt, Frommann-Holzboog, 1987 ; (éd.), *Hegel and Newtonianism*, Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1993. — PETRY M.J. & HORTSMANN R.P. éd., *Hegels Philosophie der Natur*, Stuttgart, Klett-Cotta, 1986. — SCHMIED-KOWARZIK W., « Von der wirklichen, von der seyenden Natur », *Schelling Ringen um eine Naturphilosophie in Auseinandersetzung mit Kant, Fichte und Hegel*, Stuttgart-Bad Cannstadt, Frommann-Holzboog, 1996. — SNEEDERS H.A.M., « The Influence of the Dualistic System of Jakob Joseph Winterl (1732-1809) on the German Romantic Era », *Isis*, 61, 1970, p. 231-240 ; « Romanticism and Naturphilosophie and the Inorganic Natural Sciences 1797-1840 : An Introductory Survey », *Studies in Romanticism* 9, 1970, p. 193-215. — STAUFFER R.S., « Spekulation and Experiment in the Background of Oersted Discovery of Electromagnetism », *Isis*, 48, 1, 1957, p. 33-51. — TILLIETTE X., *Schelling. Une philosophie en devenir*, Paris, Vrin, 2 vol., 1970. — TORSTEN Kans, *Philosophie des organischen in der Goethezeit*, Stuttgart, Franz Steiner, 1994. — VUILLEMIN, *Physique et métaphysique kantienne*, Paris, PUF, 1955. — ZICHE P., *Mathematische und Naturphilosophische Modelle in der Philosophie Schellings und Hegels*, Stuttgart-Bad Cannstadt, Frommann-Holzboog, 1996.

Emmanuel RENAULT

→ Anatomie comparée ; Causalité (Principe de) ; Développement ; Dialectique ; Goethe ; Hegel ; Loi biogénétique fondamentale.

NÉCESSITÉ

Il y a des vérités nécessaires qui sont vraies *a priori*, mais il y a aussi des conditions nécessaires (dont on ne pourrait pas se dispenser dans les faits). On parle également d'êtres nécessaires, quand leur inexistence entraîne contradiction. Mais la variété des entrées du concept de « nécessité » brouille constamment les pistes. Au sens moral et juridique, on oppose la nécessité « normative » de l'obligation à la liberté. On ne saurait exclure aussi une nécessité des lois de la nature, par exemple lorsque nous disons que « rien ne peut voyager plus vite que la vitesse de la lumière ». Le cas des énoncés mathématiques est le plus complexe : faut-il admettre qu'on ne parviendra jamais à réduire les règles de la démonstration à des combinaisons cognitives ? Ou doit-on supposer, au lieu d'un royaume de la nécessité, qu'il y a une « histoire naturelle » de la nécessité, et qu'elle n'est qu'une donnée anthropologique parmi d'autres ? Si toutes les vérités mathématiques nous sont déjà données *a priori*, parce qu'il nous est possible en principe de les connaître, — c'est la thèse de Leibniz —, il serait alors contradictoire d'affirmer qu'elles sont en même temps « nécessaires » parce qu'elles ne dépendent pas de l'esprit qui les conçoit. La

nécessité s'entend également, pour finir, au sens logique « large » — qui comprend les formes de la démonstration et du calcul — ou bien au sens modal, en considérant la classe des assertions que nous sommes susceptibles de faire en dehors de notre adhésion à une conception déterministe de la vérité et de la fausseté.

1) La nécessité métaphysique dont s'occupent les philosophes revient à énoncer quelque chose de l'être en général : on stipule que cet être est « nécessaire » parce qu'il ne dépend pour exister d'aucune cause, ni d'aucune condition. Cette nécessité est indépendante et absolue, puisqu'il est impossible que la chose soit autrement qu'elle n'est. Le meilleur exemple est ici sans doute la « substance » chez Spinoza, dont « l'essence enveloppe nécessairement l'existence » (*Éthique* I, prop. 7), qui est aussi « nécessairement infinie » (prop. 8), et selon laquelle Dieu « existe nécessairement » (prop. 11). Une telle définition suppose une expression assertorique qui peut prêter à confusion : car ce qui relève du « mode » discursif de l'attribution (représenté ici par l'adverbe « nécessairement ») est ajouté par la pensée à ce qui est proprement « dit » de l'être de la substance dans les propositions en question. Kant distinguera les jugements « assertoriques », portant sur l'existence (et en général sur des vérités de fait), des jugements « apodictiques », qui concernent ce qui est nécessairement vrai. Dans ces derniers, la relation entre les termes du jugement contenus dans l'énoncé est elle-même posée comme nécessaire, et plus précisément encore ces jugements, dit-il, portent sur la « valeur de la copule en relation avec la pensée » (voir *Critique de la raison pure*, « Analytique transcendantale » I, 1, 4, A 75). Mais la présentation kantienne n'entraîne pas un examen rigoureux de la fonction de la copule : elle range finalement l'existence parmi les « catégories de la modalité », entre la possibilité (ou l'impossibilité) et la nécessité (ou la contingence). Pour clarifier les choses, il semble donc indispensable de se référer au traitement de la nécessité, tel qu'il apparaît d'abord dans les textes d'Aristote : *De l'interprétation* (12-13) et les *Premiers Analytiques* (I, 8-22). Un grand raffinement a été apporté à cette théorie par Boèce, puis par les scolastiques (tels Saint-Thomas et Pierre d'Espagne).

2) Aristote interroge la nécessité et la possibilité (ces deux modalités étant logiquement coordonnées) en tant qu'elles caractérisent une propriété objective de la relation existant entre le prédicat et le sujet. Quoique l'affirmation et la négation ne soient pas des modalités, nous pouvons toujours affirmer (ou nier) quelque chose sur le genre de rapport que des objets ont avec leurs propriétés, et ainsi statuer de la vérité ou de la fausseté de la phrase assertée. Mais la modalité ne spécifie que le type de lien que présente la protase : dans « l'homme est nécessairement bon », « l'homme est possiblement courageux », un attribut de la proposition est spécifié, qui ne correspond pas avec la relation d'inhérence. Ce point demande à être souligné, car la modalité, au sens d'Aristote, ne concerne ni le sujet, ni le prédicat. Soient les phrases : « la neige

est nécessairement blanche », ou « le logicien est nécessairement rationnel » : ici, nous n'assertons rien quant au fait que la neige soit effectivement blanche ou quant au fait que le logicien soit effectivement rationnel. Il s'agit plutôt, comme on le dira à l'époque médiévale, d'une attribution d'essence, dans laquelle le mode est « intégré » à la copule, ou bien encore d'une attribution *de re*, en tant que la propriété dont on parle serait « nécessairement possédée » par l'objet (*de itesse*). Pour Aristote, en revanche, une attribution modale rigoureuse est une attribution *de dicto*, qui reste extérieure à la relation d'inhérence ; elle nous permet d'écrire : « il est nécessaire que la neige soit blanche », ou « il est nécessaire que le logicien soit rationnel ». La modalité concerne alors l'ensemble de la proposition, et dans la notation où nous transcrivons, elle la précède. Une logique modale « quantifiée » (au sens moderne) dira que l'opérateur commande par sa situation la « portée » de l'assignation qui le suit. En principe, il nous faudrait donc ramener toutes les attributions *de re* à des attributions *de dicto*, si nous voulions utiliser correctement les opérateurs du « possible » ou du « nécessaire ». Mais les choses sont plus compliquées. Le noyau de l'argument ontologique des philosophes de l'Âge classique est reconnaissable comme une attribution *de re* du type : « Dieu existe nécessairement (par la seule nécessité de sa nature). » Ici une fonction est prêtée à la copule qui intègre dans un rapport mutuel la signification des termes employés, puisqu'ils ne peuvent être séparés l'un de l'autre, ni analysés l'un sans l'autre. S'il n'y a aucune nécessité (ontique) *de re* à ce que la neige soit blanche (ne serait-ce d'abord que dans la structure de ses cristaux), il est admissible que les propositions « le logicien est nécessairement rationnel » ou « Dieu est nécessairement bon » aient à certains égards le statut de propositions *de re*, parce qu'elles pourraient être indépendantes de l'esprit qui les affirme ou qui les nie. Dans cette éventualité, nous sommes forcés de confier une portée « intensionnelle » à ce type de modalité, où la vérité ne dépendra que de la signification des termes conjugués par l'assertion.

3) La raison de la distinction *de re* / *de dicto*, telle qu'elle s'est imposée dans l'École, n'est pas fournie explicitement par les textes aristotéliens. Aristote aura néanmoins dégagé avec une remarquable netteté la conversion « syntaxique » du possible dans le nécessaire, de l'impossible dans le contingent (c'est-à-dire du non-possible dans le non-nécessaire), grâce à des équivalences propositionnelles qui ne requièrent que le seul emploi des négations. Certes Aristote ne distingue-t-il pas toujours le possible et le contingent, comme le feront plus tard les Scolastiques. Le mode du nécessaire appartient seulement à ce dont nous disons qu'il ne peut pas ne pas être (« il n'est pas possible que non p »). Les Scolastiques font la différence entre ce dont nous disons « qu'il peut ne pas être » (*possum non esse*) et ce dont nous disons « qu'il peut être » (*possum esse*). La première formule qualifie le contingent en intégrant la négation dans la proposition infinitive : ce

qui donne dans leur langage, « possiblement non pas » ; la seconde le possible à l'état pur. En réalité, la différence avec l'exposé d'Aristote est mince quant au résultat, car nous obtenons un « carré logique » ou un quadruple rapport d'oppositions qu'Aristote avait déjà tenté de formaliser (*De l'interprétation*, 13, 22 a), selon que la négation est inscrite dans le mode (à l'extérieur de la proposition) ou dans le *dictum* (à l'intérieur de la proposition). C'est ainsi que l'on est en droit pour le Stagirite, de partir, indifféremment, ou de la possibilité, ou de la nécessité, pour arriver à dire, en effet, la même chose. Ce qui implique dans ce cas que l'extension admise pour le prédicat dépend, ou est fonction, de la modalité retenue. La transcription des Scolastiques est aisée à simplifier :

- 1) Il est nécessaire que p = il n'est pas possible que non-p
- 2) Il est possible que p = il est non nécessaire que p
- 3) Il n'est pas nécessaire que p = il est possible que non-p
- 4) Il n'est pas possible que p = il est nécessaire que non-p

Ces équivalences correspondent respectivement aux quatre « modes » : la nécessité, la possibilité, la contingence, l'impossibilité. On peut construire ensuite — s'agissant de l'extension du *dictum* — seize propositions modales d'après les Scolastiques, en se fondant sur ce schéma, puisqu'il peut y avoir des jugements universels affirmatifs (pour le nécessaire) ou négatifs (pour l'impossible), des jugements particuliers affirmatifs (pour le possible) ou négatifs (pour le contingent). Quatre éventualités sont envisageables pour chaque forme, selon la position de la négation — dans, ou hors de la portée —, qui se combinent avec quatre éventualités, selon l'extension (voir I.M. Bochenski, *Ancient Formal Logic*, North Holland, 1951). Il suffit de retenir, au niveau le plus élémentaire, si nous choisissons une lettre majuscule à la place de l'opérateur, par exemple P (pour le possible), N (pour le nécessaire), et « p » pour une proposition quelconque, les deux équivalences suivantes :

- $$\text{non } P \text{ non } p = \text{il n'est pas possible que non } \langle p \rangle = \text{il est nécessaire que } \langle p \rangle$$
- $$\text{non } N \text{ non } p = \text{il n'est pas nécessaire que non } \langle p \rangle = \text{il est possible que } \langle p \rangle$$

Aristote aborde enfin un autre problème décisif (celui de l'actualité) à travers le cas des futurs contingents : il répond vraisemblablement de cette manière à l'argument des Mégariques, et notamment à l'aporie de Diodore Cronos. Épictète la rapporte ainsi : « Toute proposition vraie concernant le passé est nécessaire », « l'impossible ne suit pas logiquement du possible », « Est possible ce qui n'est pas actuellement vrai et ne le sera pas » ; il y a pour ces trois propositions un conflit entre l'une des deux premières au moins (également vraisemblables) et la dernière, qui mène à une contradiction (cf. Vuillemin, 1984, p. 15). Diodore n'admet pas que l'univers soit contradictoire, tant à l'égard du passé que du futur : en fait, pour lui le possible n'existe pas, et l'univers « doit » obéir à un

déterminisme infaillible. Aristote défend une conception pure de la modalité, indifférente au temps : « Je prends un exemple. Nécessairement il y aura demain une bataille navale ou il n'y en aura pas ; mais il n'est pas nécessaire qu'il y ait demain une bataille navale, pas plus qu'il n'est nécessaire qu'il n'y en ait pas. Mais qu'il y ait ou qu'il n'y ait pas demain une bataille navale, voilà qui est nécessaire » (*De l'interprétation*, 18 b). Ce problème canonique de l'actualité, qui n'est pas métaphysiquement neutre, est toujours discuté de nos jours : il permet de penser techniquement à une troisième valeur de vérité, le probable, entre le possible et le nécessaire. De plus, il est aussi parallèle aux préoccupations de Leibniz sur la question de savoir en quoi le « nécessaire » pourrait se dire de ce qui est vrai dans tous les mondes possibles.

4) Nous sommes loin toutefois d'avoir tranché à ce stade la question notablement obscure de la nécessité, qui a rebondi avec les travaux de C. Irving Lewis et Łukasiewicz (1920). Lewis exploite de façon rigoureuse l'interdéfinissabilité des connecteurs (« il est possible que », « il est nécessaire que ») empruntée au cadre aristotélicien d'une logique modale pure dans *A Survey of Symbolic Logic* (1918). Son point de vue consiste à savoir ce qu'il faut admettre pour vrai dans une implication du type : « il est nécessairement vrai que p ». On ne doit pas confondre ici la vérité d'un énoncé nécessaire, quand cet énoncé est dérivé d'un autre et qu'il constitue une expression valide, avec la modalité exprimée par : « il est nécessaire que p ». Pour contrer les paradoxes de l'implication matérielle, où le vrai peut dériver du faux, parce que du faux nous pouvons faire suivre ce que nous voulons – c'est le sens de l'adage : *quodlibet ex falso sequitur* –, Lewis élabore la notion d'une implication stricte, où p implique nécessairement q, c'est-à-dire dans laquelle nous devons « affirmer » qu'il est faux « que p puisse impliquer la fausseté de q ». De cette manière, nous ne pourrions plus dériver de « les roses sont vertes » que « le sucre est soluble dans l'eau ». Cette affirmation aura la même force que l'affirmation disant que « p n'implique pas que q soit faux ». Elle est exactement paraphrasable sous la forme de l'énoncé : « Il est faux qu'il soit possible que p puisse être vraie et q fausse. » Pour Lewis, c'est donc la relation, et elle seule, qui est affirmée, pourvu que nous nous servions des opérateurs modaux comme des quantificateurs usuels. Usant des règles de l'implication stricte pour retrouver les principes de déductibilité que Russell et Whitehead avaient établis pour le calcul des expressions valides, Lewis renouvelle et élargit les lois de l'inférence déductive, en ouvrant la perspective d'un calcul intensionnel. Łukasiewicz (1920) se situe encore, à cet égard, dans la tradition algébrique de Boole-Schröder, lorsqu'il fait du « possible » une troisième valeur de vérité, afin de résoudre le cas des futurs contingents.

Mais on doit à R. Carnap d'avoir modifié en profondeur dans *Signification et nécessité* (1947) la direction (encore syntaxique) qu'avait tracée Lewis. Cette conception nouvelle présuppose une théorie des

modèles, enrichie dans les années 1960 par les travaux de Ruth Barcan Marcus, J. Hintikka et S. Kripke. Elle ne se demande plus si l'on peut savoir en quoi « p » est nécessaire (nécessité épistémique), mais s'il y a une sorte de monde – une manière de « monde possible » –, dans lequel « p », sous certaines conditions de vérité, quoique dans un contexte non extensionnel, serait toujours vrai ou bien nécessairement faux. La portée de nos assertions ne dépend plus alors que de l'outil métalinguistique, considérablement remanié, grâce auquel nous nous prononçons sur le type de validité admise dans le domaine considéré (nécessité métaphysique ou théologique).

À cet endroit, la question de la nécessité redouble de complexité, sachant que nous devons définir sémantiquement le « domaine » d'assignation de nos phrases modales : qu'elles contiennent ou bien des objets quelconques et des propriétés quelconques ; ou bien des individus porteurs de propriétés. On peut procéder de façon « neutre » à la manière de Carnap, grâce à une interprétation « conceptuelle » et non plus objective des quantificateurs. Ou préférer un engagement ontologique qui implique de séparer la référence « objective » et la signification des termes. Il est possible enfin de prendre les propositions affirmées comme des noms d'objets sur lesquels la quantification *de dicto* ne peut plus s'exercer. Ces deux dernières éventualités sont soutenues par Hintikka et Kripke respectivement, dans la même période. Les propriétés nécessaires relèveront en pareil cas des conditions d'individuation permises ou refusées dans des contextes « référentiellement opaques », une expression très discutée que l'on doit à Quine (1947). Afin d'y parvenir, nous avons besoin d'introduire dans le domaine d'assignation du modèle des paramètres pour l'individuation, dont le nombre reste arbitraire. Cet essentialisme, qu'il soit faible ou radical, revient en somme à formuler autrement la question métaphysique de la nature des choses : d'abord celle de leurs propriétés (nécessairement possédées ou pas), puis celle des individus qui les satisfont, mais indépendamment de la manière dont nous décrivons les unes et les autres. Si l'on ajoute que l'accessibilité à ces divers « mondes possibles » est controversable sur le principe, il n'y a rien d'étonnant qu'un tel débordement de la problématique leibnizienne du nécessaire (vrai dans tous les mondes possibles) ait paru aberrant pour Quine, qui le dénoncera à maintes reprises.

5) Le sens technique que Ruth Barcan Marcus a conféré à la logique modale quantifiée revient à admettre que s'il est nécessaire d'affirmer qu'un objet « possède » telle propriété, alors dans un tel domaine (ce monde possible) tous les objets du même type ont la même propriété. Kripke testera que les propriétés constituent un domaine sémantiquement clos : il renverse la formule de Barcan au profit de variables d'individus non liées par les quantificateurs, de sorte que les mêmes individus seront désignables dans tous les mondes possibles, sans être porteurs des mêmes propriétés. La sophistication qu'il propose consiste à

dissocier l'une de l'autre la portée de l'opérateur modal et celle du quantificateur existentiel pour un même domaine d'assignation, celui du « modèle ». La nécessité de l'identité valant aussi pour les termes d'espèce naturelle l'amène ensuite à conclure que la référence précède l'essence. À la publication par Kripke de *Naming and Necessity* (1972) s'ouvre une vive querelle sur deux plans : 1) la question d'une référence métaphysique des propriétés non descriptives ; 2) la remise en cause de la dualité analytique/synthétique, *a priori* la *posteriori*. Kripke admet qu'il doit exister des vérités nécessaires qui sont bien indépendantes de notre équipement cognitif : la science les découvre parce qu'elles appartiennent à la réalité. Les conditions « épistémiques » de la connaissance ne nous permettent en revanche que de saisir des vérités contingentes. Sa position est aux antipodes de la position rationaliste, mais aussi de la tradition américaine inspirée par Carnap. Il serait à la fois pensable de dire selon lui que nous avons des connaissances synthétiques *a posteriori*, et que les dispositions épistémiques de notre esprit donnent une valeur de vérité à des propositions analytiques qui restent contingentes. Suivant cet essentialisme, il faudra séparer des propriétés accidentelles et des propriétés nécessaires pour chaque entité que l'on examine dans le monde « du » modèle. On le voit, de nouvelles obscurités surgissent qui n'apparaissent pas dans la sémantique des modèles de Tarski ou même dans les contextes « substitutionnels » d'Hintikka.

6) On ne peut cependant abstraire de cette discussion les objections toujours fortes de Quine que nous avons passées momentanément sous silence. Elles concernent en premier lieu la nature des vérités mathématiques dont nous disons qu'elles sont nécessaires en un usage fort différent de celui de la logique modale. Leibniz déjà considérait que les vérités de raison sont réductibles à des propositions identiques, parce que leur négation implique contradiction. Le principe de « raison suffisante », comme son nom l'indique, intéresserait seulement les vérités de fait. Cette manière de penser la nécessité où une exigence extra-logique est requise pour traiter des énoncés d'identité, a été critiquée par Frege, puis par Russell. Mais l'impossibilité qui s'ensuit de réduire complètement l'arithmétique à la logique n'a pas tranché le nœud de ce qui serait connaissable *a priori* ou bien seulement « analytiquement », car nous pouvons toujours penser qu'il y a des vérités nécessaires qui sont exprimées par des propositions ou qui dépendent de propriétés linguistiques, sans pourtant se réduire à ces dernières. Quine s'est opposé sur ce point à l'idée que les énoncés nécessaires soient « analytiquement » exprimables sous forme de tautologies. On aboutirait dans ce cas à un conventionnalisme radical. Il a préféré insister sur le rôle des constantes en tant que termes non descriptifs pour distinguer plus clairement entre les énoncés « analytiques », ceux que nous formons sur une base empirique, et les vérités logiques proprement dites. Quine a aussi construit une théorie holistique pour les énoncés d'observation catégoriques supposés conforter

le genre de nécessité dont la science a besoin quand elle prétend s'assurer de l'établissement des lois physiques. « La fuite loin des intensions » ne se justifie donc pas selon lui pour des raisons seulement techniques : il n'est pas abusif de dire que son opposition tranchée, inaugurée par l'article « Reference and modality » (1947), a lancé un défi à tous les logiciens, et encouragé des constructions de plus en plus hardies depuis bientôt 50 ans. Quine a disqualifié avec opiniâtreté toute nécessité modale, mais les héritiers de Carnap ont profité des impasses du physicalisme de Quine. Si pour ce dernier – comme pour von Wright dans sa logique « déontique » –, il demeure toujours indispensable de ramener, quand nous le pouvons, les assertions *de re* à des assertions *de dicto*, les ingénieurs et les informaticiens trouvent aujourd'hui plus de motifs de convoquer les instruments sémantiques des philosophes « réalistes » et essentialistes que d'obéir à l'économie ontologique, et à la mutilation minimale des systèmes qu'il n'a cessé de prôner.

7) Devons-nous en conclure que l'idée de nécessité soit impossible à démêler ? Personne n'est capable de décider aujourd'hui quant au rapport qui devrait exister entre la nécessité logique et la nécessité mathématique (celle des lois de la pensée, et celle du calcul), ni de déterminer quel est leur rapport commun avec la nécessité que nous invoquons pour expliquer les lois de la nature. Depuis Hume, nous sommes prévenus contre l'obscurité métaphysique de la « connexion nécessaire » que nous introduisons dans le monde entre un antécédent et un conséquent, bien que nous en inférons par la pensée seulement que ce rapport doit exister en quelque manière. E. Mach soutiendra lui aussi qu'il n'y a pas de nécessité physique observable dans les phénomènes thermiques et mécaniques, mais seulement une nécessité logique que la pensée introduit pour expliquer leur production. Wittgenstein, dans le *Tractatus*, reprendra la même formule (6.17). Elle a ensuite constitué longtemps un véritable credo pour les positivistes. Mais la notion de nécessité « logique » est devenue non moins discutée que son homonyme métaphysique : elle est fonction d'une définition de la déductibilité et de son adéquation dans un système. Sous cet horizon, se profile l'arrière-plan des mathématiques intuitionnistes où cette version non modale de la nécessité – tantôt « grammaticale », tantôt strictement opératoire – n'est plus formellement identifiable grâce à un critère exclusif de certitude, ou au nom de l'évidence intuitive des principes de la démonstration.

Si l'on se souvient qu'Aristote opposait une nécessité *ex hypothesi* – c'est-à-dire dérivée de prémisses, et que Kant nommait « problématique » – à la nécessité absolue, dépendante de l'essence des choses, il semble que l'équivocité que recouvre encore le terme doit être rattachée à deux acceptions opposées de la vérité. Mais une autre démarcation est peut-être indispensable au concept de nécessité. Son inflexibilité exige une conception logique de l'enchaînement des énoncés : sa généralité (applicable aux lois de la nature) relève d'une procédure inductive ou probabiliste.

► ARISTOTE. *Organon, De l'interprétation (II), Premiers Analytiques (IV)*, Paris, Vrin 1989. – BARCAN-MARCUS R., « A Functional Calculus of First Order based On Strict Implication », *Journal of Symbolic Logic*, 11, 1946, p. 11-16 ; *Modalities. Philosophical Essays*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1993. – BOCHENSKI I.M., *Ancient Formal Logic*, North Holland, 1951. – BOUVERESSE J., *La force de la règle, Wittgenstein et l'invention de la nécessité*, Paris, Minuit, 1987. – CARNAP R., *Meaning and Necessity*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1947 (trad. fr. P. de Rouilhac & F. Rivenc, *Signification et nécessité*, Paris, Gallimard, 1997). – GARDIES J.-L., *Essai sur la logique des modalités*, Paris, PUF, 1979. – HINTIKKA J., *Models for Modalities*, Dordrecht, Reidel, 1969. – HUGUES G.E. & CRESSWELL M.J., *An Introduction to Modal Logic*, Paris, Methuen & Co., 1968. – KRIPKE S., *Naming and Necessity*, Oxford, Blackwell, 1972 (trad. fr., *La logique des noms propres*, Paris, Minuit, 1982). – LEWIS C.I., *A Survey of Symbolic Logic*, Univ. of California Press, 1918. – LEWIS C.I. & LANGFORD C.H., *Symbolic Logic*, The Century Co, 1932 (repr. Dover, 1959, p. 123-198). – QUINE W.V.O., *From a Logical Point of View*, Harvard Univ. Press, 1953 ; *Word and Object*, Harvard Univ. Press, 1960 (trad. fr. J. Dopp & P. Gochet, *Le Moi et la Chose*, Paris, Flammarion, 1977) ; *Theories and Things*, Harvard Univ. Press, 1981 ; *Pursuit of Truth*, Harvard Univ. Press, 1960 (trad. fr. M. Clavelin, *La poursuite de la vérité*, Paris, Le Seuil, 1993). – VERNANT D., *Introduction à la philosophie de la logique*, Liège, Mardaga, 1986. – VUILLEMIN J., *Nécessité ou Contingence – L'aporie de Diodore et les systèmes philosophiques*, Paris, Minuit, 1984.

Jean-Maurice MONNOYER

→ Déduction ; Induction ; Téléologie ; Validation.

NEURATH Otto, 1882-1945

Économiste et sociologue d'origine autrichienne, membre du Cercle de Vienne, rédacteur principal de *La Conception scientifique du monde*, qui en est le Manifeste (1929), Neurath pense qu'une conception antimétaphysique, empiriste et logique de la science permet d'élaborer une attitude politique et sociale, d'obédience marxiste : il fut conseiller lors des événements de Bavière de 1919, et élabora une « économie de guerre ». Neurath croit en l'unité de la science – il a été rédacteur d'*Erkenntnis* et de l'*International Encyclopedia of unified science* – conçue comme encyclopédie générée par les relations empiriques effectives de science à science, gardant les traces des indéterminations et des conglomérats de notions, et non par le système de relations logiques entre propositions établies. Il n'est pas possible d'isoler une hypothèse particulière – les propositions isolées sont métaphysiques – ni de la confronter à la réalité, projet également métaphysique. On ne peut comparer un énoncé qu'à un autre énoncé : Neurath se dit conventionnaliste et nominaliste. Les énoncés scientifiques se ramènent à des énoncés d'observation révisables qui énoncent qu'en tel endroit, à tel moment, tel événement s'est produit et a été observé par « Otto » (ou par X). Neurath est l'auteur du « physicalisme » : la langue de la science est celle de la physique et il y a un « slang universel », de la physique à la psychologie. Il a élaboré un système

idéographique, isotype, permettant de décrire visuellement des données statistiques.

● *Gesammelte philosophische und methodologische Schriften*, éd. R. Haller & H. Rutte, Vienne, Hölder-Pichler-Tempsky, 2 vol., 1981. – *Empirische Soziologie*, 1931. – *Einheitswissenschaft und Psychologie*, 1933. – *Le Développement du Cercle de Vienne et l'avenir de l'empirisme logique*, trad. du général Vouillemin, Paris, Hermann, 1935. – *Foundations of the social sciences*, 1944. – *Empiricism and Sociology*, éd. M. Neurath & R.S. Cohen, Dordrecht/Boston, D. Reidel, 1973. – *Economic writings : selections, 1904-1945*, éd. Th. E. Uebel et R. S. Cohen, Dordrecht, London, Kluwer Academic, 2004.

► CAT J., CHANG H. & CARTWRIGHT N., « Otto Neurath : Unification as the Way to Socialism », *Einheit der Wissenschaften*, New York, Walter de Gruyter, 1991, p. 91-110. – CARTWRIGHT N., CAT J., FLECK L., UEBEL Th. E., *Otto Neurath : Philosophy Between Science and Politics*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1996. – NEMETH E., STADLER F., *Encyclopaedia and Utopia The life and Work of Otto Neurath*, With the first publication of Ottos Neurath full manuscript on « Visual Education » and the documentation of the *Otto Neurath Nachlass* (Harlem, The Netherlands). Dordrecht Kluwer, 1996. – PASTEUR P., *Pratiques politiques et militantes de la social-démocratie autrichienne 1888-1934*, Paris, Belin, 2003. – REISCH G.A. Jr., « Terminology in Action : Otto Neurath and the International Encyclopedia of Unified Science », *Vienna Circle Institute Yearbook*, 4, Boston, Kluwer, 1996. – SOULEZ A., NEMETH E., SEBESTIK J. éd., *Otto Neurath, un philosophe entre science et guerre*, in : *Cahiers de Philosophie ancienne et du langage*, 1997 ; *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, Paris, PUF, 1985. – STADLER F., *The Vienna Circle and logical empiricism re-evaluation and future perspectives*, Dordrecht ; Boston, Kluwer Academic Publishers, 2003. – UEBEL Th. E., *Otto Neurath und der ersten Wiener Kreis*, Wien, Springer, 2000. – UEBEL T. éd., *Rediscovering the Forgotten Vienna Circle : Austrian Studies on Otto Neurath and the Vienna Circle*, Boston, Kluwer, 1991 ; *Overcoming Logical Positivism from Within : The Emergence of Neurath's Naturalism in the Vienna Circle Protocol Sentence Debate*, Atlanta, Rodopi, 1992.

Anne-Françoise SCHMID

→ Cercle de Vienne ; Conventionnalisme ; Physicalisme ; Vérification.

NEURONE

Cellule constitutive du tissu nerveux. Elle comporte trois parties : 1) le corps cellulaire ou soma d'un diamètre de 10 à 50 micromètres. Son cytoplasme contient, outre les inclusions habituelles (mitochondries, granules de sécrétion), une formation vacuolaire particulière : l'appareil de Golgi, des granulations basophiles, les corps de Nissl qui sont des agrégats de condensation d'une formation largement répartie à travers le cytoplasme, le *reticulum* endoplasmique ; de fins filaments allongés groupés en faisceaux parallèles ou entrecroisés constituant les neurofibrilles. 2) Les dendrites, prolongements émanant du soma, à base épaisse se ramifiant pour constituer une arborisation plus ou moins complexe constituée de branches dendritiques de plusieurs ordres. Leur contour peut être

hérissé de nombreuses expansions appelées épines dendritiques. 3) l'axone ou neurite ou fibre nerveuse émane généralement du soma par le cône axonique suivi du segment initial qui est de petit diamètre. Puis à une distance variable du soma, l'axone s'entoure d'une gaine de myéline qui est constituée de couches de molécules lipidiques à orientation radiaire alternant avec des complexes protéiques orientés tangentielle. Certains axones n'ont pas de gaine de myéline ce qui permet de distinguer les axones myélinisés des axones amyéliniques. Le long du trajet de l'axone, la gaine de myéline s'interrompt au niveau de petits étranglements ou nœuds de Ranvier. Une seconde enveloppe est constituée de cellules gliales, la gaine de Schwann, qui forme une gouttière autour soit de plusieurs axones amyéliniques soit d'un seul axone myélinisé. En général, un neurone possède un seul axone. C'est un prolongement unique qui peut se diviser, au niveau des nœuds de Ranvier, donnant des branches ou collatérales d'axones en certains points de son trajet, qui se ramifie à son extrémité en une arborisation terminale dont les extrémités amyéliniques s'élargissent pour former des renflements ou boutons synaptiques. Son cytoplasme ou axoplasme contient des éléments du *reticulum* endoplasmique et des neurofibrilles orientées parallèlement à son grand axe.

Si le début de l'histoire des connaissances sur le neurone se situe au XIX^e s., les conditions nécessaires à son étude coïncident avec l'invention du premier microscope par Robert Hooke à Londres en 1665. Cet appareil mécanique composé d'une lentille et d'un oculaire permet à Antonie van Leeuwenhoek de Delft, en Hollande, d'observer des animaux microscopiques, de découvrir les protozoaires, les bactéries, les spermatozoïdes. En 1718, il publie, à 84 ans, les premières observations de nerfs optiques de vache qu'il décrit comme étant constitués d'une série de tubes qu'il appelle des « vaisseaux minuscules ». C'est la première description microscopique des axones myélinisés. La présence de ces vaisseaux minuscules s'accorde bien avec l'idée élaborée au XVII^e s. par Descartes qui pensait que les nerfs étaient de petits tuyaux contenant des fluides qui s'écoulaient des organes sensoriels au cerveau pour y conduire les sensations et de la moelle épinière au muscle pour produire le mouvement.

Ces premières observations ne sont pas suivies immédiatement par d'autres découvertes et le XVIII^e s. va marquer une longue pause dans l'étude des tissus animaux. Les progrès techniques dans le domaine de l'optique et de la construction de nouveaux microscopes sont lents. Des grossissements plus forts sont difficiles à obtenir avec des lentilles composées qui réfléchissent la lumière de différentes longueurs d'ondes en quantité différente produisant des aberrations chromatiques. On ignore aussi comment préparer les tissus pour les conserver et les préserver des déformations. Habituellement, la méthode utilisée à l'époque consiste à prélever une pièce de tissu la plus petite possible, à la placer dans de l'eau sur une lame de

verre et à la recouvrir par une fine lamelle de verre. Mais les tissus restent trop épais, sont toujours déchirés, et les images observées au microscope sont le plus souvent ce que l'on appelle aujourd'hui des artefacts donnant des images déformées de la réalité, conduisant à des interprétations erronées. Pourtant le XVIII^e s. hérite du précédent une pensée philosophique qui pour la première fois ébranle aussi bien les concepts animistes d'Aristote et de Galien que les idées sur l'âme rationnelle de Descartes. Dans l'*Essai philosophique concernant l'entendement* (1688), John Locke, critiquant l'innéisme de Descartes, pose en empiriste le problème de l'origine et des limites de la connaissance. Leibniz témoigne d'un rationalisme spiritualiste et optimiste et Newton remet en cause l'idée des esprits animaux circulant dans les nerfs. L'idée est admise qu'il est urgent de remplacer les spéculations par des preuves expérimentales et une démonstration des faits. Elle va permettre d'immenses progrès conceptuels dans ce siècle des Lumières et jeter les bases d'une transformation radicale des théories du cerveau et de l'esprit. Cette conception annonce clairement l'exclusion de l'âme des théories sur le cerveau même si la structure du système nerveux reste encore mystérieuse. Il est un fait que cent ans après les premières observations de Van Leeuwenhoek, les outils qui vont permettre de découvrir la structure fine du tissu nerveux n'existent pas encore.

La théorie cellulaire

Au début du XIX^e s., vers 1820, un nouvel instrument, le microscope achromatique, est enfin inventé. Jan Purkinje, professeur de physiologie à l'université de Breslau (actuellement Wrocław en Pologne) achète un excellent microscope construit par Ploessel à Vienne qu'il paie 220 gulden. Un nouveau monde s'ouvre à lui, qu'il découvre avec ses étudiants, et qui va permettre les premières publications sur la composition cellulaire des tissus vivants. Les contributions scientifiques de Purkinje sont très nombreuses tant dans des domaines techniques comme la construction de nouveaux instruments que dans la compréhension des phénomènes qu'il observe. Pour bénéficier des performances de son nouveau microscope il construit un appareil, le premier microtome, permettant de sectionner en coupes très fines les tissus qu'il souhaite examiner. Il décrit pour la première fois les mouvements ciliaires, les fibres cardiaques, les cellules germinales des ovaires de poule, les glandes salivaires, la structure des dents. Il est considéré comme le fondateur de l'histologie et de la physiologie expérimentale. Il crée son propre Institut qui est un modèle pour beaucoup d'autres instituts similaires dans l'Allemagne du XIX^e s.

La contribution princeps de Purkinje à la connaissance de la cellule nerveuse a été présentée au Congrès des médecins allemands et des naturalistes à Prague en 1837. Sa description des grandes cellules du cortex du cervelet constitue la première observation d'une cellule

nerveuse qui depuis porte son nom, la cellule de Purkinje. Sa publication décrit la cellule avec son noyau et suggère la présence de processus qui seront plus tard identifiés comme les dendrites et l'axone. En revanche, on ne trouve aucune indication qui permette de relier la cellule nerveuse à la fibre nerveuse qui sont l'une et l'autre décrites de façon indépendante. Il écrit : « Rien ne permet d'identifier une connexion entre le corpuscule cellulaire et la fibre. » Purkinje, dans sa revue de 1837, établit le fait que les organes sont composés de trois structures fondamentales : les fluides, les fibres et les granules qui seront nommées quelques années plus tard les cellules. C'est ainsi qu'il fonde dans son essence, si ce n'est dans les termes, la théorie cellulaire qui sera proposée deux ans plus tard par Theodor Schwann. L'un de ses étudiants, Robert Valentin, apporte une contribution majeure à la description de la cellule nerveuse. Il publie une image microscopique d'une cellule (probablement une cellule de Purkinje) en notant que « très souvent la cellule possède un appendice ressemblant à une queue ». On peut voir ici le début d'une description non explicite de la continuité entre la cellule et la fibre. Pourtant, Valentin, comme son maître, nie l'existence d'une connexion directe entre la cellule et la fibre. À la même époque, Robert Remak (né en Pologne en 1815), étudiant en médecine à l'université de Berlin sous la direction du grand physiologiste Johannes Müller, publie sa thèse (1838) dans laquelle il aborde directement la relation entre la cellule et la fibre nerveuse : *La fibre organique émerge de la substance même du glomérule*. Ce commentaire est explicite et pourtant on mettra en doute cette observation faite sur des tissus non fixés et donc sujets à des déformations grossières. Le débat est violent entre Remak et son rival, le célèbre Valentin, sur leur interprétation différente des images de cellules nerveuses qu'ils observent au microscope. Remak est fortement contesté, ce que des observateurs modernes ont attribué à l'antisémitisme ambiant de la culture européenne de l'époque (Meyer, 1971). Cependant, l'importance de sa contribution est largement reconnue, en particulier celle qui établit que « chaque cellule multipolaire de la corne antérieure de la moelle donne naissance à un processus unique, particulier dans la racine ventrale. Les autres processus de la cellule sont physiquement et chimiquement différents de cette fibre ». Ces conclusions remarquables seront vérifiées par la suite.

Theodor Schwann est aussi un élève de Müller à Berlin. Il travaille sur les observations microscopiques d'une grande variété de tissus. En 1839, il publie son travail historique sur les *Mikroskopische Untersuchungen über die Übereinstimmung in der struktur und dem Wachstum des Tiere und Pflanzen*. Le titre en lui-même indique clairement l'intention de Schwann de généraliser ses découvertes sur les cellules et d'en démontrer la portée générale en biologie. Il en tire une conclusion fondamentale en formulant sa théorie qu'il nomme la théorie cellulaire. Ainsi, même si l'idée de la cellule est déjà présente dans l'esprit des biologistes de l'époque et que des histologistes comme Purkinje l'ont

implicitement admise, c'est Schwann qui, le premier, exprime clairement le concept, lui donne un nom et en fait une théorie générale, désormais universellement admise.

La théorie cellulaire admet que tous les tissus, tous les organes des animaux et des plantes sont constitués de cellules. Mais toute théorie a ses exceptions et le tissu nerveux va en rester une pendant longtemps. Alors que tous les autres tissus, comme ceux du muscle, du foie ou de l'intestin par exemple, sont faits de l'agencement de populations de cellules à la forme simple, aisément reconnaissables, reproduites en exemplaires identiques et disposées de façon régulière les unes à côté des autres, le tissu nerveux semble ne pas correspondre à cette définition. Les anatomistes vont se heurter à ce problème qui tient à la structure même de la cellule nerveuse, à l'immense complexité de sa forme et aux difficultés de fixation de ce tissu. Le débat d'idées sera souvent violent, les querelles se terminant par des ruptures idéologiques sans appel. La question qui restera longtemps posée est de savoir si le tissu nerveux répond à la définition des lois générales de la théorie cellulaire. Tous les biologistes de l'époque acceptent cette théorie mais nombreux sont ceux qui considèrent le système nerveux comme une exception. Ce n'est pas un hasard que ce système, considéré pendant des siècles comme le siège de l'âme, résiste à l'interprétation rationnelle des observations microscopiques. Il est vrai aussi que les techniques de préservation et de fixation des tissus ainsi que le pouvoir de résolution des microscopes ne font pas de progrès rapides. Les observations microscopiques du tissu nerveux offrent des images d'une immense complexité, inextricable enchevêtrement de fibres, de fines arborescences dont les origines et les terminaisons sont indiscernables et qui sont parsemées de renflements plus épais, difficilement interprétables. Cet aspect réticulé du tissu conduit à le considérer comme un réseau par anastomose sans discontinuité, incomparable à tous les autres tissus des organes vivants. Les tenants de l'hypothèse réticulaire éliminent ainsi l'idée de l'existence de cellules nerveuses indépendantes les unes des autres et situent le tissu nerveux hors de la théorie cellulaire.

La théorie du neurone

La doctrine du neurone s'élabore progressivement au cours de la seconde moitié du XIX^e s. sur fond de polémiques souvent violentes. Les progrès techniques dans les domaines de la fixation et la coloration du tissu nerveux vont jouer un rôle déterminant dans l'interprétation des images microscopiques. Hermann von Helmholtz, à Berlin, examine pour la première fois des tissus nerveux d'invertébrés et invente une nouvelle méthode de fixation en utilisant de l'alcool de vin. Il observe des systèmes nerveux de crabes, de sangsues, d'insectes, d'araignées et aboutit à la conclusion qu'il existe un lien entre la cellule et la fibre. Puis, Adolph Hannover, médecin danois étudiant à Copenhague et

Berlin, en utilisant de l'acide chromique pour fixer et durcir les tissus, détermine de bonnes conditions pour obtenir des coupes fines du tissu. On trouve dans sa thèse (1844) un dessin d'une cellule nerveuse donnant naissance à un prolongement unique, écartant les suggestions de Remak. De nombreux histologistes expérimentent de nouvelles colorations, essayent de combiner les propriétés d'agents chimiques différents et améliorent lentement les images obtenues sous le microscope. L'un d'eux, Otto Deiters, né à Bonn en 1834, est particulièrement doué et imaginaire. Il travaille d'abord avec Virchow à Berlin puis à Bonn avec le grand histologiste Max Schultze (1825-1874) qui est intéressé par l'organisation des tissus et la structure cellulaire. Il confie à Deiters l'étude du tissu nerveux. L'étudiant doué fait des découvertes fondamentales et meurt du typhus à l'âge de 29 ans (1863) en laissant inachevée une monographie de 300 pages avec 16 lithographies de cellules nerveuses d'une extraordinaire beauté. Ses observations, illustrées par des dessins magnifiques et d'une grande précision, présentent pour la première fois une image réaliste d'une cellule nerveuse. Son maître publie son œuvre deux ans après sa mort (1865) sous le titre *Untersuchungen über Gehirn und Rückenmark des Menschen und der Säugethiere*. On y trouve le dessin devenu célèbre d'une grande cellule motrice de la corne antérieure de la moelle épinière sur laquelle Deiters identifie clairement deux sortes de processus émergeant du corps cellulaire : l'axone et les dendrites.

Un autre anatomiste, Albrecht von Kölliker entre en scène. Né à Zurich en 1817, il y fait ses études de médecine, puis étudie à Berlin avec Müller et Remak. Sa thèse de doctorat (1841) est orientée sur la structure des cellules et des tissus. De retour à Zurich, il entreprend un travail sur le système nerveux et publie, en 1849, dans une revue *Neurologische Bemerkungen*, une série de figures de cellules nerveuses, donnant toutes naissance à un « processus pâle » qui, à son tour, est délimité par un « bord sombre ». Kölliker publie en 1852 son *Handbuch der Gewebelehre des Menschen* dans lequel il présente une synthèse des nouvelles connaissances sur l'organisation cellulaire des tissus en termes de théorie cellulaire. Il y suggère que les épaissements sombres marquant les limites de toutes les cellules sont des membranes faites de molécules. Il est persuadé que bientôt s'ouvrira une ère nouvelle pour l'histologie qui sera fondée sur une théorie moléculaire et une loi des gènes. Il annonce ainsi de façon prophétique la biologie moléculaire fondée sur les lois de la génétique. Il ne fait pas de doute que, dans l'esprit de Kölliker, la cellule nerveuse est une cellule individuelle comme dans tous les autres tissus. Mais il admet que la forme de la cellule reste très difficile à décrire et très mystérieuse. Il note que la controverse entre ceux, peu nombreux, qui admettent que la cellule nerveuse existe en tant qu'entité et ceux, largement majoritaires, qui adoptent l'opinion réticulaire de Valentin ne peut être tranchée par manque de moyens techniques adéquats. Il reste prudent et ne prend pas

clairement position. À défaut de démonstrations et de solutions, on discute sémantique. Kölliker propose, en 1896, un nom, l'« axone », pour le fin prolongement, unique, issu du corps cellulaire. His nomme les prolongements protoplasmiques multiples et ramifiés, les « dendrites », en 1893, et Waldeyer introduit en 1891 le mot « neurone » pour désigner la cellule nerveuse. Mais nommer les éléments ne suffit pas pour choisir entre les deux hypothèses. Le système nerveux est-il un vaste réseau continu comme les mailles d'un filet de pêcheur ou constitué, comme tous les autres tissus, d'éléments indépendants les uns des autres ? Théorie réticulaire ou théorie cellulaire ? Trancher entre les deux ne serait possible que si l'on pouvait mieux voir les détails de la cellule nerveuse à travers le microscope et déterminer les rapports des plus fines ramifications nerveuses entre elles.

L'histoire des connaissances sur le neurone, qui est source d'innombrables discussions, de violentes polémiques jusqu'au début du XX^e s., s'élabore dans les grands centres universitaires situés en Europe centrale dans un cercle de 700 kilomètres de diamètre délimité par Berne au sud, Berlin au nord, Breslau à l'est et Bonn à l'ouest. La géographie reflète le rôle culturel des universités allemandes dans l'élaboration des concepts modernes sur le système nerveux. Pourtant, c'est d'Italie que viendra un moyen révolutionnaire de colorer les tissus nerveux. Camillo Golgi (1844-1926), médecin travaillant à Pavie, publie, en 1873, dans le numéro 0 d'avril de la *Gazette médicale italienne*, une nouvelle méthode de coloration, fondée sur l'utilisation d'un sel d'argent après avoir plongé les préparations dans une solution de bichromate de potassium. Sa méthode, appelée la *reazione nera*, colore sélectivement, pour des raisons que l'on ignore encore, certaines cellules nerveuses et certaines fibres, ignorant les milliers d'autres cellules adjacentes. On obtient ainsi une image simplifiée du tissu nerveux sur laquelle il devient possible d'identifier un seul neurone et ses prolongements. C'est un progrès décisif qui donne accès à la forme d'un neurone. La coloration de Golgi lui permet de confirmer les observations de Deiters, de décrire pour la première fois le trajet d'un axone à partir de son corps cellulaire dans la moelle épinière jusqu'à sa sortie dans la substance blanche, de découvrir que les axones se ramifient et émettent des collatérales, qu'ils peuvent être longs et quitter la moelle, ou courts et rester à l'intérieur de la substance grise. Il découvre aussi la complexité des arborisations dendritiques et leur aspect souvent épineux. Grâce à sa nouvelle méthode, il décrit l'organisation de nombreuses régions du cerveau, en particulier le cervelet, la moelle épinière, le bulbe olfactif et l'hippocampe. Les dix ans qui suivent sa découverte de la *reazione nera* sont une période de production intensive pour Golgi. Mais l'isolement géographique, culturel et linguistique de l'Italie ne lui permet pas de transmettre ses observations princeps à l'Europe centrale. Il surmonte cette difficulté en faisant traduire ses articles en français et en les publiant sous forme de longues revues dans les

Archives italiennes de Biologie, en 1883 et 1884. Des traductions partielles de son travail sont aussi publiées à la même époque en anglais (1883 et 1885), mais la traduction allemande attendra la publication de son œuvre *Opera Omnia* en 1903. Si l'on considère son matériel et les faits, la contribution de Golgi constitue la première somme impressionnante de données nouvelles sur l'anatomie et l'histologie fine du système nerveux. Par contre, si l'on examine l'interprétation de ses observations microscopiques et ses spéculations sur le neurone, elle conforte l'idée dominante de l'hypothèse réticulariste dont Golgi va devenir l'un des défenseurs les plus convaincus. Les axones s'anastomosent pour constituer un vaste réseau de filaments tous reliés les uns aux autres. Quant aux dendrites, Golgi ne leur attribue que peu ou pas de rôle si ce n'est une fonction nutritive. Le concept de réseau qu'il propose comme une loi est fondé sur l'idée que Golgi se fait de la fonction du système nerveux qui doit nécessairement travailler comme un tout étant donnée la complexité des tâches à accomplir. Les plus grands anatomistes du XIX^e s. ont tous participé à la bataille du neurone sans qu'aucun d'eux ne la gagne vraiment jusqu'au moment où un Espagnol, né au village de Petilla dans la région d'Aragon, entre en scène, Santiago Ramon y Cajal (1852-1934). Il est le fondateur incontestable de la théorie du neurone. Il est reconnu comme l'un des plus grands savants de tous les temps au même titre que Vésale, Copernic, Gallée, Newton et Darwin. Son aventure scientifique a été racontée dans de nombreux ouvrages dont le plus intéressant est certainement sa propre autobiographie, *Recordos de mi vida*, publiée à Madrid en 1917. Au début de l'année 1887, il fait un voyage à Madrid et c'est à cette occasion qu'il découvre, chez un de ses amis psychiatre, la nouvelle méthode de coloration argentique du savant de Pavie. « C'est chez le Dr. Simarro que pour la première fois j'ai eu l'occasion d'admirer ces fameuses sections de cerveau imprégnées par la *reazione nera*. Je ne pouvais enlever mon œil du microscope. Tout était clair, comme dessiné à l'encre de Chine sur du papier japonais transparent [...] Des individualités en nombre immense, les neurones, complètement indépendants, simplement en contact les uns avec les autres, constituant, nous l'avons démontré, le système nerveux. Mais ces neurones à cause de la diversité de leurs positions et de leurs rapports, sont traversés par des courants de nature et de qualité différentes ; leur variété de forme influe aussi sur l'intensité, la direction et le mode de distribution de l'onde nerveuse. »

Il comprend immédiatement la puissance de la méthode, s'en empare et en fait un outil puissant qui va lui permettre de décrire de façon exhaustive les différents types de cellules nerveuses et toutes les régions du cerveau des mammifères, homme compris. Le génie de Ramon y Cajal est d'avoir compris que les images obtenues avec la *reazione nera* seraient de meilleure qualité si l'on examinait des cerveaux de nouveau-nés. En peu d'années, la somme de ses observations est considérable. Aucun homme n'a encore, à partir de

simples observations histologiques, imaginé avec autant de précision et de justesse le fonctionnement du système qu'il examine. Il établit des lois, en particulier celle de la polarisation dynamique qui veut que « les courants sont recueillis par les dendrites ou par le corps cellulaire puis conduits à travers ces portions du neurone et par le plus court chemin vers l'axone, qui, par ses multiples arborisations, les distribue ». En mai 1889, il publie à ses frais sa propre revue *Revista Trimestrial de Histologia normal y patologica* et en diffuse 60 copies à des scientifiques étrangers. Les articles qui y sont consignés sont tous de sa main, écrits dans un style moderne avec une introduction posant le problème, une description des méthodes ; suivent les résultats avec des figures illustrant les principales observations et une courte discussion indiquant comment les résultats obtenus répondent à la question posée. Il découvre très vite que les personnalités scientifiques auxquelles il avait envoyé sa publication ne lisent pas l'espagnol et que son travail reste ignoré. Il réalise la nécessité de faire traduire ses textes et « surtout de rencontrer les autorités en personne ». Il pose sa candidature à la Société allemande d'anatomie et s'inscrit au Congrès de Berlin qui doit avoir lieu en octobre 1889. Il y présente ses résultats devant le cénacle qu'il espérait : His, Schwalbe, Retzius, Waldeyer, Van Gehuchten et surtout Kölliker sont présents. Il se souvient « de la gentillesse de Kölliker qui l'emmène dans une splendide voiture dans son hôtel luxueux pour lui offrir à dîner et lui présenter tous les histologistes du pays ». Il établit des relations dans toute l'Europe. En 1894, il est invité par la Royal Society de Londres à donner la *Croonian lecture* de l'année. Cette conférence est un événement décisif dans l'histoire de la neurophysiologie, offrant au monde une synthèse magistrale des découvertes de Ramon y Cajal et de ses interprétations fonctionnelles.

En octobre 1906, Golgi et Ramon y Cajal sont informés par un télégramme qu'ils ont été choisis pour recevoir conjointement le prix Nobel de physiologie et de médecine en reconnaissance de leur contribution essentielle à la connaissance de la neurologie. Les deux hommes se rencontrent pour la première fois en décembre à Stockholm à la cérémonie officielle où sont présentées deux conceptions irréconciliables de l'organisation nerveuse, la première fondée sur le concept de réseau, la seconde sur la théorie du neurone. Cet affrontement violent apparaît dans les deux conférences dont le ton est très différent. Golgi, qui est le premier orateur, attaque d'emblée la théorie du neurone : « Aucun argument en faveur de la théorie du neurone ne résiste à l'examen... ». Ramon y Cajal décrit précisément son travail, présente des faits, ses interprétations et sa conception. Mais il est furieux de l'attitude peu objective de Golgi et il notera plus tard dans son autobiographie : « Quelle ironie cruelle du destin de réunir par les épaules comme deux frères siamois deux adversaires scientifiques de caractères aussi différents. »

En 1909-1911, Ramon y Cajal publie son traité *d'Histologie du Système nerveux de l'Homme et des*

Vertébrés en deux volumes d'environ mille pages chacun avec plus de mille figures en noir et en couleurs. Dès le second chapitre de l'ouvrage, l'auteur, tout en faisant crédit à Golgi de ses découvertes, lui règle son compte : « L'œuvre de Golgi comporte deux parts : d'un côté la méthode et les faits, créations fécondes, accueillies, approuvées d'enthousiasme, et de l'autre l'interprétation ; celle-ci, au contraire, combattue et repoussée... C'est l'époque où les réseaux interstitiels de Gerlach et la double origine des nerfs hantent, dominant tous les esprits où l'atmosphère nerveuse que respirent tous les neurologistes n'est formée que de ces pensées... Et Golgi, inconsciemment, recherche et croit voir dans ses préparations nouvelles la réalité de ces théories. Il proclame donc l'existence d'un réseau interstitiel dans la pulpe grise. Pour étayer davantage ce dire, il imagine lui-même d'autres hypothèses : il soutient que les expansions protoplasmiques n'ont qu'un rôle nutritif ; il partage les cellules nerveuses au point de vue physiologique, en deux types : un type moteur et un type sensitif. Autant d'hypothèses ! autant d'erreurs ! Nous fûmes le premier à le démontrer... » La bataille est gagnée même si les preuves directes ne seront apportées que 40 ans plus tard. Pourtant, la querelle va se poursuivre encore longtemps et le débat ne sera véritablement clos que grâce à l'invention du microscope électronique, en 1955. Cet appareil permettra d'apporter la preuve directe que l'intervalle séparant les membranes des prolongements des neurones est d'environ 20 nanomètres. Cette démonstration montre en même temps pourquoi la bataille du neurone n'a pas pu être résolue par les méthodes de la microscopie photonique.

La passion pour la doctrine du neurone comme sujet de polémique s'estompe en partie parce que la majorité des anatomistes accepte les conclusions de Ramon y Cajal et en partie parce que les débats deviennent stériles et sans intérêt. Une nouvelle époque s'ouvre, des outils nouveaux sont inventés et des questions nouvelles sont abordées.

Les concepts sur le neurone, élaborés au XIX^e s., sont fondés sur des observations microscopiques réalisées *post mortem* sur le tissu fixé. Seules des hypothèses sur la fonction peuvent être proposées. Il faut d'autres méthodes expérimentales qui permettent de travailler sur l'animal vivant pour vérifier les déductions fonctionnelles des anatomistes. Dans une célèbre expérience, relatée en 1791, Luigi Galvani, de Bologne, décrit la contraction d'une patte de grenouille détachée avec son nerf lorsqu'on fait toucher le nerf en deux points d'un muscle fraîchement sectionné. Cette expérience fondamentale de l'École de Bologne prouve l'existence de sources d'électricité au sein d'un tissu vivant. Jusqu'au début du XX^e s., les recherches sur l'électricité animale progressent lentement puis c'est l'explosion, entre 1920 et 1930, grâce à l'introduction dans les laboratoires de physiologie des outils nouveaux de l'électronique. L'électrogénèse du signal nerveux ou potentiel d'action, la conduction, la

transmission et la distribution spatiale du potentiel d'action, la réception et l'intégration des effets synaptiques provoqués par le potentiel d'action sont l'objet des recherches de l'électrophysiologie qui domine le XX^e s. Les détails de la structure fine du neurone sont découverts grâce à la microscopie électronique (1955). La description de la synapse règle le problème de la nature des contacts entre les neurones, apporte la preuve directe de la discontinuité entre eux et permet des interprétations fonctionnelles sur le rôle des terminaisons axoniques présynaptiques et leurs versants postsynaptiques au niveau du corps cellulaire ou des dendrites. La découverte de la membrane plasmique confirme les premières intuitions de Kölliker et Ramon y Cajal et conduit à proposer qu'il s'agit d'un élément cellulaire avec une organisation moléculaire complexe, lieu d'échange stratégique entre le milieu cellulaire intérieur et le milieu extracellulaire. L'électrophysiologie, d'abord descriptive, devient explicative en démontant les mécanismes à l'origine des phénomènes observés (Eccles, 1950). Elle se dote de moyens d'expérimenter sur le cerveau vivant. La fabrication de microélectrodes, dont la pointe peut être introduite à l'intérieur du corps cellulaire d'un neurone, permet de démontrer de façon directe l'existence d'une différence de potentiel, le potentiel de repos, entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule vivante, et que l'activité électrique du neurone vivant résulte du changement de ce potentiel. Hodgkin et Huxley (1952) proposent un modèle spécifique d'électrogénèse du potentiel d'action fondé sur les mouvements ioniques à travers des entités biochimiques qui seront plus tard définies comme les protéines canaux de la membrane plasmique. La nature des effets synaptiques est révélée par les travaux de Fatt et Katz (1951) au niveau de la synapse neuro-musculaire. Ils démontrent que l'arrivée d'un potentiel d'action dans la terminaison axonique provoque la libération de molécules d'acétylcholine. Des expériences similaires, effectuées sur les motoneurones de la moelle épinière, suggèrent l'existence d'un même mécanisme au niveau des neurones du système nerveux central (Eccles, 1952). Mais le cerveau reste un organe trop compliqué pour l'expérimentateur qui a besoin d'avoir un accès direct au neurone. Cette situation est réalisée en utilisant des systèmes nerveux d'invertébrés et grâce à la mise en œuvre de cultures de neurones. Systèmes simplifiés, outils réductionnistes certes mais dont la richesse des possibilités d'expériences est telle qu'on leur doit les principales découvertes des vingt dernières années. Les préparations *in vitro* offrent des systèmes de neurones vivants directement observables sous microscope, manipulables expérimentalement, enregistrables avec des microélectrodes introduites dans le neurone sous contrôle visuel. L'invention de l'électrophysiologie moléculaire (microélectrode de patch-clamp), permettant d'enregistrer une microscopique partie de membrane, confirme l'existence de molécules protéiques, les canaux ioniques, contrôlant les flux des ions à travers la membrane plasmique (Sackman et Neher,

1974). L'enregistrement de l'activité unitaire de ces molécules permet de découvrir une grande diversité de famille de canaux ioniques, leurs règles de fonctionnement et les mécanismes qui les contrôlent. L'ensemble de ces observations qui domine la recherche actuelle en neurobiologie, en utilisant les outils de la biologie moléculaire et de la génétique, constitue un admirable corpus de connaissances nouvelles. Cependant, l'exploration des phénomènes à l'échelle moléculaire a, pour un temps, marqué une pause dans l'exploration du fonctionnement du neurone en tant qu'unité fonctionnelle, à l'échelle cellulaire. Les outils qui permettraient une analyse simultanée de ces deux niveaux d'organisation restent à inventer.

Si l'on demandait à un neurobiologiste de choisir les deux techniques expérimentales qui ont été indispensables aux progrès des connaissances sur le système nerveux, il est vraisemblable qu'il sélectionnerait la méthode de coloration de Golgi et les microélectrodes. Dans les années 1960, l'idée qu'il devait être possible de combiner les avantages de ces deux outils, enregistrements *in vivo* et coloration, conduit des chercheurs des laboratoires de l'université de Harvard aux États-Unis à utiliser une microélectrode remplie d'un colorant spécifique pour enregistrer puis colorer un neurone unique dans un cerveau d'insecte (Stretton et Kravitz, 1968). Cette invention ouvre un champ nouveau de recherche qui permet à la fois d'identifier fonctionnellement un seul neurone vivant, d'étudier son activité électrique et de le marquer avec un colorant, contenu dans la microélectrode, qui est déposé à l'intérieur du corps cellulaire. À la fin de l'expérience, on dispose non seulement des enregistrements électriques mais aussi des images microscopiques du neurone. Ces images magnifiques sont plus belles encore que celles de la *razione nera*. En effet, le colorant intracellulaire a la propriété de diffuser jusque dans les plus fines arborisations dendritiques alors que la coloration argentique de Golgi ne colore que les parties dendritiques les plus proches du corps cellulaire. C'est la première fois que l'on peut voir les dendrites jusqu'à leurs extrémités les plus distales et apprécier aussi l'extraordinaire précision des dessins de Ramon y Cajal ! Grâce à l'utilisation de microscopes assistés par ordinateur, il est désormais possible de reconstruire un neurone dans l'espace et de décrire la géométrie quantitative de ses dendrites et de son axone. Cent ans après Ramon y Cajal, la troisième dimension est acquise et les conditions sont réunies pour élaborer des modèles de fonctionnement du neurone fondés sur la connaissance précise de sa géométrie. On peut ainsi démontrer que la géométrie est un facteur déterminant dans les opérations de traitement de l'information nerveuse, comme l'avait implicitement prévu Ramon y Cajal. Il faut y ajouter des hypothèses fonctionnelles sur la forme des arborisations dendritiques. Le neurone reste une unité fonctionnelle mais ses différentes parties constituent des ensembles complexes qui pourraient fonctionner indépendamment les uns des autres et effectuer des tâches en parallèle.

La fonction essentielle du neurone est de traiter de l'information. On peut considérer l'arborisation dendritique de chaque neurone comme une macrostructure qui reçoit des milliers d'événements synaptiques à traiter. Cette macrostructure est, elle-même, organisée en une microstructure moléculaire comportant des ensembles de canaux ioniques, de récepteurs, etc. distribués spatialement dans la macrostructure. Si l'on connaît le comportement individuel des canaux ioniques responsables des activités électriques du neurone, on ignore encore les lois qui régissent leur comportement collectif et le rôle de leurs interactions et, en particulier, l'importance de leur distribution spatiale dont on ignore tout. On ne sait pas où sont localisées les molécules actives à un moment donné dans la membrane du neurone. Le problème, qui est l'un des enjeux essentiels de la neurobiologie actuelle, est d'établir un lien entre deux niveaux d'organisation, moléculaire et cellulaire, et d'en comprendre les lois. La question posée est de découvrir comment le comportement individuel des canaux est modifié quand il est soumis au comportement d'une collectivité. La difficulté réside dans le fait que les échelles d'observation sont différentes dans l'espace et dans le temps. L'introduction de nouveaux outils est nécessaire pour aborder ce domaine car jusqu'à maintenant le seul instrument utilisé par l'électrophysiologiste depuis plus de 50 ans, la microélectrode intracellulaire, enregistre des variations de potentiels au cours du temps en un seul point du neurone. Elle rend compte de la somme de tous les événements survenus dans la membrane du neurone pendant le temps donné de son excitation. On ignore le détail de ces événements et surtout où ils ont lieu dans le neurone. La microélectrode de patch-clamp, elle, renseigne sur le comportement d'une parcelle microscopique de membrane et ignore tout de ce qui se passe dans le reste (qui est immense) du neurone. L'idéal serait de pouvoir recouvrir la membrane neuronique avec des milliers d'électrodes de patch-clamp. Une solution est actuellement à l'étude.

Il existe des molécules fluorescentes dont l'intensité lumineuse varie très faiblement lorsqu'elles sont soumises à des différences de potentiel. Ces molécules peuvent être utilisées dans des cultures de neurones où elles se fixent dans les membranes cellulaires. Chaque fois que le neurone est excité, c'est-à-dire produit un potentiel d'action (différence de potentiel), l'intensité de la fluorescence du colorant varie. Il existe des caméras d'astronomie suffisamment sensibles pour détecter de très faibles quantités de lumière comme par exemple celle qui est émise par des étoiles mortes depuis des millions d'années et dont on continue à recevoir quelques photons sur la terre. La combinaison de ces deux outils, sondes moléculaires sensibles au voltage et caméra d'astronomie, est actuellement utilisée en laboratoire pour enregistrer les variations de fluorescence du colorant lorsqu'un neurone est excité. La caméra, fixée sur un microscope, remplace l'œil de l'observateur, regarde les neurones vivants en culture et détecte les variations de fluorescence survenant dans leur membrane lorsqu'ils

sont excités. Les photos prises par la caméra pendant l'excitation d'un neurone ressemblent à celles de l'imagerie cérébrale avec la différence qu'il s'agit de neurones en culture, que la résolution des pixels est de l'ordre du micromètre, et que ce qui est détecté de façon spécifique est une variation de fluorescence causée par une variation de potentiel. Les premières images obtenues par ce système révèlent que la membrane d'un neurone excité est une mosaïque de sites dépolarisés, de taille et d'intensité variées et que leur distribution spatiale change à chaque excitation. L'interprétation qui en est actuellement donnée est qu'il s'agit de la visualisation des effets locaux provoqués par les opérations des canaux ioniques distribués de façon hétérogène dans la membrane du neurone. L'activité nerveuse résultante proviendrait de processus stochastiques définissant le comportement des canaux ioniques dont l'organisation spatiale dans la membrane serait le facteur déterminant. Ces résultats très récents (1995) doivent être confirmés. Ils s'inscrivent dans une hypothèse générale sur le rôle de la forme du neurone dans ses capacités à traiter l'information nerveuse. Ils soulignent l'importance de la géométrie des arborisations dendritiques. Les deux architectures cellulaire et moléculaire sont interdépendantes et imposent les conditions des opérations infiniment complexes effectuées par le neurone. Le XXI^e s. apportera des outils plus performants dans le domaine de l'imagerie cellulaire à hautes résolutions spatiale et temporelle qui permettront de vérifier ces hypothèses.

► BRAZIER A.B., *The historical development of Neurophysiology, Handbook of Physiology*, Section Neurophysiology, vol. 1, éd. J. Field, Washington (DC), American Physiol. Soc., 1959. — MEYER A., *Historical aspects of cerebral anatomy*, New York, Oxford Univ. Press, 1971. — SHEPHERD G.M., *Fondations of the neuron doctrine*, New York, Oxford Univ. Press, 1991.

Suzanne TYC-DUMONT

→ Cellule ; Cognition et sciences cognitives ; Localisations cérébrales ; Neurophilosophie ; Réflexe ; Sciences cognitives.

NEUROPHILOSOPHIE

Le mot

Le néologisme « neurophilosophie » apparaît pour la première fois comme le titre du premier ouvrage de la philosophe américaine Patricia Smith Churchland publié en 1986 *Neurophilosophy, toward a unified science of the mind-brain*. Dès 1980 William J. Davis faisait paraître un article à propos des « Neurophilosophical reflections on central nervous pattern generators » : il affirmait déjà sa volonté de dépasser les limites traditionnelles de la science et d'aller au-delà de la division de la philosophie, de l'épistémologie et de la logique. L'apparition de ce néologisme est limitée : nous en avons retrouvé des significations différentes. Elles ne renvoient pas systématiquement au sens défini par P.S. Churchland : pour elle la neurophilosophie est la science unifiée de l'esprit-cerveau.

Élimination, réduction et unification

Ces trois étapes, élimination-réduction-unification, représentent trois relations tendant à nier la différence entre la philosophie et les neurosciences : élimination de l'existence des états mentaux, réduction des objets traditionnels de la philosophie, unification de toutes les sciences.

L'élimination. — Elle provient de la tentation, dans la rencontre de la philosophie et des neurosciences, de naturaliser les concepts traditionnels de la philosophie (mais aussi de la psychologie ordinaire) comme la conscience, l'intentionnalité, le désir... Les progrès méthodologiques et techniques des neurosciences auraient légitimé cette élimination dans la mesure où la philosophie des facultés ne serait plus adaptée pour rendre compte de la description fonctionnelle du cerveau. Ce remplacement des facultés par les fonctions exigerait la formation d'une neurophilosophie susceptible de réinterpréter, à la lumière des neurosciences, les phénomènes traditionnellement attribués à l'esprit. L'élimination des états mentaux serait la conséquence nécessaire de l'analyse neuronale des productions du cerveau.

La réduction traditionnelle. — Elle est rejetée par la neurophilosophie qui y perçoit une attitude caricaturale et facilement critiquable. S'inscrivant dans une perspective interthéorique, la réduction vise à éliminer les thèses de la psychologie ordinaire en les remplaçant par des arguments constitués à partir des résultats des neurosciences. Au contraire la réduction interthéorique repose dans la neurophilosophie sur la sélection des travaux des neurosciences qui permettrait de définir les conditions neurobiologiques de la conscience, de la perception, de l'intentionnalité. Il existe aussi une alternative épistémologique à cette réduction interthéorique qui avance l'élimination de la psychologie ordinaire comme une nécessité devant les progrès des neurosciences. Le lent travail de reconstitution de l'histoire des neurosciences tend à prouver la fécondité des réductions méthodologiques dans leurs paradigmes respectifs. La sélection partielle de certains travaux ne nous semble pas conforme à l'histoire des neurosciences.

L'unification. — C'est un projet qui a pour but de constituer une science unique dans laquelle la philosophie et les neurosciences n'auraient plus aucune différence de champ et d'objet. Le projet de la Neurophilosophie sert de référence à ce rêve d'une science unifiée : la confusion s'effectue en liant la quête philosophique de l'unité de la Nature aux développements de la chimie, de la physiologie et de l'électrophysiologie.

Les trois thèses de la neurophilosophie, élimination-réduction-unification, obligent à un travail de genèse et de critique. L'aspect cumulatif des thèses de la neurophilosophie 1, 2, 3 est essentiel : thèse 1, discours

fondateur car constitutif de la réalité neurobiologique de l'être humain ; thèse 2, discours d'élimination et classification des théories scientifiques selon leur intérêt neuroscientifique ; thèse 3, discours de domination de la neurophilosophie comme la science unifiant toutes les sciences. La science unifiée résorberait ainsi les différences de méthode et de contenu entre les sciences humaines (comme la philosophie et la psychologie) et les sciences de la vie.

Philosophie du cerveau

La réduction des états mentaux aux états neurobiologiques du cerveau peut-elle constituer le seul modèle des relations entre la philosophie et les neurosciences ? Les neurosciences sont plutôt mal interprétées dans la version neurophilosophique d'un matérialisme. Avec un examen des limites respectives de l'électrophysiologie, de la neurochimie et de la neurobiologie du développement, une autre interprétation de la matière cérébrale : celle d'un matérialisme dynamique qui prenne en compte l'évolution, la plasticité et l'interaction du cerveau.

La neurophilosophie est au contraire l'aboutissement d'une démarche d'unification de la psychophysiologie entreprise depuis le milieu du XIX^e s. par laquelle la philosophie devait trouver dans la neurologie la réponse à ses questions concernant les rapports de l'esprit et du corps. Suffit-il d'un soubassement neuroscientifique pour affirmer la disparition de la psychologie et son remplacement par la neuropsychologie ? Aussi la critique de la psychologie ordinaire par la neurophilosophie devra-t-elle être interprétée comme la conséquence d'une adhésion positive aux découvertes des sciences cognitives (neurosciences, intelligence artificielle, réseaux neuronaux). Les résultats neuroscientifiques cautionnent la méthode d'élimination des théories anciennes et l'affirmation idéologique de la toute-puissante science unifiée de l'esprit et du cerveau.

► AKINS K.A., « Neurophilosophy. Book Review », *The Journal of Philosophy*, vol. LXXXVII, n° 2, fév., 1990, p. 93-103. — ANDRIEU B., *La neurophilosophie*, Paris, PUF « Que-sais-je ? », 1998. — BICKLE J., « Mental anomaly and the new mind-brain reductionism », *Philosophy of science*, 59, 1992, p. 217-230. — CHURCHLAND P.S., *Neurophilosophy, toward a unified science of the mind-brain*, Cambridge (Mass), MIT Press, 1986. — CHURCHLAND P.S. & CHRISTEN Y., *Neurophilosophy and Alzheimer's Disease*, Berlin, Springer-Verlag, 1992. — DAVIS W.J., « Neurophilosophical reflections on central nervous pattern generators », *The Behavioral and Brain Sciences*, 1980, 3, p. 543-544. — DEBRU C., *Neurophilosophie du rêve*, Paris, Hermann, 1990. — DUPUIS M., *Les neurones en personne. Six propositions pour une neurophilosophie*, Liège, Univ. libre, 1989. — ENGEL P., *Philosophie et psychologie*, Paris, Gallimard, 1996, p. 344-354. — GILLET G.R., « The neurophilosophical of pain », *Philosophy*, 66, 1991, p. 191-205. — KLAMIE K.A., « Neurophilosophy and the logic-causation argument », *Dialogue*, avril 1990, p. 39-42. — KITCHER P., « Model of Reduction », *Nature*, 31 juil. 1986, vol. 332, p. 413-414. — MISSA J.-N., *L'esprit-cerveau*, Paris, Vrin, 1993, p. 202-208. — PACHERIE É., *Naturaliser l'intentionnalité*, Paris,

PUF, 1993, p. 30-37. — PEREZ DE LABORDA A., « El problema mente cerebro : a proposito de P.S. Churchland », *La Ciudad de Dios*, Esp., 1989, 202, n° 2, p. 449-475. — POIREL C., *Le cerveau et la pensée. Critique des fondements de la neurophilosophie*, Paris, L'Harmattan, 1997. — SERENO M., « A Program for the Neurobiology of Mind », *Symposium sur Neurophilosophy de P.S. Churchland, Inquiry. An Interdisciplinary Journal of Philosophy*, 1986, 29, p. 217-240. — SKARDA C.A., « Explaining Behavior : Bringing the Brain Back », *Symposium sur Neurophilosophy de P.S. Churchland, Inquiry. An Interdisciplinary Journal of Philosophy*, 1986, 29, p. 187-202. — SMITH A., « Brain-mind Philosophy », *Symposium sur Neurophilosophy de P.S. Churchland, Inquiry. An Interdisciplinary Journal of Philosophy*, 1986, 29, p. 203-216.

Bernard ANDRIEU

→ Cognition et sciences cognitives ; Cognitivism ; Localisations cérébrales ; Neurone ; Sciences cognitives.

NEWTON Isaac, 1642-1727

Mathématicien, astronome, physicien, philosophe, théologien et alchimiste anglais. Ses inventions en mathématiques et en physique eurent un retentissement immédiat qui lui procura la gloire et déclencha de vives polémiques, mais laissèrent dans l'ombre les autres aspects de son œuvre. Newton connut son *annus mirabilis* en 1666 ; l'épidémie de peste l'ayant retranché à la campagne, il donna leurs premières formes aux idées qu'il n'allait pas cesser de reprendre « en y pensant continuellement » : en mathématiques, la « methodus fluxionum » équivalent newtonien du calcul différentiel de Leibniz ; en optique, la compréhension du caractère composite et corpusculaire de la lumière ; en mécanique, l'idée de lois générales du mouvement qui réunissent celles de Kepler en astronomie et celles de la mécanique terrestre de Galilée. Son œuvre majeure ne parut qu'en 1687 : les *Philosophiae naturalis principia mathematica* réalisent l'unification des mondes céleste et terrestre inaugurée par Galilée dans une perspective délibérément opposée à celle des *Principia philosophia* de Descartes. De fait les cartésiens voyaient en l'idée d'une action à distance, un retour aux qualités occultes. Pour Newton, la force d'attraction permettait seulement des prévisions vérifiables : « Je n'ai assigné nulle part la cause de cette gravitation [...] et je n'imagine point d'hypothèses. » Cette affirmation n'exclut pas de concevoir l'espace comme « sensorium Dei » car « Dieu est présent partout substantiellement [...] tout est mu et contenu dans lui » ; elle n'exclut pas non plus l'étude des prophéties bibliques pour apprendre la langue de Dieu, ni la pratique de l'alchimie en laquelle Newton trouvait le moyen de contester une philosophie mécaniste réduite à une physique des chocs. En effet « la pensée aime les transmutations » (*Opticks*, 1704).

● *Isaaci Newtoni Opera quae extant Omnia*, Londres, Samuel Horsley, 5 vol., 1779-1785. — *The correspondence of Isaac Newton*, éd. A.R. & M.B. Hall, Cambridge, 7 vol., 1959-1977. — *The mathematical papers of sir Isaac Newton*, éd. D.T. Whiteside, Cambridge, 8 vol., 1967-1981. — *Philosophiae naturalis*

principia mathematica, rééd. A. Koyré, I.B. Cohen & A. de Whiman, Cambridge, Univ. Press, 1972. — *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, trad. fr. Madame du Châtelet, Paris, 1756 et 1759 (rééd., Paris, Gauthier-Villars, 1955). — *Traité d'optique*, trad. fr. Coste, Amsterdam, 1720 (rééd., Paris, Blanchard, 1966). — *La méthode des fluxions*, trad. fr. Buffon, Paris, 1740 (rééd. Paris, Blanchard, 1966).

► BARTHÉLEMY G., *Newton mécanicien du cosmos*, Paris, Vrin, 1992. — BLAY M., *La conceptualisation newtonienne des phénomènes de la couleur*, Paris, Vrin, 1983. — COHEN I.B., *Introduction to Newton's principia*, Cambridge, Univ. Press, 1971 ; *The newtonian revolution*, *ibid.*, 1980. — COWLING I.G., *Isaac Newton and astrology*, Leeds, Univ. Press, 1977. — HALL A.R., *Isaac Newton, adventurer in thought*, Oxford, Blackwell, 1992 ; *Philosophers at war*, Cambridge, Univ. Press, 1980. — KOYRÉ A., *Études newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968. — WESTFALL R., *Never at rest : a biography of Newton*, Cambridge, Univ. Press, 1980 (trad. fr., Paris, Flammarion, 1994).

François REMOISENET

→ Alchimie ; Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Champ ; Comète ; Couleur ; Découverte ; Déterminisme ; Équivalence (Principe de) ; Espace ; Éther ; Force ; Gravitation ; Hasard ; Inertie (Principe de) ; Lumière ; Marées ; Masse ; Mote ; Mouvement ; Origines de la vie ; Réel ; Temps ; Univers ; Vision.

NICOLLE Charles, 1866-1936

Bactériologiste français. Charles Nicolle, médecin, s'est surtout consacré au laboratoire et a passé la plus grande partie de sa vie à l'Institut Pasteur de Tunisie. Il a reçu le prix Nobel en 1928 pour sa découverte de la transmission du typhus par le pou, qui a fondé la prophylaxie de l'infection.

Nicolle a élucidé le cycle (leishmaniose) ou décrit l'agent (toxoplasme) de nombreuses infections. Dans *Le Destin des maladies infectieuses* (Alcan, 1930), il a souligné les variations de virulence des germes et la possibilité d'affections inédites offertes par leur adaptation à de nouveaux hôtes. Sensibilisé à la philosophie de l'histoire par ses observations de la société coloniale, il a tracé un parallèle entre la vie et la mort des civilisations et celle des épidémies, dans une perspective de biologie des organismes plutôt lamarckienne et sans faire intervenir la génétique. Son insistance sur la responsabilité humaine dans la genèse des fléaux, par oubli de la complexité des interactions hôte-parasite, trouve un écho dans l'écologie contemporaine. Il voyait cependant dans la civilisation industrielle le moyen de remédier aux maux qu'elle a créés par la recherche scientifique (*Responsabilités de la médecine*, Paris, Alcan, 1935).

Professeur au collège de France (1933-1936), il a entamé une réflexion philosophique sur l'expérimentation et l'écriture scientifique, tout en donnant le pas à une épistémologie du dévoilement de la nature sur une vision plus instrumentaliste. L'émergence des « nouveaux virus », l'essor actuel de la bioéthique ont redonné une actualité à ses ouvrages.

► HUET M., *Le pommier et l'olivier*, Paris, Sauramps, 1995. — MOULIN A.M., « Charles Nicolle savant tunisien », *Archives de l'Institut Pasteur de Tunis*, 1994, 71, p. 355-370. — PELIS K., *Charles Nicolle Missionary of Medicine*, Baltimore, Johns Hopkins Univ. Press, 1999.

Anne Marie MOULIN

→ Épidémie ; Micro-organisme.

NOBEL Alfred, 1833-1896

Alfred Nobel, né à Stockholm (Suède) est le fils d'un ingénieur, propriétaire d'une entreprise de construction. En 1837 la famille Nobel s'installe à Saint-Petersbourg (Russie) où le père fournit des matériaux de guerre aux tsars. Ayant reçu une éducation privée, Nobel effectue des stages en Suède, en Allemagne, en France et aux États-Unis, et se forme comme ingénieur de chimie. De retour en Suède avec sa famille en 1863, ses expériences avec la nitroglycérine, dont la force explosive est violente, coûtent la vie à son jeune frère. En mélangeant la nitroglycérine avec du silicate, il rend possible son transport et son utilisation dans des travaux de construction de tunnels, canaux, et routes partout dans le monde. Ce procédé breveté en 1867 sous le nom de dynamite sera à l'origine de l'empire commercial multinational créé par Nobel. Parallèlement, il poursuit ses activités d'inventeur dans ses laboratoires privés en France, en Italie et en Suède, activités qui seront couronnées par plus de 350 brevets. Il s'intéresse également aux différents mouvements pour la paix, s'adonne à la poésie et écrit des pièces de théâtre.

À sa mort à San Remo (Italie) en 1896, Nobel, qui ne s'est jamais marié, est l'un des hommes les plus riches d'Europe. Par son testament (1895) il demande à ce que sa fortune (estimée à 40 millions de francs) serve à créer des prix en physique, chimie, physiologie ou médecine, littérature, et « œuvre de la paix » : les premiers « prix Nobel » seront décernés en 1901.

► CRAWFORD E., *La Fondation des prix Nobel scientifiques. 1901-1915*, Paris, Belin, 1988. — SCHÜCK H. et al., *Nobel, l'homme et ses prix*, Paris, Presses du Compagnonnage, 1965.

Élisabeth CRAWFORD

→ Prix Nobel des sciences.

NOMENCLATURE

CHIMIE

Par nomenclature chimique on désigne aujourd'hui l'ensemble des règles conventionnelles permettant de déterminer le nom des substances en fonction de leurs propriétés chimiques. La fixation de ces règles a toutefois suivi un parcours historique des plus complexes et des moins linéaires, si bien qu'au début du XVIII^e s.

encore la chimie était souvent confondue avec l'alchimie et l'art de la transmutation des métaux. Les raisons de cette confusion, qui a longtemps maintenu la chimie dans un état de subordination par rapport aux autres sciences naturelles, sont à chercher dans la nature du vocabulaire technique adopté et dans les principes philosophiques auxquels il obéissait. Avant les travaux de Lavoisier, le langage de la chimie se composait d'un nombre indéfini de termes pour la plupart dérivés des propriétés transcendantes et miraculeuses prêtées aux substances et aux composés. Le recours à des dénominations plus propres à exalter leurs qualités occultes qu'à préciser leurs propriétés physicochimiques extérieures entraînait les chimistes à forger des mots différents pour désigner une même substance. Paracelse, par exemple, appliquait le terme de « mercure », aussi bien au vif-argent, substance aux propriétés toxiques reconnues, qu'à un composé doté de propriétés thérapeutiques infaillibles. Pareilles confusions linguistiques compliquaient bien évidemment les pratiques pharmaceutiques et la préparation des remèdes. De plus, la profusion des synonymes et l'usage qui permettait d'appliquer des termes sémantiquement contraires à une même substance ou une même opération chimique faisaient de la chimie d'avant Lavoisier la science la plus riche du point de vue linguistique. En regard des nomenclatures concises et précises de la physique et de l'astronomie, la masse incontrôlée et incontrôlable des termes employés en chimie et en alchimie débouchait sur un formalisme vide, avec pour première conséquence la multiplication des controverses et des débats sur le sens des mots.

Cette complexité inhérente à la nomenclature chimique était encore aggravée par les rapports établis dès l'Antiquité entre l'alchimie et l'astrologie, et dont la conséquence la plus manifeste et la plus importante transparait dans le choix des noms adoptés pour désigner les métaux ; la doctrine astrologique associait en effet les sept planètes à sept métaux, désignés en fonction de l'astrologie sur la dénomination des métaux est encore perceptible de nos jours, ne serait-ce que par la vogue qu'a connue le terme *mercurius* qui, dans plusieurs langues latines, s'est substitué à celui, plus spécifiquement chimique, de vif-argent. L'étroitesse des liens entre astrologie et alchimie, la polyvalence sémantique de leurs terminologies respectives ne pouvaient que sérieusement compliquer la tâche des naturalistes désireux d'établir avec certitude si tel ou tel texte était un traité d'astrologie ou d'alchimie. Du reste, en entreprenant de fonder l'étude du monde sublunaire sur l'interprétation des signatures du macrocosme céleste, Paracelse justifiait philosophiquement la confusion *a priori* établie entre astrologie et alchimie. Son ambition d'étendre le champ de la chimie au-delà des limites de la matière et du visible favorisa l'émergence d'une nomenclature à peu près illimitée, fourmillant d'analogies, de métaphores, de symboles, d'icônes, de tableaux et de néologismes excentriques empruntés aux

langues les plus disparates pour désigner des substances qui, du point de vue chimique, ne recelaient aucun mystère.

Deux facteurs apparus dans les premières décennies du XVIII^e s. contribuèrent à amorcer un changement d'attitude radical vis-à-vis de la terminologie. Tout d'abord, les progrès de la métallurgie, de la médecine et de la pharmacie permirent d'isoler un nombre considérable de nouvelles substances inorganiques. Ce gain quantitatif obligea les chimistes à réfléchir aux moyens de nommer ces objets nouveaux dotés de propriétés chimiques bien déterminées. La situation s'était donc renversée : alors que les noms servaient autrefois à exprimer des idées de nature métaphysique, désormais la découverte de corps physiques nouveaux passait nécessairement par la démarche expérimentale et empirique.

L'autre grand facteur qui permit à la chimie du XVIII^e s. de se dégager de ses origines ésotériques et métaphysiques fut l'influence exercée par les philosophes des Lumières sur le développement scientifique. L'importance philosophique potentielle de la chimie n'échappait pas à Diderot, d'Alembert, Holbach, Rousseau, Turgot et bien d'autres collaborateurs illustres de l'*Encyclopédie*. Ainsi Diderot la tenait-il pour la seule science à même de pénétrer les mystères de la matière sans devoir en passer par des hypothèses de nature métaphysique. Dans cette conjoncture culturellement favorable, la découverte de Stephen Hales qui établissait que l'air, en se fixant dans les corps, entraînait dans leur composition et en altérait la nature chimique, vint détrôner le principe aristotélicien qui consacrait la passivité et la simplicité de l'air. Lorsque, en 1772, Antoine Laurent Lavoisier commença à s'intéresser de manière systématique à la chimie, la découverte de nombreuses substances chimiques nouvelles, la constatation que l'air n'était pas un élément simple, la possibilité d'isoler des gaz jusqu'alors inconnus constituaient autant d'acquis dont les naturalistes reconnaissaient la fantastique signification expérimentale tout en s'épuisant à en comprendre les implications théoriques.

Dans une note datée de 1773, Lavoisier déplore que les extraordinaires révélations apportées sur l'air n'aient pas conduit les chimistes à modifier en conséquence leur vocabulaire technique. Pour désigner par exemple le composé obtenu par combinaison de l'oxygène au soufre, les chimistes ne parlaient pas d'acide sulfurique mais de vitriol, terme sans rapport aucun avec les deux réactifs. Pour Lavoisier, au contraire, la découverte du rôle actif que joue l'air dans les réactions chimiques offrait une occasion rêvée de corriger de fond en comble la nomenclature traditionnelle et de la libérer des ambiguïtés et des incohérences héritées de l'alchimie et des autres sciences occultes. Le premier néologisme introduit par ses soins dans le vocabulaire de la chimie moderne fut celui de « principe oxygène », formé à partir du grec *oxis* (acide) et *geinomaï* (qui est engendré) ; le chimiste français

entendait désigner grâce à ce terme la principale caractéristique de ce gaz, qui en faisait le principe d'acidification des substances. La définition de l'oxygène répondait donc à deux règles : la première, et la plus importante, stipulait que le sens du nom devait être conforme à la nature chimique de l'objet qu'il s'agissait de définir ; la seconde préconisait de s'appuyer dorénavant sur l'étymologie grecque pour former les termes chimiques.

Le recours à une langue morte comme le grec ne devait en rien diminuer l'extraordinaire vitalité des conceptions linguistiques de Lavoisier. De fait, la définition de l'oxygène, outre qu'elle rend compte de façon plausible du processus d'acidification, explique également des opérations et des phénomènes extrêmement répandus, telles la calcination, la combustion et la respiration. En unifiant ces trois opérations dans la définition de l'oxygène (substance isolée pour la première fois en 1774 seulement), Lavoisier bouleversait le cadre général de la terminologie chimique traditionnelle. Les règles adoptées pour l'oxygène furent définitivement étendues à l'ensemble de la chimie avec la publication, en 1787, de la *Méthode de nomenclature chimique*.

Fruit de la collaboration de Lavoisier avec Antoine François de Fourcroy, Louis Bernard Guyton de Morveau, Claude Louis Berthollet, cet ouvrage était destiné à fixer les règles et les bases linguistiques de la nomenclature chimique contemporaine. Les fondements de la nouvelle terminologie correspondaient à la définition des corps simples, autrement dit de substances que l'analyse chimique était impuissante à décomposer plus avant. Lavoisier les subdivisa en cinq classes, dont la première qui comprenait la lumière, le calorique, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote représentait le noyau sémantique dont dépendait tout l'édifice linguistique de la chimie de Lavoisier.

La deuxième classe de substances regroupait pas moins de vingt-cinq bases acidifiables, alors que les seules d'ores et déjà isolées de façon expérimentale étaient l'azote, le soufre, le carbone et le phosphore. Simple mais efficace, le système terminologique adopté pour les bases s'inspirait de la nomenclature binominale utilisée par Linné pour les noms de plantes. Le soufre, pour prendre un exemple, étant la base acidifiable de l'acide vitriolique, c'est en se combinant à l'oxygène qu'il générerait cet acide à qui il fallait désormais attribuer un nom dérivé de celui de la base en le baptisant « acide sulfurique » ; lequel était néanmoins susceptible de se présenter sous deux formes, correspondant à deux états de saturation aux propriétés chimiques bien distinctes, et devait par conséquent recevoir une double appellation qui, autour d'une racine commune, mettrait en évidence la différence caractéristique de ces deux états. « Acide sulfurique » serait le nom du soufre entièrement saturé d'oxygène ; « acide sulfureux », celui d'un mélange soufre-oxygène à un moindre degré de saturation ; le « sulfite » désignerait le sel de l'acide sulfureux, « sulfure »

serait le terme appliqué à toute autre combinaison où le soufre entre à l'état non acide. La formidable innovation de ce système de dénomination tenait à la prise en compte de la nature quantifiable des substances, puisque les différentes définitions fournissaient des précisions d'ordre quantitatif d'emblée décelables : les suffixes -ique, -eux, -ate, -ite, -ure renvoyaient non seulement à une substance déterminée et à ses propriétés chimiques, mais également à ses proportions quantitatives particulières.

La troisième classe de substances simples présentée dans la *Méthode* était celle des métaux, qui conservaient leurs noms traditionnels mais avec une innovation importante : les métaux calcinés, autrement dit combinés à de l'oxygène, étaient qualifiés d'oxydes, procédé sémantique qui insistait plus encore sur le rôle de l'oxygène. Enfin, la quatrième et la cinquième classe de substances précisaient les règles de dénomination des terres et des alcalis. Lavoisier estimait qu'il existait au total cinquante-cinq substances simples, dont les noms regroupés deux par deux et trois par trois permettaient d'arriver à une nomenclature de plus de 320 000 noms. Certains d'entre eux correspondaient à des composés qui n'avaient pas encore été isolés expérimentalement mais qui, selon Lavoisier, devaient être découverts une fois que les techniques analytiques auraient gagné en précision et en puissance.

En grande partie forgée à partir de racines grecques ou latines, la nomenclature n'empruntait que dans une proportion minime aux langues vernaculaires. Bien que Lavoisier écrivit ses traités en français, il préféra transcrire les termes du grec plutôt que de les créer directement dans sa langue. Ce choix fut indubitablement bien inspiré, s'agissant d'une nomenclature imaginée et conçue par des chimistes français peu familiers des langues classiques : l'usage systématique du grec lui conféraient une identité d'expression universelle et cosmopolite. Mais c'est aussi pour des raisons d'ordre technique et euristique que Lavoisier opta pour le grec. Il pouvait en effet s'en servir comme d'un langage formel et abstrait, en combinant les racines entre eux selon des règles de type mathématique. La nouvelle terminologie visait entre autres explicitement à créer un système de signes servant efficacement l'étude et la définition de la matière structurée sur le modèle mathématique. En proposant sa nomenclature comme une combinatoire de principes de type algébrique, Lavoisier avait compris que la mathématique constituait un langage d'une finesse et d'une étendue inépuisables, ainsi qu'un instrument incomparable pour restituer les faits avec une précision transparente.

La publication de la *Méthode de nomenclature chimique* mit en émoi la communauté des chimistes. Dans des pays comme l'Allemagne, la Grande-Bretagne et la Suisse, où les études de chimie étaient solidement implantées, la nouvelle terminologie fut considérée comme un outrage au passé spécifique et à la richesse d'expression de la chimie traditionnelle. A ces résistances s'ajoutaient les problèmes liés à sa traduction dans les différentes langues européennes. Si les

Anglais se limitèrent à adapter les noms français au génie de leur langue, sans altérer l'essence et l'efficacité du système combinatoire imaginé par Lavoisier, les Allemands optèrent pour une solution plus compliquée en traduisant également les noms grecs. Ainsi le terme oxygène, traduit en anglais par *oxygen*, devint *sauerstoff* en allemand. Ce parti retenu par les Allemands, et à leur suite par les Scandinaves et les Hollandais, entraîna la disparition des suffixes et des avantages qu'ils présentaient. Mais quels qu'aient été les choix de traduction, la nouvelle nomenclature chimique formait un système linguistique universellement compréhensible et facile à apprendre. Malgré les réticences unanimes au départ, le succès du langage mis au point par Lavoisier est sans précédent dans l'histoire des sciences. Si avant 1785 personne hormis Lavoisier ne se servait du mot oxygène et de ses dérivés, à partir de 1795 la grande majorité des scientifiques s'était convaincue de l'utilité de la nouvelle nomenclature.

Au début du XIX^e s., le chimiste suisse Jöns Jacob Berzelius appliqua avec succès les règles terminologiques de Lavoisier aux substances et composés organiques en associant l'usage des suffixes à une nomenclature de type binominal. Dès 1850, toutefois, le prodigieux développement de la chimie organique commença à poser de sérieux problèmes sur le plan linguistique. La découverte d'un nombre toujours plus grand de composés et d'une quantité plus impressionnante encore de nouveaux types de composés, les hydrocarbures par exemple, suscitait des difficultés non prévues par Lavoisier. Le Congrès international de chimie convoqué en 1892 tenta d'y remédier en formulant des règles conventionnelles appuyées sur des principes universels pour fixer la dénomination des nouveaux composés organiques. Ces tentatives d'uniformisation ne devaient cependant aboutir qu'en 1931, avec la publication des 1 016 pages du volume 49 du *Bulletin de la Société chimique de France*, en chantier depuis 1922.

Depuis, le caractère exponentiel de la découverte de nouveaux composés organiques a empêché la parfaite concrétisation du rêve de Lavoisier, qui ambitionnait de définir une nomenclature chimique structurée selon des règles méthodologiques et linguistiques cohérentes. Grâce cependant à l'adoption de conventions linguistiques et de formalismes, la nomenclature chimique est à même de donner des définitions toujours plus complexes de la matière.

► BERETTA M., *The Enlightenment of Matter : The Definition of Chemistry from Agricola to Lavoisier*, Canton (Mass.), Science History Publ., 1993. — CROSLAND M., *Historical Studies in the Language of Chemistry*, Londres, Heinemann, 1962. — DAGOGNET F., *Tableaux et langages de la chimie*, Paris, Le Seuil, 1968.

Marco BERETTA
(trad. O. Bonis)

→ Alchimie ; Lavoisier ; Progrès.

NOMINALISME ANTIQUE

Comme le nominalisme moderne le nominalisme antique et médiéval présente plusieurs visages ou configurations qui dépendent du contenu même que l'on associe au terme « nominalisme ». Si par « nominalisme », on entend une doctrine réduisant les universaux à des noms, on peut compter certains philosophes de l'Antiquité parmi les nominalistes, spécialement Alexandre d'Aphrodise, qui, dans ses *Quaestiones*, explique qu'un genre universel n'est qu'un « terme prédisposé de plusieurs » choses, qui « tient son être des choses matérielles et particulières, par abstraction », du fait que la pensée « sépare ce qui est commun et ce qui relève des différences avec lesquelles l'item commun (*to koinon*) est combiné » en chaque cas individuel ou particulier. Plus que comme « nominalisme » cette réduction des genres et des espèces à des termes peut, cependant, être aussi considérée comme une marque de « conceptualisme », dans la mesure où la théorie d'Alexandre vise avant tout à expliquer (avec Aristote, *De anima* I, 1, 402b7) que les universaux sont « postérieurs » aux individus et n'ont d'existence que mentale. C'est avec l'*Isagoge* de Porphyre qu'apparaît le questionnaire d'où sortira, au Moyen Âge, la « querelle des universaux », opposant les nominalistes aux réalistes : déterminer 1) si les genres et les espèces existent ou bien s'ils ne consistent que dans de purs concepts ; 2) ou, à supposer qu'ils existent, s'ils sont des corps ou des incorporels ; et 3) en ce dernier cas, s'ils sont séparés ou bien s'ils existent dans les sensibles et en rapport avec eux. Tel qu'il se présente, ce questionnaire ne fait que poser un ensemble de problèmes auxquels péripatéticiens, stoïciens et platoniciens apportent des réponses divergentes. Porphyre lui-même n'y répondant pas, la véritable source du problème médiéval des universaux doit être cherchée dans les deux *Commentaires* de l'*Isagoge* rédigés au début du VI^e s. par Boèce, traducteur et interprète d'Aristote et de Porphyre.

La théorie boécienne des universaux est une adaptation latine des thèses d'Alexandre. Selon Boèce, les genres et les espèces, qui sont des incorporels, subsistent ou existent « d'une certaine façon », c'est-à-dire dans les sensibles et joints aux sensibles ; mais, par ailleurs, ils sont aussi conçus « d'une autre façon », c'est-à-dire comme existant par eux-mêmes. Cette doctrine est plus conceptualiste que nominaliste, dans la mesure où son axe principal consiste à soutenir, contre les platoniciens, que les universaux ne subsistent pas à part des sensibles, mais qu'ils sont seulement « conçus comme tels ». Il s'agit surtout pour Boèce de montrer que, comme les objets mathématiques, les genres et les espèces sont justiciables de l'opération mentale appelée « abstraction » (*aphaïresis*) par Alexandre (d'après *De an.* III, 7, 431b12-16), laquelle consiste à concevoir comme séparées de la matière des choses qui ne sont pas séparées de la matière. Reprenant à Alexandre l'idée selon laquelle les universaux sont « conçus comme existant par eux-mêmes », alors qu'ils

« n'existent pas par eux-mêmes », mais seulement en tant que particuliers « dans les particuliers », Boèce s'efforce en outre de prouver, cette fois contre les stoïciens, que les concepts universels ne sont pas pour autant des concepts fictifs ou vides. Chez Alexandre, le problème du statut des genres et des espèces touche à la philosophie de la nature, spécialement à la zoologie (dans la mesure où il concerne la question de l'invariance des types) et à la métaphysique (dans la mesure où cette invariance doit être expliquée dans le cadre d'une théorie professant l'éternité des espèces) autant qu'à la logique : « En effet, "succession" et "universel" disent la même chose, puisque la génération des individus suppose l'invariance de l'espèce qui contient ce qui est commun et universel » (Ruland, 1976, p. 92). En revanche, l'essentiel de la contribution boécienne consiste, laissant de côté les questions zoologiques et métaphysiques, à étendre à toutes les sortes de formes dites « matérielles » (i.e. engagées dans une matière) une théorie de l'abstraction initialement formulée dans le contexte des mathématiques ou, plutôt, de la géométrie. Cette généralisation, qui intéresse surtout la logique et la théorie de la connaissance, est rendue possible par le fait que les intelligibles géométriques font partie des intelligibles abstraits en général, mais aussi par le fait que, chez Alexandre, ils fonctionnent la plupart du temps comme exemples des intelligibles abstraits. C'est ce complexe de problèmes, détaché des questions de philosophie naturelle, que Boèce transmet au Moyen Âge, ce qui explique que, durant des décennies, la discussion se concentre sur la logique, la théorie de la connaissance et la philosophie du langage plus que sur le problème de l'invariance des types.

La période médiévale connaît deux grandes variétés de nominalisme : la première, au XII^e s., exploite le vieux fonds boécien ; la seconde, au XIV^e s., est dominée par la profonde réforme de l'aristotélisme engagée par Guillaume d'Ockham et Jean Buridan.

Le mot latin *Nominalistae*, apparemment tardif, semble s'être imposé au XV^e s., probablement, au départ, dans la bouche des adversaires de l'ockhamisme et du buridanisme — deux courants « nominalistes » au sens moderne du terme, qui ont connu leur phase de créativité principale dans les années 1350. Avant l'apparition de *Nominalistae*, c'est un autre vocable — *Nominales*, littéralement : les « nominaux » — que l'on rencontre dans les textes, spécialement au XII^e s., « âge d'or » de ce groupe de logiciens, répartis en diverses écoles. La relation théorique et historique existant entre *Nominalistae* et *Nominales* est, aujourd'hui encore, discutée : certains critiques soutiennent que la continuité instaurée entre les théories des XII^e et XIV^e s. est le produit d'une illusion historique ; d'autres considèrent que, par-delà la diversité des langages et des problématiques, subsiste un noyau théorique dur ou, au moins, une forte parenté de « style philosophique ».

Un texte anonyme, les *Positiones Nominalium*, formule clairement deux thèses fondamentales (« théorèmes ») des *Nominales* du XII^e s. : « Premièrement,

nous nous accordons à penser que les universaux, comme les genres et les espèces, sont des noms ; deuxièmement, nous posons contre l'opinion des *Reales* que rien n'existe en dehors du particulier » (Ebbesen, 1991, p. 431). La première thèse de l'Anonyme peut être regardée comme un principe de base du nominalisme médiéval, toutes époques confondues. Même combinée à la seconde, elle ne suffit pas, cependant, à caractériser complètement l'ontologie des « Nominaux ». Une des affirmations les plus constantes des *Nominales*, non reprise dans les *Positiones Nominalium*, est, en effet, que les genres et les espèces constituent des classes naturelles primitives, auxquelles appartiennent les diverses substances particulières qui possèdent une même structure (i.e. même genre, même espèce, mêmes différences). Un corrélat remarquable de cette thèse « naturaliste » est que le classement d'une substance particulière dans une espèce naturelle ne pose pas de problèmes empiriques, même si, comme le souligne Abélard, chef d'école des « Nominaux », nous ne savons pas toujours exprimer ou analyser ce qu'est exactement la différence qui sépare les membres d'une même espèce des membres d'une autre espèce appartenant au même genre.

La seconde thèse des *Positiones Nominalium* est le principe de base de ce qu'on entend habituellement par « nominalisme » dans le domaine de l'ontologie : l'affirmation que tout ce qui existe est particulier. Chez Abélard, ce principe d'ontologie « particulariste » est appliqué à la fois aux substances et aux « formes », c'est-à-dire aux différences et aux accidents. Ce point est capital pour comprendre les autres thèses ou principes fondamentaux du « nominalisme » abélardien. Une de ses applications notables est, en effet l'affirmation que les substances sont individuelles du seul fait qu'elles sont « personnellement distinctes dans leurs essences propres » — thèse dont dépend, à son tour, l'affirmation que les substances ne sont pas individualisées par leurs accidents. Selon les *Nominales*, rien n'individualise les substances singulières : celles-ci sont d'elles-mêmes et par elles-mêmes individuelles, « personnellement distinctes dans leurs essences ». En ce sens, l'appartenance d'une substance à une espèce naturelle (au sens de l'anglais *natural kind*) est un fait premier et non dérivable. Enfin, les formes sont distinctes les unes des autres en elles-mêmes, ce qui revient à dire qu'elles ne sont pas individualisées par les substances dont elles sont les formes. Cette thèse, jointe à celle de la particularité de toute forme (différence ou accident), suggère un rapprochement entre l'ontologie des *Nominales* et la moderne théorie des « tropes ». Pour Abélard, en effet, tel individu singulier, par exemple Socrate, aurait pu être homme par une autre différence spécifique particulière (la rationalité r^1 ou r^2 ou r^3) que celle (= r^1) qui est la sienne actuellement en tant que « cet » animal doté de raison — autrement dit par la différence spécifique particulière qui est actuellement celle d'un autre individu, par exemple Platon, ou par une différence qui n'existe pas actuellement. Sur ce point, on peut donc assimiler les

Nominales à des non-réalistes professant la « transférabilité des tropes » (Martin, 1992, p. 112).

Si l'on rassemble tous ces facteurs, on voit que le « nominalisme » des *Nominales* présente un certain nombre d'éléments que l'on retrouve, par la suite, distingués ou opposés à l'Âge classique et à l'époque moderne, puisque Abélard et ses élèves professent à la fois une théorie des classes naturelles primitives, un « nominalisme de la ressemblance » et une théorie des « tropes ».

Le nominalisme du XIV^e s. présente certaines analogies avec celui du XIII^e s. : de fait, on y retrouve une ontologie du particulier (ou du singulier) et une tendance marquée au naturalisme. Toutefois, les différences sont nombreuses entre les deux ensembles. La sémantique philosophique de Guillaume d'Ockham n'est pas celle d'Abélard. Ockham rejette la thèse aristotélicienne selon laquelle les mots écrits signifient les mots oraux, qui eux-mêmes signifient les concepts, qui, et eux seuls, signifient les choses. Pour lui, le signe écrit est subordonné au signe vocal, qui, lui-même, quand il est institué, est subordonné à un concept. Bien que subordonnés les uns aux autres, les trois types de signes ont donc une signification identique : les choses singulières.

Cette nouvelle théorie de la signification est complétée par une distinction entre termes absolus et termes connotatifs. Considérés au niveau du langage mental (auquel les deux autres langages, oral et écrit, sont subordonnés) les termes absolus (comme « homme ») sont à la fois des termes et des actes mentaux qui s'appliquent de façon uniforme (« à égalité et à titre premier ») à tous leurs signifiés. Les termes/concepts connotatifs (comme « blanc ») ont, au contraire, deux séries de signifiés : les signifiés premiers, les choses individuelles, auxquels ils s'appliquent et dont ils peuvent tenir lieu dans une phrase, et les signifiés seconds, les qualités singulières (comme les blancheurs), attribuées dénominalement (« paronymiquement », i.e. concrètement) à ces choses.

Professant un réalisme gnoséologique strict, le nominalisme ockhamiste reformule de manière également nouvelle le problème de l'abstraction des concepts spécifiques. Selon Ockham, un concept spécifique (par exemple le concept d'homme) « peut être abstrait à partir d'un unique individu » connu par intuition intellectuelle, ce qui veut dire que le concept mental d'une chose singulière est toujours immédiatement redoublé par une connaissance dite « abstraite » susceptible de s'appliquer à d'autres individus « maximale-ment similaires ». Cette « abstraction » qui concerne moins la généralité que l'existence n'a plus rien à voir avec l'induction abstraite héritée à travers Boèce de la tradition péripatéticienne.

C'est, toutefois, sur un terrain lui-même nouveau, celui de la relation entre « lois naturelles » et « états de chose contingents », que la distinction entre nominalisme ockhamiste et nominalisme antique (abéliardien) est la plus marquée. Ignorant à la fois les *Seconds Analytiques* et le corpus des écrits naturels d'Aristote, les

auteurs du XIII^e s. n'ont posé ni le problème épistémologique général du statut de l'objet de la science ni celui, physique, de la connaissance de la nature et de ses « lois ». Le XIV^e s., au contraire, met les deux problématiques au premier plan.

Concernant l'objet de la science, le nominalisme ockhamiste et post-ockhamiste introduit une distinction entre « objet » et « sujet » d'une science. L'objet (*obiectum*) d'une science est n'importe quelle proposition qui y est démontrée, son sujet (*subiectum*) le sujet de chacune de ces propositions. Une science ayant autant de sujets qu'elle a de « conclusions » : *quot sunt subiecta conclusionum, tot sunt subiecta scientiarum* (*In I Sent.*, *Prol.*, q. 9), la question de l'« objectivité » de la science, comme celle du « réalisme épistémologique », se développe au sein d'une nouvelle approche de la scientificité en général, approche dite « propositionnelle » ou « métalinguistique » par certains historiens (Murdoch). Même si, à partir de la seconde moitié du XIV^e s., tous les nominalistes acceptent, dans l'ensemble, la distinction ockhamiste du sujet et de l'objet de connaissance scientifique, beaucoup s'affrontent sur le contenu précis de la notion d'objet.

Si l'objet de la science n'est pas la chose singulière extramurale contingente désignée par un nom propre, on peut en effet légitimement se demander s'il consiste dans la proposition elle-même ou dans son signifié. Certains auteurs, comme Grégoire de Rimini, choisissent clairement la seconde hypothèse : l'objet de science n'est pas simplement la proposition intervenant comme conclusion d'un syllogisme démonstratif, c'est le « signifié total de cette proposition », exprimé par une expression complexe – une proposition infinitive, telle que *Socratem esse hominem*, notant un fait : le fait-que-Socrate-est-homme, lequel n'est ni Socrate ni l'humanité, ni même l'humanité de Socrate. Pour désigner ces états de choses, qui sont signifiables, mais pas par un nom propre, Grégoire utilise l'expression de *significabile complexe* (« signifiable complexe-ment »). Jusqu'au XV^e s. les partisans et les adversaires du *significabile complexe* – souvent désignés par les historiens comme nominalistes « de droite » et « nominalistes de gauche » se combattent et se réfutent mutuellement. Apparentée à la notion moderne d'« état de chose » (*Sachlage, Sachverhalt*), le « signifiable complexe-ment » est à présent critiqué par Jean Buridan. N'étant « ni des substances ni des accidents, ni subsistant par soi ni inhérents à d'autres choses », les « signifiables de manière complexe » ne sont que des pseudo-entités, auxquelles, en outre, « il n'y a aucune raison de recourir », puisqu'on peut expliquer sans elles tout ce qu'on prétend expliquer par elles. Les « signifiables par un complexe » peuvent donc, au minimum, être éliminés au nom du principe nominaliste de « parcimonie » ou d'« économie » (popularisé sous le titre de « rasoir d'Ockham »). Cette critique, qui évoque la discussion nominaliste moderne des « objectifs » introduits par A. von Meinong, n'est pas isolée. D'autres arguments, encore formulés à la fin du

XV^e s. par Thomas Bricot (mort en 1516), revient même en deçà de la distinction entre sujet et objet : pour Bricot, en effet, la notion d'« objet signifiable par un complexe » est une notion « vide », puisque le « fait » que l'homme est un animal se réduit à l'homme qui est un animal (*hominem esse animal non est nisi homo existens animal*).

Dans le domaine des sciences de la nature, le rôle du nominalisme du XIV^e s., longtemps considéré par les historiens comme décisif, semble devoir être réévalué. De fait si, dans ce domaine, la scolastique tardive paraît prodigieuse en inventions conceptuelles de toutes sortes, il est loin d'être établi qu'elle le doive à un quelconque « programme de recherche » nominaliste. C'est évident pour la physique parisienne dite « de l'impetus », développée par l'école de Buridan. L'ontologie nominaliste n'est pas indispensable pour arriver à la notion de « force motrice imprimée », ni, *a fortiori*, aux deux principes de mesure qui l'accompagnent (i.e. l'intensité de l'impetus imprimé au mobile est fonction de la vitesse initialement impartie au projectile, ainsi que du volume du mobile et de la densité de la substance qui le constitue).

De même, pour la tradition d'Oxford, ce qu'on a appelé les nouveaux « outils conceptuels » du XIV^e s. ne sont pas essentiellement liés au nominalisme ockhamiste : en tant que systèmes conceptuels délimitant des réseaux de relations organisées *logice* ou *sophistic* *loquendo* (i.e. sans référence originaires à un « réel », considéré *naturaliter* ou *physice loquendo*), ils participent plutôt de l'essor de nouveaux « langages analytiques » – *De incipit et desinit, De maximo et minimo, De intensione et remissione formarum, De proportionibus* – élaborés dans les milieux les plus divers, certains ouvertement réalistes, d'autres relevant d'un mouvement indépendant du nominalisme : l'École de Merton College ou « groupe des Calculateurs d'Oxford ». Ces nouveaux langages ont deux caractéristiques principales : ce sont des langages mathématiques ou au moins quantitatifs dont les recouvrements ou les complémentarités sont reconnus et explorés pour eux-mêmes, indépendamment de toute préférence sémantique ou ontologique ; leur terrain d'émergence et leur point d'application institutionnels sont d'ordre pédagogique, sinon ludique, puisqu'ils supposent la pratique universitaire d'un genre particulier de dispute d'« entraînement » entre étudiants (ou étudiants et maîtres) – les *sophismata* –, assez éloigné des intérêts plus théoriques qui prédominent dans les commentaires magistraux de la *Physique* ou du *De caelo*. Si l'on considère l'ensemble des conditions qui ont rendu possible la démarche des « Calculateurs », on constate que le nominalisme comme tel ne joue pas un rôle déterminant, ni même moteur, dans la mise en place des quatre principaux facteurs d'innovation : 1) le changement des conceptions de la « démonstration » et de la « certitude » occasionné par la résorption des « topiques » d'Aristote dans la théorie et la pratique des *consequentiae* ; 2) l'accroissement pratique de ces résultats dans le nouvel espace mental ouvert par

les obligations ou les « disputes obligationnelles » portant sur des contrefactuels ; 3) le développement de nouveaux modèles pour les modalités logiques et physiques (possible, impossible, nécessaire, contingent) sur la base des acquis ou des problèmes de la théologie de *potentia Dei absoluta* ; 4) l'aboutissement de ces convergences dans le « format » théorique des *sophismata*.

La « logification » et la « mathématisation » de la philosophie de la nature, qui culminent chez Guillaume de Heytesbury et les *Calculatores* sont le fruit d'un mouvement plus large que la réforme ockhamiste de l'ontologie et de la sémantique philosophique. Les travaux d'un Gauthier Burley, le réaliste anti-ockhamiste par excellence, ont autant, voire plus d'importance que ceux d'Ockham pour l'essor de l'analyse logique du changement, de ses paradoxes, et des nouvelles réponses qu'ils imposent : le *Tractatus de primo et ultimo instanti* de Burley mène au *Tractatus de instanti* de Pierre de Mantoue, et aux divers traités homonymes des « précurseurs » italiens de Galilée.

Il y a bien, néanmoins, un nominalisme en physique, en tout cas, un réseau de problèmes qui permet de situer Ockham et ses partisans dans le mouvement général des idées caractéristiques de la *scientia naturalis* du XIV^e s. Citons : 1) « Le monde actuel et ses propriétés essentielles sont-ils nécessaires » ? 2) « Qu'est-ce qu'une propriété essentielle, et en quel sens peut-on la construire comme nécessaire » ? 3) Quels sont les « caractères logiques et sémantiques des propriétés essentielles » ? D'une formule : faut-il distinguer les nécessités logiques et les nécessités physiques ? l'analyse des doctrines ockhamistes en termes de « mondes possibles » montre que celui-ci considèrerait les lois de la nature comme nécessaires. Selon certains critiques, en tant que sémantiquement réductible à ce qui est logiquement nécessaire dans ce monde, la caractérisation ockhamiste des nécessités physiques souffre d'une limitation qui l'empêche de faire intervenir « des cas hypothétiques dans l'analyse d'événements actuels ». Tout en défendant « la contingence radicale de l'existence de ce monde », Ockham s'efforce surtout de préserver « la nécessité de sa nature actuelle ». Cela implique donc une certaine prudence à l'égard du « raisonnement imaginaire » (*secundum imaginationem*). Ockham admet la possibilité logique d'autres mondes que le monde actuel, mais cette hypothèse ne le conduit pas, pour autant, à envisager positivement la possibilité d'un mouvement rectiligne indéfiniment continué, donc potentiellement infini. Pareil mouvement est, à ses yeux, un « possible logique » au sens large, c'est-à-dire possible dans d'autres mondes possibles ; mais, dans la mesure où ce possible ne peut s'inscrire que dans un monde – logiquement possible – où toutes choses sont soit toujours en mouvement soit toujours en repos, l'ensemble du propos ne retient pas son attention, car, dans sa perspective, un tel monde « n'entretient aucune relation claire avec notre monde » (A. Goddu). En d'autres

mots, partant d'un corps d'hypothèses susceptible de conduire à l'idée d'un « principe d'inertie », on voit qu'Ockham rejette finalement ledit principe non parce qu'il serait « logiquement impossible », mais parce qu'il est (selon lui) faux, c'est-à-dire « logiquement possible, mais non réel ». Le défaut rédhibitoire de l'ockhamisme, comme d'ailleurs tout aussi bien celui des physiques de l'*impetus* développées par Buridan et les nominalistes parisiens, réside ainsi dans l'incapacité de concevoir véritablement qu'une « hypothèse assertant une condition non réelle puisse être prise comme vraie pour expliquer ou décrire un phénomène réel ».

Même s'il y a d'incontestables apports théoriques des nominalistes du XIV^e s., on peut donc estimer que le meilleur de leur contribution regarde moins l'histoire des sciences de la nature que celle de la logique, de la sémantique et de la métaphysique. Le nominalisme médiéval a accompli une révolution dans les domaines les plus divers : théorie des universaux et de l'abstraction, psychologie philosophique (avec l'élimination de la théorie des « espèces intelligibles » au bénéfice de l'idée de langage mental), sémantique, ontologie. Sa contribution à la philosophie naturelle est plus une refonte de l'aristotélisme qu'une rupture avec l'univers aristotélien.

© Pierre ABÉLARD, *Logica « Ingredientibus »*, éd. B. Geyer, in *Peter Abaelards philosophische Schriften* (BGPm, XXI, 1-3), Münster, Aschendorff, 1919-1927; *Logica « Nostrorum petitioni sociorum »*, éd. B. Geyer, in *Peter Abaelards philosophische Schriften* (BGPm, XXI, 4), Münster, Aschendorff, 1933. — BOËCE, *Opera logica*, in MIGNÉ J.-P., *Patrologia latina*, t. 64; in *Porphirii Isagogen commentarium editio duplex*, éd. G. Schepps & S. Brandt (Corpus Scriptorum Ecclesiasticorum Latinorum, XLVIII), Vienne/Leipzig, 1906. — Jean BURIDAN, *Sophismata*, trad. J. Biard, Paris, Vrin « Sic et Non », 1993. — GREGOIRE DE RIMINI, *Gregorii Ariminensis Lectura in Primum et Secundum librum Sententiarum*, Venise, 1522 (repr. in *Franciscan Studies Publications*, Text Series, vol. VII, Saint Bonaventure/Louvain/Paderborn, 1955); *Lectura in Primum et Secundum librum Sententiarum*, éd. D. Trap (Spätmittelalter und Reformation. Texte und Untersuchungen, 9), Berlin, De Gruyter, 1979. — GUILLAUME DE HEYTESBURY, *Sophismata Asinina. Une introduction aux disputes médiévales*, prés., éd. crit. et analyse F. Pironet, Paris, Vrin « Sic et Non », 1994. — GUILLAUME D'OCKHAM, *Opera philosophica*, 7 vol., 1974 sq.; *Opera theologica*, Saint Bonaventure (NY), Franciscan Institute, 10 vol., 1967 sq.; *Somme de logique, Première partie*, trad. J. Biard, Mauvezin, TER, 1988. — PORPHYRE, *Isagoge*, trad. fr. A. de Libéra & A.-Ph. Segonds, introd. et notes A. de Libéra, Paris, Vrin « Sic et Non », 1998.

▷ COURTENAY W.J., « In Search of Nominalism. Two Centuries of Historical Debate », in MAIERU A. & IMBACH R. éd., *Gli studi di filosofia medievale tra otto e novecento. Contributo a un bilancio storiografico*, Rome, 1991, p. 214-233. — DE RIJK L.M., « John Buridan on Universals », *Revue de Métaphysique et de Morale*, 1992/1, p. 35-59. — ELIE H., *Le Complexe significabile*, Paris, Vrin, 1936. — FUNKENSTEIN A., *Théologie et imagination scientifique. Du Moyen Âge au XIV^e siècle*, trad. J.-P. Rostschild, Paris, PUF, 1995. — GODDU A., *The Physics of William of Ockham* (Studien und Texte zur Geistesgeschichte des Mittelalters, 16), Leyde/Cologne, E.J. Brill, 1984. — GRANT E., *La physique au Moyen Âge. vr-xv siècle*,

trad. P.A. Fabre, Paris, PUF « Bibliothèque d'histoire des sciences », 1995 (avec bibliogr. actualisée). — IWAKUMA Y., « Twelfth-Century Nominalism. The Posthumous School of Peter Abelard », *Vivarium*, 30/1, 1992, p. 97-109. — IWAKUMA Y. & EBBESEN S., « Logico-theological Schools from the Second Half of the Twelfth Century. A List of Sources », *Vivarium*, 30/1, 1992, p. 173-210. — JOLIVET J., *Arts du langage et théologie chez Abélard* (Études de philosophie médiévale, 57), Paris, 1969, 2^e éd., 1982; « Comparaison de théories du langage chez Abélard et chez les nominalistes du XIV^e siècle », in BUYTAERT E.M. éd., *Peter Abelard*, Louvain, 1974, p. 163-178; *Abélard ou la philosophie dans le langage* (Vestigia 14), Fribourg/Paris, Éd. univ. Fribourg/Le Cerf, 1994. — KALUZA Z., « Les étapes d'une controverse. Les nominalistes et les réalistes parisiens de 1339 à 1482 », in LE BOULLUEC A. éd., *La controverse religieuse et ses formes*, Paris, Le Cerf, 1995, p. 297-317. — KNUUTTILA S., *Modalities in Medieval Philosophy* (Topics in Medieval Philosophy), Londres/New York, Routledge, 1993. — LIBERA A. DE, *La querelle des universaux. De Platon à la fin du Moyen Âge* (Des Travaux), Paris, Le Seuil, 1996; *L'art des généralités. Théories anciennes et médiévales de l'abstraction*, Paris, Aubier, 1999. — LONGEWAY J., *William Heytesbury. On Maxima et Minima. Chapter 5 of Rules for Solving Sophismata, with an anonymous fourteenth-century discussion. Translated, with an Introduction and Study* (Synthese Historical Library, 26), Dordrecht, Reidel, 1984. — MCCORD ADAMS M., *William Ockham*, Notre Dame (Indiana), Univ. of Notre Dame Press, 1987. — MICHON C., *Nominalisme. La théorie de la signification d'Occam*, Paris, Vrin « Sic et Non », 1994. — MURDOCH J., « *Subtilitates Anglicanae* in Fourteenth Century Paris: John of Mirecourt and Peter Ceffons », in COSMAN M.P. & CHANDLER B. éd., *Machaut's World. Science and Art in the Fourteenth Century* (Annals of the New York Academy of Sciences, 314), 1978, p. 51-86; « *Scientia medianibus vocibus*. Metalinguistic Analysis in Late Medieval Natural Philosophy », *Sprache und Erkenntnis im Mittelalter. Miscellanea Mediaevalia*, 13/1, 1981, p. 73-106. — NORMORE C., « The Tradition of Mediaeval Nominalism », in WIPPEL J. éd., *Studies in Medieval Philosophy*, Washington, 1987, p. 201-217. — PANACCIO C., *Les mots, les concepts et les choses. La sémantique de Guillaume d'Occam et le nominalisme d'aujourd'hui* (Analytiques, 3), Montréal/Paris, Belarmin/Vrin, 1991; *Le discours intérieur (Des Travaux)*, Paris, Le Seuil, 1999. — STUMP E., « Obligations: from the Beginnings to the Early Fourteenth Century », *The Cambridge History of Later Medieval Philosophy*, Cambridge (G.-B.), 1982, p. 315-334. — SYLLA E., « The Oxford Calculators », *The Cambridge History of Later Medieval Philosophy*, Cambridge (G.-B.), 1982, p. 540-563. — TWEEDALE M., *Abailard on Universals*, Amsterdam, 1976. — VIGNAUX P., « Nominalisme », *Dictionnaire de théologie catholique*, Paris, 1930, col. 717-784; « La problématique du nominalisme médiéval peut-elle éclairer des problèmes philosophiques actuels? », *Revue philosophique de Louvain*, 75, 1977, p. 293-331.

Alain DE LIBERA

→ Conventionalisme; Espèce; Parcimonie.

NOMINALISME MODERNE

Le nominalisme contemporain, comme le nominalisme antique et médiéval, admet plusieurs versions, voire toute une typologie. Au point qu'on peut se demander s'il y a bien un problème ou une position qui puisse se résumer par le terme « nominalisme », sinon la négation

de ce qu'il est convenu d'appeler au XX^e s. « platonisme » (sans que le rapport avec Platon soit entièrement explicite). Le platonisme étant la position selon laquelle il existe des objets abstraits, non spatiaux-temporels, le nominalisme renvoie à l'inverse, comme le disent Quine et Goodman dans leur essai provocateur de 1947, *Steps toward a constructive nominalism*, à un refus des entités abstraites (mathématiques et linguistiques notamment), et à un retour aux objets individuels (empiriques et physiques). Une telle approche conduit à une attention au particulier et au concret, qui caractérise la seconde philosophie de Wittgenstein, et se retrouve dans un certain nombre d'approches épistémologiques plus descriptives, naturalistes, et classificatoires que conceptuelles et abstraites (celle de Hacking, dans le prolongement de Goodman, étant la plus représentative).

Le nominalisme contemporain s'est prioritairement attaqué à trois positions : a) le platonisme mathématique, aussi appelé réalisme, qui considère qu'il y a des objets mathématiques abstraits, tels les nombres (le nominalisme considère à l'inverse qu'il y a des paquets de 3 objets, ou éventuellement leur représentation mentale, mais certainement pas un objet mathématique abstrait qui serait le nombre 3); b) la théorie de la proposition, qui considère qu'il y a une entité abstraite, pas forcément mentale, la proposition, qui est « signifiée » par les différentes phrases (par ex. « La neige est blanche » et « snow is white » signifieraient la même « chose » abstraite); c) la théorie des propriétés, qui considère par exemple que le rouge est une entité abstraite, une propriété, la « rougeur », commune aux objets rouges : il y a des maisons rouges et des couchedes de soleil rouges, qui existent dans le monde physique, mais il y a aussi une propriété abstraite elle-même qui existe indépendamment de ces objets. Quine exprime clairement dans « De ce qui est » l'argument nominaliste contre les propriétés : « Pourquoi y aurait-il quoi que ce soit de commun entre des maisons, des roses et des couchedes de soleil qui sont rouges ? Les mots "maisons", "roses", et "couchede soleil", sont vrais de ces diverses entités individuelles que sont les maisons rouges, les roses rouges et les couchedes de soleil rouges, et le mot "rouge" ou "objet rouge" est vrai de ces diverses entités individuelles que sont les maisons rouges, les roses rouges et les couchedes de soleil rouges; mais il n'y a pas, en plus, d'entité individuelle ou autre, qui soit désignée par le mot "rougeur", pas plus qu'il n'y a d'ailleurs de "maisonnité", de "rosité", ou de "couchede-soleil-ité". »

D'autres objets abstraits ont été envisagés par diverses versions contemporaines du platonisme (les mondes possibles, les phrases par opposition à leur expression située, les objets de fiction) mais le nominalisme épistémologique s'est pour l'essentiel concentré sur ces trois points.

Quine, l'ontologie et la critique du platonisme

Le nominalisme (bon rejeton en cela de la problématique antique et médiévale) est la thèse selon laquelle

seuls les objets concrets — qu'on peut nommer au sens du nom propre — existent. La transformation opérée avec l'invention de la nouvelle logique par Frege et Russell, puis Wittgenstein, a cependant d'emblée modifié la question du nominalisme, reformulant la question de l'ontologie de façon immanente au langage. Comme le remarque Quine, dans « De ce qui est » (*On what there is*, 1948), la question de savoir ce qu'il y a est simple : on peut l'énoncer en trois monosyllabes : « qu'y a-t-il ? ». Et on peut, qui plus est, lui apporter une réponse en un mot : « tout ». Mais « cela laisse la possibilité de désaccords au cas par cas ». Si ce qui est, c'est ce que nous disons exister, la question qui « a continué de se poser depuis des siècles » de savoir ce qui existe, les universaux ou les particuliers, n'a guère de sens. C'est à tirer les conséquences de ce coup de force quinquien (qui trivialise la question du nominalisme) que la philosophie analytique s'est employée dans la seconde moitié du XX^e s.

On peut en effet se demander pourquoi la discussion sur le nominalisme, et son opposé dans la discussion philosophique, le platonisme, a eu une présence aussi massive dans la philosophie des sciences anglosaxonne au XX^e s. C'est que le choix d'une ontologie, même soumis (comme l'a dit Quine) au choix d'un langage, demeure. Le nominalisme se déplace vers un autre questionnement : ce qui existe, c'est ce que notre langage dit exister. De là l'idée que pour le nominaliste la réalité n'existe que parce que nous en parlons et qu'en ce que nous disons. Le nominalisme devient alors, dans les débats contemporains sur l'ontologie et le réalisme, synonyme de relativisme : ainsi Quine, Kuhn et d'autres penseurs sont accusés de mettre le réel sous la dépendance du schème conceptuel et du langage. Par ailleurs, la controverse médiévale sur les universaux a trouvé « un nouveau souffle » (dit Quine) dans la philosophie des mathématiques contemporaine. Les mathématiques classiques sont engagées « jusqu'au cou » dans une ontologie d'entités abstraites. C'est aussi pour cette raison que Quine, nominaliste à ses débuts, a ensuite adopté des positions, sinon platonistes, du moins plus libérales, pour ce qui concerne la philosophie des mathématiques. Par ailleurs, tout en rejetant par sa thèse d'indétermination de la traduction (voir article QUINE) toute possibilité d'établir des universaux linguistiques, et en affirmant sa préférence pour les universels concrets, Quine a du se rendre à l'idée que certains problèmes soulevés par et dans la science elle-même (qui joue un rôle déterminant dans l'ontologie, les objets physiques « middle-sized » étant le paradigme de « ce qui existe ») rendaient trop élevé le prix à payer pour le nominalisme.

Même s'il faut reconnaître le fait que le langage (ordinaire et scientifique) fait usage de concepts, utiliser un terme général n'implique pas une affirmation d'existence : c'est la thèse de Quine dans « De ce qui est ». Le problème est que « dans toute dispute ontologique, le partisan du rejet souffre du désavantage de ne pas être capable d'admettre que son opposant est en

désaccord avec lui ». Celui qui n'admet pas l'existence d'entités abstraites se trouve dans une situation difficile car il en fait constamment usage, parlant bien des chiens (mais il peut revendiquer de parler d'un général concret, pas d'un concept ou d'un attribut) ou des maisons. Quine imagine un philosophe, McX, qui dit : « Il y a des maisons rouges, des roses rouges, des couchers de soleils rouges. Ces maisons, ces roses, et ces couchers de soleil, alors ont quelque chose en commun ; et ce qu'elles ont en commun est tout ce que j'entends par l'attribut de la rougeur. » Ainsi, pour McX, « qu'il y ait des attributs est quelque chose de bien plus évident et trivial que l'évidence et la trivialité du fait qu'il y a ces maisons rouges, ces roses, et ces couchers de soleil ». Pourquoi cette évidence ? Parce que l'ontologie est effectivement triviale : elle est un élément de notre langage, « du schème conceptuel par lequel il interprète toutes les expériences ». Ce que nous disons exister est immanent à notre langage. Les énoncés ontologiques s'ensuivent immédiatement de tous nos énoncés informels sur des faits ordinaires. Cela permet de donner une existence aux entités abstraites affirmées par McX, mais dans le cadre d'un autre schème conceptuel, « cet énoncé ontologique peut être considéré comme faux avec la même immédiateté et la même évidence ».

Pour Quine, nous pouvons faire usage de façon significative de termes singuliers, sans présupposer qu'il y a des entités que ces termes entendent désigner. S'est-on pour autant débarrassé des universaux ? Quine, dans « De ce qui est » comme plus tard dans « Relativité de l'ontologie », déconstruit la question ontologique : rien ne nous engage « à l'assomption d'universaux, ou d'autres entités que nous pourrions trouver indésirables », sauf l'engagement ontologique (si je dis qu'il y a quelque chose (variable liée) que les maisons rouges et les couchers de soleil ont en commun ; ou quelque chose qui est un nombre premier plus grand qu'un million). Il ne suffit pas de nommer pour dire qu'il y a. C'est la limite du nominalisme : « Les noms, en fait, n'ont qu'un rapport tout à fait évanescant à la question ontologique. »

Quine rejette moins le platonisme qu'il ne rend la question de l'existence des objets abstraits immanente à l'engagement ontologique : nous pouvons dire que des chiens sont blancs sans pour autant nous engager à reconnaître soit la caninité, soit la blancheur comme des entités. Mais pour la même raison, le nominalisme n'a pas besoin d'être soutenu jusqu'au bout : quand « nous disons que certaines espèces zoologiques peuvent se croiser, nous nous engageons à reconnaître comme entités les espèces elles-mêmes, bien qu'il s'agisse d'êtres abstraits ». Platonisme et réalisme ont en commun d'être des doctrines métaphysiques, donc mal formulées : il n'y a pas de sens à affirmer, comme à nier, l'existence d'objets abstraits de façon absolue.

On peut alors résoudre le problème posé par les mathématiques : « nous avons une norme explicite pour décider dans quelle ontologie s'engage une théorie ou une forme de discours donnée ». Quine peut

alors ramener les clivages entre les points de vue contemporains sur les fondements des mathématiques à « des désaccords sur le domaine des entités auquel les variables liées permettent de faire référence », et donc relativiser encore le nominalisme, qui correspondrait dans la doctrine contemporaine au formalisme. (On a une correspondance selon Quine, entre réalisme, conceptualisme, nominalisme et logicisme, intuitionisme, formalisme.) Le formalisme de Hilbert récuse « le recours débridé des logicistes aux universaux », mais refuse qu'on se débarrasse des mathématiques classiques. Il les conserve en en faisant « un jeu de notations insignifiantes », et un ensemble de règles pour le maniement des notations.

Là encore, la question de l'ontologie devient pragmatique ; nous acceptons une ontologie comme une théorie scientifique, en adoptant « le schème conceptuel le plus simple dans lequel on puisse faire entrer et arranger les fragments désordonnés de l'expérience ». La véritable objection au nominalisme comme au conceptualisme serait alors que l'adoption d'une ontologie, comme celle de tout système scientifique, est affaire de langage. Du coup le problème ontologique, chassé par la fenêtre, revient par la porte : on a notamment accusé Quine de relativisme par son idée de schème conceptuel (voir Davidson), en lui attribuant l'idée que la réalité devenait, dans son approche, dépendante du langage ce qui est dépend de ce que nous disons, et il n'y a pas d'existence indépendante des objets. Quine s'est défendu de cette accusation en affirmant un « réalisme robuste » : même à l'intérieur de notre schème conceptuel et de notre ontologie immanente, nous prenons la vérité au sérieux.

De Carnap à Goodman

Une question demeure : d'où viennent même les termes que nous appliquons à l'expérience ? Quine sur cette question, comme sur beaucoup, hérite d'une problématique carnapienne et notamment de difficultés suscitées par l'*Aufbau* et sa définition des termes généraux à partir de la ressemblance. La problématique est épistémologique : comment parvenons-nous à des concepts à partir de l'expérience ? Quine critique Wittgenstein en lui attribuant (à tort) l'idée que l'apprentissage par définition ostensive (celui de termes généraux comme les termes de couleur) est tributaire de l'apprentissage préalable de certaines abstractions, à savoir chacun des aspects eu égard auxquels il peut y avoir ressemblance et donc ostension. La généralisation la plus élémentaire présupposerait déjà une généralisation par abstraction, ce qui nous installerait dans un cercle. Quine note dans *Espèces naturelles* :

Supposez par exemple qu'un enfant a appris d'une balle jaune et d'un bloc de jaune qu'ils comptent pour jaunes, et d'une balle rouge et d'un bloc rouge qu'ils comptent pour rouges, et qu'il a maintenant à se décider au sujet d'un vêtement jaune. Vraisemblablement il trouvera que le vêtement ressemble plus à la balle jaune et au bloc jaune qu'à la balle rouge et au bloc rouge ; et il n'aura pas eu besoin d'avoir

d'abord suivi une formation en couleurs et en aspects/Carnap a entrepris il y a bien longtemps de montrer comme certains aspects comme la couleur, pouvaient être dérivés d'une notion générale de ressemblance au moyen d'une construction ingénieuse.

Quine mentionne « la difficulté de la communauté imparfaite de Goodman » (cf. Narboux, 2001). Goodman, dans le paradoxe de l'induction qu'il développe dans *Fact, Fiction, and Forecast*, et qui est discuté par Hacking dans « Uses of *grue* » met en cause l'idée d'une constitution des termes généraux qui se ferait sans abstraction, par pure constitution à partir de l'expérience et de l'apprentissage. On peut lire dans la « new riddle of induction » de Goodman une critique des postulats anthropologiques sous-jacents à l'empirisme quinién, et notamment de son idée d'un espace des qualités interne, ainsi que de son idée d'une pure classification opérée naturellement par l'enfant. Bref le nominalisme doit se fonder sur une épistémologie de la ressemblance et de l'apprentissage, elle-même sujette aux mêmes difficultés que l'abstraction. L'énigme de Goodman radicalise la critique des objets abstraits opérée par Quine et en montre les limites : il définit ainsi un prédicat *grue* (vreu) : on suppose que des objets passés sont « *grue* » (vreus) si et seulement si ils étaient (alors) *green* (verts) tandis que des objets présents sont « *grue* » (« vreus ») si et seulement si ils sont (maintenant) *blue* (bleus). Les couleurs ne sont alors pas moins artificielles pour Goodman que les espèces naturelles aux yeux de Quine. Le recours au concept de ressemblance n'est pas moins suspect pour rendre compte des qualités que pour rendre compte de la signification, des espèces ou de l'induction. Pour Goodman, Quine réintroduit par son empirisme ces universaux qu'il s'était pourtant d'abord agi, pour lui comme pour Goodman, de congédier. La position de Quine rejoint paradoxalement celle de Carnap.

Ce qui est en jeu ici, au sein de l'empirisme de Quine, c'est le statut de l'échantillon ou du paradigme. Dès lors qu'on renonce à l'abstraction, comment résoudre la question de la construction ou de l'apprentissage d'un concept ? Le problème des universaux devient alors le problème des exemples : il ne s'agit pas tant de savoir s'il y a des universaux et comment on y accède, que de demander, dès lors qu'on renonce à l'idée de l'occurrence (et de la reconnaissance) d'un même universel, quel est le statut des exemples ou des instances, comment on y accède ou les reconnaît. C'est le point que développe Cavell dans *Les Voix de la raison* à propos de l'application d'un mot :

La saisie d'un universel ne peut remplir la fonction qu'on imagine pour lui, puisque toute nouvelle application d'un mot ou d'un concept devra encore être établie, expliquée, à l'intérieur du nouveau cas... de sorte qu'aucun universel, aucune définition ne saurait être dits représenter ma connaissance (p. 285).

L'énigme de Goodman, loin d'opérer un déplacement du problème de l'induction, a partie liée avec un déplacement du problème de la ressemblance et des

universaux : de la ressemblance, on est passé à l'aspect au sens du nouveau trait (*feature*) remarqué, saillant, projectible : « Il est significatif que nous n'ayons pas de mot pour *grue* ; ce n'est pas un trait que nous remarquons » (p. 88). Dans cette perspective, « le nouveau problème soulevé est celui de l'implémentation des traits "que nous avons une tendance innée à remarquer et donc à projeter" en termes de sélection naturelle ». On revient alors à une sorte de solution humienne à l'énigme de l'induction, et à une réponse naturaliste à la question des universaux. Le problème posé par le nominalisme demeure cependant : comment nous parvenons aux généralités alors que toutes les choses qui existent sont singulières.

À travers l'héritage de Carnap et de Goodman, on retrouve la question du nominalisme dans des débats récurrents de l'ontologie contemporaine, notamment sur l'existence des propriétés considérées comme des universaux ou comme des faisceaux de particuliers abstraits : ce que la scolastique nomme les « accidents singuliers ». Il y a un avant-goût de cette querelle dans l'*Aufbau*, où Carnap tente dans le cadre du programme empiriste d'atténuer la portée de la distinction entre le particulier et le général. Le problème des universaux n'est donc en rien résolu par l'empirisme, il est au contraire redoublé. On pourrait rapprocher l'argumentation de Carnap de la typologie proposée par D. M. Armstrong (1978) en vue de la réfutation métaphysique du nominalisme.

Nominalisme linguistique et critique des propositions

Une autre forme de nominalisme, plus strictement linguistique, porte sur les propositions. L'argument est proposé par Quine contre ses maîtres Frege, Russell et Carnap, et se trouve clairement formulé avec sa célèbre thèse d'indétermination de la traduction (1960) : on ne peut individuer la proposition en tant qu'entité idéale, commune à différentes phrases ou énoncés qui exprimeraient la même « pensée ». Par ailleurs, d'un point de vue empiriste, la détermination de la signification dépasse largement les données que nous avons à notre disposition. L'argument ontologique est parfois employé chez Quine contre la notion de proposition, dans *Word and Object*, au début de *Philosophy of Logic* et dans l'article « Russell's Ontological Development ». Quine précise que sa perspective n'est pas seulement antimentaliste, et revendique « un souci de tolérance envers le statut des entités mentales ». En effet « l'objection première du naturaliste contre cette conception n'est pas une objection aux significations en tant qu'entités mentales ». C'est réellement en termes nominalistes que Quine critique l'idée d'une détermination possible d'un sens commun à plusieurs énoncés. Dans sa conférence « Le mythe de la signification », il affirme : « Il n'entre pas dans mon intention de démontrer que le langage ne présente aucune signification. Que les mots et les phrases dont on se sert, au sens courant d'"avoir un sens", aient un sens, je n'en disconviens pas » (*La philosophie analytique*,

p. 139). Il faudrait considérer le verbe « *mean* » comme intransitif : les énoncés veulent dire, signifient tout court, pas besoin de dire qu'ils signifient *quelque chose*. Dans « *Use and its place in meaning* » Quine propose : « une expression signifie ; *signifier* (*meaning*), c'est ce qu'elle fait ». Inutile de rechercher ou poser *quelque chose* qui serait signifié par l'énoncé. Pourtant, dans *Word and Object*, Quine admet avoir mis de l'eau dans son vin nominaliste, et admettre l'utilité du recours aux « classes » ou aux « attributs ». Tout cela est le résultat de la redéfinition du problème ontologique, cf. *Du point de vue logique*, ch. VI : « Ce qui est à prendre en considération, ce n'est pas l'état de choses ontologique, mais les engagements ontologiques d'un discours. Ce qui existe ne dépend pas en général de l'usage qu'on fait du langage, mais ce qu'on dit exister en dépend. »

L'objection aux significations ou aux propositions est une question de *détermination*, et pas seulement d'ontologie : on pourrait en effet poser des objets qui soient signifiés en commun par les énoncés qui « signifient de même ». « Une fois que nous comprenons en quoi consiste, pour des expressions, signifier de même, il est facile et commode d'invoquer de manière arbitraire des objets spéciaux (...) Si nous y parvenons, nous pouvons alors dire sans problème que des expressions qui signifient de même ont la même signification » (*Theories and Things*, p. 45). On pourrait donc, dans un esprit de tolérance ontologique, poser des significations pour des raisons d'efficacité théorique. Le rôle comme la tactique d'invention des significations rappellent naturellement l'admission des nombres ou des classes. Quine renvoie à Frege : « La raison d'admettre les nombres en tant qu'objets est précisément leur efficacité dans l'organisation et la simplification des sciences. La raison d'admettre les classes est la même » (*W.O.*, p. 237). Tout dépend, en définitive, de « la qualité du mythe ».

Est-il nécessaire et utile de poser des entités déterminées qui seraient les significations ou les propositions ? Ainsi se résume le questionnement de Quine sur les propositions. La thèse d'indétermination de la traduction est une réponse à cette question. « Ce contre quoi je m'insurge tout particulièrement, c'est l'idée d'une identité ou d'une communauté de sens sous le signe, ou d'une théorie de la signification qui en ferait une sorte d'abstraction supralinguistique, dont les formes du langage seraient le pendant, ou l'expression. » Le problème devient alors la définition de la relation synonymie ; si elle est impossible à établir, impossible d'en abstraire la notion de signification « Ce pas franchi, c'est le renoncement à la notion de signification comme entité. » C'est donc l'impossibilité d'établir une synonymie, que ce soit dans la traduction ou à l'intérieur d'une même langue (puisqu'il y a pour Quine, la traduction radicale commence *at home*) qui est à la base de la formulation du nominalisme. « Des lecteurs ont supposé que mon reproche est d'ordre ontologique ; ce n'est pas le cas. Si de manière générale cela pouvait avoir un sens, pour moi, de déclarer deux

expressions synonymes, je serais fort heureux de reconnaître un objet abstrait comme étant leur signification commune. La méthode est connue : je définirais la signification d'une expression comme l'ensemble de ses synonymes. Le problème réside plutôt dans le prédicat de synonymie. »

La thèse d'indétermination peut alors s'énoncer à la limite de la trivialité. Elle signifie, en fait, qu'on traduit toujours dans sa propre langue. Et l'illusion – le mythe – est de prendre la traduction comme un exercice qui nous fait sortir de notre langue, des jeux de langage de notre langue ordinaire. La traduction, en un sens, ne nous fait rien découvrir sur la langue étrangère. Elle reste « *at home* ». « La méthode des hypothèses analytiques », écrit Quine, « consiste à se catapulte dans le langage étranger avec la force acquise de la langue d'origine » (1960, p. 70).

La traduction se résume pour Quine par le mot « *ex pede Herculem* ». « En projetant Hercule à partir du pied, il y a risque d'erreur, mais nous pouvons nous reconforter avec le fait qu'il y a quelque chose sur quoi avoir tort. Dans le cas du lexique, sans définition de la synonymie, nous n'avons pas d'énoncé du problème ; nous n'avons rien sur quoi le lexicographe puisse avoir tort ou raison » (1980, p. 63). Il n'y a pas de « *fact of the matter* ». Cette idée est au centre de la thèse d'indétermination, et résume le nominalisme empiriste de Quine.

Questions de mots

Popper revendique de son côté, contre le nominalisme « essentialiste » un nominalisme méthodologique. Le problème des universaux, dans la version popperienne, n'est en effet pas un problème ontologique, mais un problème de méthode. Le nominalisme méthodologique s'oppose à la conception « aristotélicienne » selon laquelle « la recherche scientifique doit pénétrer jusqu'à l'essence des choses pour les expliquer ». Les essentialistes sont enclins à formuler les questions scientifiques dans des termes ontologiques et croient qu'une réponse à ce genre de questions, révélant la signification réelle ou essentielle de ces termes et, par là, la nature réelle ou véritable des essences qu'ils dénotent est un prérequis de la recherche scientifique. Les nominalistes méthodologiques, par opposition aux essentialistes qui veulent connaître la nature des choses (« qu'est-ce que la matière ? » « qu'est-ce que la force ? »), formuleraient leurs problèmes dans des termes tels que : « comment se comporte ce fragment de matière ? ». Ils soutiennent que la tâche de la science est de décrire la manière dont les choses se comportent, en introduisant des termes nouveaux partout où c'est nécessaire, ou en redéfinissant des termes anciens partout où il est opportun de le faire. Car ils regardent les mots simplement comme des *instruments de description utiles* (*Misère de l'historicisme*, p. 37-38). Popper préfère le terme « essentialisme » au terme « réalisme », parce que son nominalisme méthodologique est curieusement compatible avec une forme de platonisme : la croyance

à la réalité et à l'autonomie de ce qu'il appelle « le monde 3 », le monde des idées et des théories, qui pour lui n'a rien de linguistique. La solution que Popper donne au problème de l'origine et de la nature des universaux de type biologique et évolutionniste :

Le problème des universaux est traité même aujourd'hui comme si c'était un problème de mots ou d'usages du langage ; ou de similitudes dans des situations, la question étant de savoir comment elles sont reproduites par des similitudes dans notre symbolisme linguistique. Il me semblait pourtant tout à fait évident qu'il était beaucoup plus général ; qu'il était fondamentalement un problème ayant trait à une similitude de réaction à des situations biologiquement similaires (*La quête inachevée*, p. 24).

Contre Carnap et Goodman, Popper substitue le problème de l'adaptation biologique à des régularités au problème de la similarité. Il paraît cependant difficile de concilier cet évolutionnisme avec le platonisme du monde 3.

Relativisme et nominalisme

Par ailleurs, la thèse d'indétermination de Quine, qui ressemble pour Popper et Davidson à un argument relativiste, peut être utilisée dans une perspective inverse, et pousser à l'affirmation d'un universel par défaut. En l'absence de *fact of the matter*, mieux vaut traduire la pensée indigène de manière « parochiale ». Le risque serait alors d'effacer tout contraste entre la langue étrangère et notre langue. Au départ, la thèse de Quine visait les thèses issues du relativisme linguistique sur les différences de *Weltanschauung*, produit par les différences linguistiques (idée que l'on trouvait chez E. Sapir et B. L. Whorf). Pour Quine, il n'y a pas plus de sens à affirmer une similarité qu'une différence entre l'esprit indigène et le nôtre à partir de différences de langage. C'est cela qui suscite les remarques d'allure nominaliste-relativiste de « Deux dogmes » :

Étant empiriste, je continue à concevoir, en dernière instance, le schéma conceptuel de la science comme un instrument destiné à prédire l'expérience future à partir de l'expérience passée. Conceptuellement, les objets physiques sont des intermédiaires commodes, que nous imposons avec nous – non qu'ils soient définis en termes d'expérience, simplement ce sont des entités irréductibles que nous postulons, comparables, du point de vue épistémologique, aux dieux d'Homère.

La question du nominalisme est alors celle de la réalité des entités postulées par la théorie pour rendre compte de l'expérience, et de l'irréductibilité de ces entités artificielles – *posits* – à l'expérience. Elle résume notre héritage empiriste, dont Quine, jusque dans sa critique de Carnap, ne s'est jamais séparé. Dans un nouveau cadre conceptuel et linguistique, les objets ne sont pas les mêmes, et les faits eux-mêmes changent de signification. Ce point quinquien sera repris chez Kuhn, contre Popper : les faits, les significations des termes, et donc – là est le passage au nominalisme – le monde vu dans une nouvelle théorie et décrit dans de nouveaux termes est un monde différent. Kuhn examine le

changement d'aspect inhérent à l'adoption d'un nouveau paradigme (qu'il nomme *Gestaltswitch* – cf. les analyses wittgensteiniennes du canard/lapin), et affirme ainsi dans la *Structure* des révolutions scientifiques :

Les partisans de Copernic n'apprenaient pas seulement ce que signifie le terme « planète ». Ils modifiaient en fait la signification du mot planète afin qu'il puisse continuer à établir des distinctions utiles dans un monde où tous les corps célestes s'apercevaient sous un aspect différent (...) les paradigmes déterminent de grands domaines de l'expérience (p. 156).

C'est ce point qu'a exploité Feyerabend, et qu'a développé Kuhn à propos de l'histoire de la chimie : une fois le paradigme chimique de Dalton admis, « même le pourcentage de composition des composés bien connus se trouva différent. Les données elles-mêmes avaient changé » (p. 163). Une telle dépendance de l'expérience, et de la réalité même, par rapport au langage, peut avoir un air relativiste.

On ne peut cependant réduire le paradigme à une structure théorique : Kuhn le présentera dans ses derniers textes comme un ensemble linguistique. La fortune du terme « paradigme » a été telle qu'il a entraîné sa banalisation : alors que le terme de paradigme peut être utilisé dans son sens platonicien premier, celui d'un exemple (*exemplar*) qui sert de modèle, et qu'on applique à des situations qu'on reconnaît comme similaires. On retrouve encore une fois le problème de Carnap et de Goodman. La notion de paradigme implique une notion de ressemblance qui, comme chez Wittgenstein, n'est pas un élément commun déjà présent dans les choses elles-mêmes, ou à abstraire des particuliers : le paradigme apprend à voir des cas et situations comme semblables à d'autres.

Bien que ce soit le sens de « *paradigme* » comme *exemple canonique* qui m'ait originalement conduit au choix de ce terme, malheureusement, la plupart des lecteurs de *La Structure* ont manqué ce qui était sa fonction centrale (« *Second Thoughts on Paradigms* », p. 298).

Ce sens premier du « paradigme » permet de repenser le concept d'incommensurabilité et de dédramatiser le relativisme qu'on associe communément au nominalisme. Ce dernier n'est simplement qu'il y ait un langage d'arrière plan (et une ontologie) qui permette de comparer deux langages différents :

Étant donné que les mots sur lesquels se cristallisent les difficultés ont été appris en partie par l'application directe à des exemples, les interlocuteurs qui ne se comprennent plus ne peuvent pas dire « j'utilise le mot *élément* (ou *mélange*, ou *planète* ou *mouvement libre*) d'une manière qui est déterminée par les critères suivants » (p. 273).

Le recours à l'anthropologie permet aussi de désamorcer la critique davidsonienne du « schéma conceptuel » et du paradigme. Kuhn répond à une objection de Popper, qui critiquait le « dogme suivant lequel les différents cadres de pensée sont comme des langages intraduisibles mutuellement ». Pour Kuhn et Feyerabend, qui ainsi représenteraient un nominalisme d'un nouveau type, non ontologique, nous pouvons

examiner les paradigmes passés à partir du nôtre. C'est tout le travail de l'historien des sciences. « Apprendre à traduire un langage, c'est aussi apprendre à décrire le monde avec lequel le langage et la théorie fonctionnent », « acquérir la connaissance de la nature qui est inscrite dans le langage ». Cette conception quasi nominaliste de l'incommensurabilité n'a plus rien d'un relativisme : elle reconnaît à la philosophie des sciences une tâche nouvelle, *descriptive*. Kuhn parle ainsi de « mondes différents », ce qui suggère pour ses critiques une dépendance du monde par rapport au langage. Mais, note Hacking dans *Working in a new world* (in Horwich, p. 276), Kuhn parle de « travailler dans un monde différent » : jamais d'une ontologie de mondes différents. On peut travailler dans un monde différent, avec des espèces différentes, en sachant aussi (parce qu'on sait) qu'il n'y a qu'un monde réel, que notre langage a à décrire.

► ARMSTRONG D. M., *A Theory of Universals*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1978. – Cahiers de Royaumont, *La philosophie analytique*, Paris, Minuit, 1962. – CARNAP, *Der Logische Aufbau der Welt*, 1928, trad. fr. *La construction logique du monde*, Paris, Vrin, 2003 ; « Le dépassement de la métaphysique par l'analyse logique du langage », trad. fr. in *Manifeste du Cercle de Vienne*, éd. A. Soulez, Paris, PUF, 1985. – CAVELL S., *The Claim of Reason*, Oxford Univ. Press, 1979, trad. fr. *Les Voix de la raison*, Paris, Le Seuil, 1996. – DAVIDSON D., *Inquiries into truth and interpretation*, Oxford, Clarendon Press, 1984, trad. fr. P. Engel, *Enquêtes sur la vérité et l'interprétation*, Nîmes, Éd. J. Chambon, 1993. – DECOCK L. (éd.), *Quine. Naturalized epistemology. Perceptual Knowledge, and Ontology*, Amsterdam, Rodopi, 2000. – GOODMAN N., *Fact, Fiction, and Forecast*, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., 1967. – GOODMAN N. & QUINE W. V., « Steps toward a constructive nominalism », *Journal of Philosophy*, 1947. – HACKING I., *Representing and intervening : introductory topics in the philosophy of natural science*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1983, trad. fr. B. Ducrest, *Concevoir et expérimenter*, Paris, C. Bourgois, 1989 ; *Scientific Revolutions*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1981 ; « Uses of Grue », trad. fr. in *Le plus pur nominalisme – l'énigme de Goodman*, Paris, L'Éclat, 1993. – HORWICH P., *World Changes : Thomas Kuhn and the Nature of Science*, éd. Paul Horwich, Cambridge (MA)/MIT Press, 1993. – KUHN T., *The structure of scientific revolutions*, Univ. of Chicago Press, 1962, 1970, trad. fr. *La Structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1972 ; *The Road Since Structure. Philosophical Essays, 1970-1993, with an Autobiographical Interview*, éd. J. Conant, J. Haugeland, Chicago & Londres, Univ. of Chicago Press, 2000. – LAUGIER S., *L'anthropologie logique de Quine*, Paris, Vrin, 1992 ; (éd.), *Wittgenstein, métaphysique et jeux de langage*, Paris, PUF, 2001 a ; (éd.), *Carnap et la construction logique du monde*, Paris, Vrin, 2001 b ; « Le naturalisme de Quine » « Wittgenstein et la science », in P. Wagner (éd.), *Les philosophes et la science*, Paris, Gallimard, 2003. – NARBONNE J.-Ph., « Ressemblances de familles, caractères, critères », in Laugier 2001 a ; « Incommensurabilité et exemplarité », dans *Wittgenstein : dernières pensées*, éd. J. Bouveresse, S. Laugier, J.-J. Rosat, Agone, 2002. – POPPER K., *Objective Knowledge, an evolutionary approach*, Oxford, Clarendon Press, 1972, trad. fr. *La connaissance objective*, Paris, Flammarion, 1993 ; *La quête inachevée. Autobiographie intellectuelle [1974]*, trad. fr. Presses Pocket, 1981 ; *Misère de l'historicisme*, 1944, trad. fr. Presses Pocket Agora, 1956/1988. – QUINE W. V., *Word and Object*, MIT Press,

Cambridge, Mass., 1960, trad. fr. J. Dopp et P. Gochet, Paris, Flammarion, 1977 ; avec ULLIAN J. S., *The Web of Belief*, New York, Random House, 1970 ; *Philosophy of logic*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1970, trad. fr. J. Largeault, *Philosophie de la logique*, Paris, Aubier, 1975 ; *From a logical point of view*, Cambridge, Harvard Univ. Press, 1953, 1980, trad. fr. *Du point de vue logique*, Paris, Vrin, 2003 ; « On the reasons for indeterminacy of translation », *Journal of Philosophy*, 67, 1970, p. 178-183. – WHORF B. L., *Language, thought and reality*, 1956, trad. fr. *Linguistique et anthropologie*, Paris, Denoël, 1969. – WITTGENSTEIN L., *Tractatus logico-philosophicus*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1922, trad. fr. G.-G. Granger, Paris, Gallimard, 1993 ; *Philosophische Untersuchungen/Philosophical Investigations*, éd. G. E. M. Anscombe, Oxford, Blackwell, 1953, trad. fr. *Recherches Philosophiques*, Paris, Gallimard, 2004. – ZALTA E., *Abstract Objects*, D. Reidel, Dordrecht, 1983.

Sandra LAUGIER

→ Carnap ; Conventionnalisme ; Frege ; Logique et informatique ; Popper ; Quine ; Wittgenstein.

OBJECTIVITÉ

L'objectivisme et le subjectivisme comme métaphysiques

Si la question de l'objectivité est peut-être la question centrale de l'épistémologie envisagée comme méthodologie de la connaissance scientifique, son traitement doit être différencié pour permettre que deux questions préalables soient discutées. La première est d'ordre ontologique, la seconde d'ordre gnoséologique (*epistemological* au sens anglais du terme). En effet, avant de se demander comment les scientifiques peuvent et doivent s'y prendre pour ajuster leurs vues sur divers sujets qui les concernent en propre (expériences, modélisations, explications), il convient de se demander, d'une part, quels objets il y a dans le monde – ou quel est « l'ameublement de l'univers » (Mario Bunge) –, comment ces objets sont constitués et, en particulier, quelle ontologie les sciences physiques se donnent. D'autre part, il faut se demander comment ces objets naturels se donnent à nous, sujets épistémiques, pour que nous nous les représentions, pour que nous concevions des idées à leur sujet, voire pour que nous accumulions à leur propos des croyances vraies et/ou rationnellement justifiables. Certes, de manière générale, poser la question de l'objectivité, c'est poser la question de l'objet de la connaissance possible. Et cette question même suppose à son tour que l'on puisse préciser d'entrée de jeu, face au domaine des objets de la connaissance possible, la sphère de la subjectivité. Car même soutenir que la connaissance scientifique est objective au sens où le sujet connaissant n'y tient aucune place, thèse chère à Popper, exige de délimiter la sphère de la subjectivité pour mieux l'exclure de ce que Popper appelle le Monde 3, à savoir le monde des constructions objectives de l'esprit.

Si l'on s'en remet au sens courant du mot, peut-être dit « objectif » tout ce qui existe indépendamment de

toute connaissance ou idée. Peut également être dit objectif ce qui est valable pour tous les esprits, et non seulement pour tel ou tel individu. On caractérise ensuite d'objectif ce qui est indépendant de la volonté. Mais ultimement, on dit qu'est objectif l'esprit de celui qui voit les choses telles qu'elles sont, sans se laisser influencer par ses préférences ou habitudes. Or, on peut définir l'objectivité de la science à partir de chacune des quatre caractérisations précédentes. Dans quelle mesure l'objet même d'une science est-il déjà une construction de l'esprit, des sens, ou des instruments scientifiques eux-mêmes ? À partir de l'histoire des sciences et considérant les avatars de chacune des disciplines, comment qualifier d'objectifs des résultats que nous tenons aujourd'hui pour certains, mais qui se révéleront peut-être faux demain ? Comment garantir que la volonté même des chercheurs, ou leurs préférences intimes, n'influent pas sur les résultats qu'ils obtiennent ? Toutes ces questions ont leur importance et c'est à fournir un cadre pour y trouver une réponse que, au moins depuis Descartes et Kant, la philosophie de la connaissance s'est employée. *A contrario*, par « subjectif », on entend couramment ce qui est individuel, c'est-à-dire valable pour un seul sujet épistémologique. On traitera de subjectif ce que l'on voudra caractériser d'apparent ou d'illusoire. Ainsi, des sensations dépendant uniquement des modifications internes des organes des sens, et non de stimuli extérieurs seront dites subjectives (hallucinations visuelles, auditives, etc.). Enfin, on considérera également comme subjectif ce qui appartient seulement à la pensée ou à la perception humaine, par opposition au monde physique, ou encore aux choses en soi : l'empirisme classique assume une thèse analogue en déclassant les qualités secondaires (les sons, les goûts, les couleurs, les odeurs) au profit des qualités primaires (l'extension, la solidité, la figure ou la forme, le mouvement et la quantité), qu'il croit plus apte à fonder la connaissance scientifique. Objectivité et subjectivité sont donc conçues comme des sphères opposées et exclusives de l'expérience, et il n'est pas étonnant que, se fondant sur l'une pour s'opposer à l'autre, se soient édifiées deux métaphysiques antagonistes.

De façon générale, le subjectivisme soutient que, soit relativement (pour le sujet), soit absolument (en soi), il n'y a de réalité que subjective, tandis que l'objectivisme considère comme existant en dehors du sujet pensant ces choses dont les subjectivistes font un état du sujet. Par exemple, une théorie de la connaissance subjectiviste affirmera que le sujet ne connaît les choses que telles qu'elles sont pour lui, ou même ne connaît que ses propres sensations ou représentations ; une gnoséologie objectiviste avancera au contraire que l'être humain peut appréhender des données objectives, contrôlables de manière intersubjective, et les différencier de données strictement subjectives, issues de l'expérience vécue, du rêve ou de l'imagination. De même, en esthétique, le subjectivisme tend à faire dépendre tous les jugements de valeur des impressions personnelles, alors que l'objectivisme soutiendra qu'il

est possible de porter des jugements objectifs, ou à tout le moins justifiés et intersubjectivement partagés, sur la qualité intrinsèque des œuvres. Enfin, en méta-éthique, le subjectivisme avance que les attitudes ou comportements moraux sont uniquement affaire de préférences et que rien ne peut les justifier. Bien sûr, le subjectiviste admettra que les gens issus d'une certaine culture peuvent manifester les mêmes goûts ou préférences. Il admettra même qu'on peut voir certains avantages à l'adoption de telle attitude ou de tel comportement moral, mais il continuera de penser que rien de tout ceci ne saurait prouver à quelqu'un qui aurait éventuellement des goûts, des préférences, des attitudes ou des comportements différents qu'il a nécessairement tort. À l'opposé, l'objectivisme considère que certaines vérités morales sont totalement indépendantes de ce que les gens pensent ou désirent. Par exemple, un énoncé comme « Aucune personne ne doit en faire souffrir une autre pour le simple plaisir » demeurerait vrai dans cette perspective même si tout le monde pensait le contraire et se comportait en conséquence. Tout comme, pourrait-on ajouter, l'énoncé « $2 + 2 = 4$ » serait encore vrai si plus personne ne savait compter, une théorie peut être vraie pour l'objectiviste de stricte obédience même si personne ne croit en sa vérité, ou encore une toile de maître demeure un chef-d'œuvre même si tout le monde l'a oubliée. Des différentes considérations qui précèdent surgissent trois problématiques distinctes intéressant le philosophe des sciences et il conviendra de les explorer séparément. La première concerne la nature de ce qui est au sens objectif du terme. La seconde concerne la façon dont, en général, nous connaissons objectivement ce qui existe. La troisième enfin, sans constituer une synthèse des deux premiers questionnements, les articule néanmoins puisqu'elle concerne spécifiquement la démarche méthodologiquement réglée que suit la science dans la mesure où elle ambitionne d'être une connaissance objective du réel dans toutes ses dimensions.

La problématique ontologique

Sans doute doit-on s'étonner qu'il y ait quelque chose plutôt que rien. Mais la question de l'être, si centrale au virage métaphysique de Heidegger, ne relève pas de la science : c'est à ce qui existe, donc aux « étants », pour utiliser le second des termes de la « différence ontologique », que s'intéressent les sciences. À leur mode d'être, à leur comportement, aux causes qui les meuvent, aux effets qu'ils produisent, bref, à ce que l'on pourrait concevoir comme leur champ d'interaction au sein du grand système cosmique. Si la question métaphysique par excellence ne contribue pas à faire avancer la réflexion scientifique, il n'en va de même pour le questionnement ontologique, qui est tout à fait susceptible de nourrir cette réflexion en lui achevant des considérations susceptibles d'influer sur les conceptions que les chercheurs élaboreront pour rendre compte de ce qui existe, ou du moins de ce qui s'observe. Il n'est évidemment plus question

aujourd'hui d'élaborer une ontologie déductive comme les penseurs pré-kantiens avaient coutume de le faire (par ex. Christian Wolff, *Philosophia Prima Sive Ontologia*, Francfort et Leipzig, 1729). Mais l'ontologie n'en a pas moins droit de cité, en particulier dans la perspective ouverte par Quine, qui ignore complètement l'interrogation de Heidegger et qui se situe tout à fait à l'autre bout du spectre, si toutefois il y a un sens à porter les entreprises philosophiques de Heidegger et de Quine sur un même plan.

Contrairement à la question heideggerienne, qui déboute la science de ses prétentions et aboutit finalement à un malencontreux rejet de la pensée technique qui en est issue sous le prétexte que cette pensée est « oubliuse de l'être », la question ontologique de Quine concerne en propre l'activité théorique de la science. Dans la mesure où une théorie est exprimée dans le langage canonique du calcul des prédicats du premier ordre avec égalité, il y a du sens à se demander, comme le fait Quine, ce que signifie « être » au regard de cette théorie, c'est-à-dire à quelle sorte de choses ou d'entités la théorie en question, pour autant que nous l'acceptons comme vraie ou établie, nous commet. Cette question est celle de « l'engagement ontologique » de la science. La réponse de Quine est bien connue : « être, c'est être la valeur d'une variable liée » — ce qui revient strictement à dire que le domaine dans lequel les variables de la théorie considérée prennent leur valeur est « le monde » à l'existence duquel la théorie, si endossée, nous engage. Épousant un holisme épistémologique radical, Quine considère que c'est le tout de la science, et non pas l'une ou l'autre de ses parties constituantes, qui détermine globalement ce qui compte pour nous comme existant. En 1960, Quine pousse sa réflexion beaucoup plus loin. Selon lui, les conditions qu'un objet doit satisfaire, au sens de la théorie des modèles, sont inscrites dans le lexique et la grammaire de la langue : un objet est ainsi vu comme susceptible de subir une action décrite par un verbe ; en principe, il peut être désigné par un substantif, c'est-à-dire recevoir un nom, propre s'il est localisé (dans un espace-temps qui n'est pas forcément celui où nous vivons), commun sinon. Cela exige qu'un objet soit doué d'un minimum de stabilité. Suivant Quine sur ce terrain, on peut dire qu'un objet, concret ou abstrait, ce à quoi on attribue une existence, ou encore, plus largement, ce qui est pensé, ou représenté, en tant qu'on le distingue de l'acte par lequel cela est pensé. Certes, dans ce dernier cas, le terme n'implique aucune existence en soi.

C'est également à Quine qu'on doit d'avoir posé le problème ontologique des *natural kinds*. Croire qu'il existe des espèces naturelles d'entités ou de choses, c'est croire que la nature elle-même est divisée en différentes sortes ou espèces d'êtres, et que nos classifications doivent, pour être épistémologiquement adéquates, tout simplement coïncider avec ces divisions. On dira alors, pour reprendre la métaphore bien connue, qu'il faut, dans nos représentations théoriques, que nos prédicats permettent de « découper la nature aux

articulations ». Dans cette perspective, les meilleurs candidats au titre d'espèces naturelles sont sans doute les types d'objets constituant la taxinomie scientifique, à savoir des objets comme les particules élémentaires de la physique, les éléments chimiques du tableau périodique, ou encore les espèces animales en biologie. Dans un remarquable article publié en 1969 où il entend faire voir que la dissolution finale de la notion de similarité ou d'espèce marque le passage à la maturité pour une discipline scientifique dans laquelle des notions comme celles mentionnées ou des classifications analogues entrent en ligne de compte et jouent un rôle explicatif important, Quine note d'abord qu'un sentiment de similarité comparative fait partie des dotations animales de l'homme. Pour autant qu'il colle avec les régularités de la nature, de manière à nous procurer des succès raisonnables dans nos inductions et espérances primitives, ce sentiment est sans doute un produit évolutif de la sélection naturelle : car, comme l'enseigne la théorie néodarwinienne de l'évolution, les espèces animales dont les individus basent leur comportement sur des inductions erronées finissent par s'éteindre. Mais, chez l'homme, ce sentiment immédiat, subjectif et proprement animal, de similarité se développe, et il emporte l'humanité vers la découverte de l'objectivité moins apparente et plus cachée d'une similarité déterminée par des hypothèses, des suppositions, des postulats et des conjectures théoriques. Les choses sont similaires au sens théorique suivant leur degré d'interchangeabilité en tant que parties de la machinerie cosmique révélée par la science. Bien sûr, relève Quine, quelque chose ressemblant à notre espace qualitatif inné continue de fonctionner parallèlement aux regroupements sophistiqués dont l'expérience scientifique a découvert qu'ils facilitent l'induction. Mais, en tant que scientifiques, nous attachons une importance minimale aux couleurs ou aux autres qualités sensorielles inessentiels ou secondaires, ce qui explique que nous regroupions les kangourous, les opossums et les souris marsupiales dans l'ordre unique des marsupiaux, dont nous excluons pourtant la souris ordinaire. Qui plus est, ajoute Quine, une discipline scientifique réellement mûre a appris à se défaire de la vieille notion confuse d'espèce ou de similarité : ainsi, le type de similarité comparative qui importe à la chimie est descriptible directement en termes des composants chimiques. On dira, dans ce contexte disciplinaire, que les molécules sont égales si elles contiennent des atomes des mêmes éléments suivant exactement les mêmes combinaisons topologiques. On peut ainsi, en principe, arriver à la similarité comparative entre des objets *a* et *b* en considérant combien il y a de paires de molécules égales, une molécule de *a* et une molécule de *b* chaque fois, et combien il y a de paires inégales. Ce rapport fournit en outre une mesure théorique de la similarité relative et explique alors amplement ce que c'est pour *a* que d'être plus semblable à *b* qu'à *c*. On peut même compliquer la définition en permettant aussi des degrés dans l'égalité des molécules, celles qui ont presque autant d'atomes,

ou qui ont des atomes dont les nombres atomiques ou les poids atomiques sont presque égaux, pouvant être réputées plus égales que d'autres. En tout état de cause, un solide concept de similarité chimique est assuré, d'où l'on extrait des espèces purement chimiques, elles-mêmes complètement analysables en termes de neutrons, d'électrons et d'autres particules élémentaires. Pour Quine, de telles mesures de similarité différentes, ou des notions de similarité relative différentes, sont ce qui se révèle le plus approprié aux différentes disciplines scientifiques : on se heurte à des complications inutiles lorsqu'on veut ménager des gradations de similarité relative plus fines que celles qui importent pour les phénomènes dont traite une science particulière. Quine conclut son analyse en considérant que, en général, nous pouvons regarder comme un symptôme très spécial de la maturité d'une discipline scientifique le fait qu'elle n'ait plus besoin d'une notion irréductible de similarité et d'espèce. C'est le stade final, où le vestige d'animalité est complètement résorbé par la théorie. La carrière de la notion de similarité, qui, depuis sa phase d'innéité, se développe au fil des années en bénéficiant des lumières résultant de l'accumulation de l'expérience, puis qui passe de la phase intuitive à la similarité théorique, pour finir par s'évanouir tout à fait, nous offre un paradigme de l'évolution qui mène, suivant le tableau brossé par Quine, des croyances primitives à la science.

Les sciences naturelles présentent le plus souvent les choses comme si les objets macroscopiques visualisables comportaient des structures cachées à l'observation qu'elles ont le pouvoir de mettre au jour. C'est dans cette démarche qu'elles en viennent à se référer à des objets microscopiques, voire à des entités à proprement parler inobservables et dont seules les traces peuvent être observées, mais cette fois à l'aide d'instruments, eux-mêmes n'étant que l'extension technologique de théories scientifiques préalables (par ex., le télescope ou le microscope). Les objets physiques ultimes de la science ne sont pas donnés à proprement parler : c'est le scientifique qui se donne les moyens d'y accéder. Pour un réaliste, Popper par exemple, un objet physique est un complexe d'atomes, formés eux-mêmes de particules subatomiques. Le monde subatomique, le monde atomique et le monde des objets macroscopiques visualisables constituent des aspects ou des strates du monde réel doués d'une égale réalité. Il serait donc erroné d'affirmer qu'une table telle qu'elle se présente à nous, est réelle tandis que ses molécules ou atomes supposés ne seraient que des constructions logiques. Mais, réciproquement, il est erroné de dire que la théorie atomique montre que la table, partie intégrante de notre univers quotidien, n'est qu'une apparence. Selon Popper, toutes ces hypothèses sont équivalentes si on les considère dans leur effort pour décrire la réalité. Certes, certaines, sont plus profondes, telle la théorie atomique, car, si elles ont un caractère plus conjectural que les autres, elles captent par ailleurs davantage de réalité puisqu'elles sont pourvues d'une plus grande stabilité quant à leur visée

théorique. À l'opposé de ce point de vue, pour les idéalistes en général et en particulier pour certains positivistes logiques, un objet physique est une construction logique réalisée à partir des données des sens : rien ne peut nous assurer qu'il existe bel et bien des objets physiques en dehors de nous ou que ceux-ci possèdent les propriétés que nous leur attribuons. Au plan épistémologique, cette thèse culmine dans le solipsisme méthodologique. Mieux vaut adopter le point de vue de Quine, qui soutient que, conceptuellement, les objets physiques sont des intermédiaires commodes, que nous imposons avec nous : ce sont des entités irréductibles dont nous postulons l'existence, comparables, du point de vue épistémologique, aux dieux d'Homère. Si le mythe des objets physiques est supérieur à la plupart des autres mythes d'un point de vue épistémologique, c'est qu'il s'est révélé un instrument plus efficace pour insérer une structure maniable dans le flux de l'expérience. Toujours selon Quine, d'un point de vue phénoménaliste, le schème conceptuel des objets physiques est une fiction commode, plus simple que la vérité à proprement parler et contenant tout de même cette dernière à titre de partie diffuse. Il simplifie l'explication du flux d'expériences sensorielles, tout comme l'introduction des nombres irrationnels simplifie les lois de l'arithmétique.

La problématique gnoséologique

Avant de concerner la connaissance scientifique, la question de l'objectivité concerne la connaissance ordinaire et quotidienne. Le commun des mortels est, en effet, soumis à un bombardement incessant d'informations de toutes sortes, de provenances diverses, de qualité variable et souvent douteuse, donc de fiabilité parfois très faible et appelant un contrôle. Mais quel mécanisme induit en nous des croyances, d'où viennent les opinions que l'on se fait, comment pouvons-nous savoir que nous avons affaire à des idées justes ou fausses ? Avant de s'interroger sur les moyens que se donnent les scientifiques pour contrôler systématiquement la représentation qu'ils se donnent du monde environnant, il faut voir que cette question a d'abord une portée générale : si nous ne sommes pas tous des savants ou des chercheurs scientifiques, nous sommes cependant tous des sujets épistémiques, que nous le voulions ou non, et même si l'on nous venait à l'esprit de nous en remettre sur toute question à l'opinion d'experts, encore faudrait-il expliquer comment l'avis de tels experts pourrait nous mettre dans un état qui puisse être qualifié de savoir authentique. La question de l'authentification de la connaissance que chacun, à point nommé, prétend avoir sur quelque matière que ce soit, y compris sur soi-même par voie d'introspection, est la question gnoséologique par excellence. Personne de normalement constitué n'est totalement ignorant — « ce que sais le mieux, disait déjà Socrate ironiquement, c'est que je ne sais rien ».

S'il peut y avoir objectivité de la connaissance au sens le plus ordinaire du mot, c'est d'abord et avant

tout parce qu'il peut y avoir objectivation. Par objectivation, il faut entendre ce processus par lequel une sensation est élevée au rang d'objet d'opinion ou, plus fermement, de savoir : objectivée, elle s'accompagne de la croyance à un objet extérieur. L'objectivation nous amène donc à employer des termes par lesquels nous référons à des objets. Quine parle en ce sens de patron d'objectivation, c'est-à-dire d'une configuration de mots doués chacun d'un type de référence qui correspond à leur catégorie. Ainsi, une description scientifique présente un certain patron d'objectivation : entre autres, chacun de ses termes observationnels ou descriptifs fait référence à un objet appartenant à une catégorie ou à une classe dont les éléments offrent entre eux des similitudes certaines relativement au but visé par la description. On a considéré classiquement que le processus d'objectivation était lié à la sensation, un processus de nature psychophysologique provoqué par l'excitation d'un organe sensoriel *via* des stimuli ainsi que par l'impression dans la conscience du nouvel état physiologique ainsi créé. Une sensation peut être à prédominance affective (sensation de brûlure, de froid) ou à prédominance représentative ou cognitive (les sensations visuelles, en général). L'épistémologie contemporaine distingue le plus souvent les sensations ou impressions sensibles des données des sens : ce sont ces dernières qui constituent des objets (des données) pour la conscience réfléchie qui donne lieu à l'objectivation, tandis que les sensations (surtout celles à prédominance affective) peuvent n'être saisies que de manière vague et confuse par la conscience immédiate ou spontanée. On appelle parfois sensations internes celles qui sont rapportées par le sujet à son propre corps et non pas à un objet extérieur à celui-ci, comme la sensation de faim ou de froid. Une doctrine gnoséologique extrêmement importante pour comprendre l'émergence de l'empirisme logique contemporain a fait du processus de la sensation le tout de la connaissance. Le sensationnisme, une thèse que l'on associe généralement au nom d'Ernst Mach et selon laquelle les sensations sont les seules données que nous puissions appréhender – partant, la seule ontologie que nous puissions légitimement accepter sur une base scientifique. Autrement dit, pour Mach, rien ne justifie que l'on considère les sensations comme les signes d'autres choses qu'elles-mêmes, et tout ce qui peut être connu ne peut l'être qu'à travers l'expérience sensorielle et l'analyse de la sensation. Au plan logique, les sensations viennent, bien sûr, avant l'objet, et celui-ci est analysable (ou peut être construit ou constitué) en termes de sensations, l'opération inverse étant impossible. Toutefois, selon Mach, il est nécessaire que la science infère, à partir des similitudes observées dans le comportement des objets ou des personnes, ou encore à partir des rapports d'observation eux-mêmes, que les êtres humains appréhendent les mêmes sensations. Dans la perspective du monisme méthodologique qu'épouse Mach, il n'y a pas de distinction à faire entre les objets des diverses branches de la science, tous les « faits » auxquels elles s'intéressent

consistant en des relations entre différentes sensations. On peut considérer le sensationnisme comme une forme de phénoménalisme, comme celui qu'élabora Carnap dans l'*Aufbau* avant d'endosser explicitement le physicalisme.

Il vaut la peine de contraster à cette étape-ci le phénoménalisme et le physicalisme, deux doctrines dont la divergence de vue tient justement au fait que l'objectivité y est conçue très différemment. Le phénoménalisme, en particulier, mène tout droit au solipsisme méthodologique, alors que le physicalisme part du fait que, avec les termes observationnels que nous utilisons communément, nous nous référons d'emblée à un univers commun d'entités macroscopiques, ce qui nous évite d'avoir à combler le fossé aussi bien entre les consciences individuelles qu'entre la conscience et le monde où elle prend place. Le phénoménalisme qui fut défendu un temps par Carnap diffère de la doctrine classique qui soutenait que les êtres humains ne peuvent connaître que les phénomènes et non les nombres ou choses en soi. Le phénoménalisme épousé par Carnap est plutôt la thèse selon laquelle toute langue de choses est réductible en fait et en droit à des énoncés au sujet d'expériences perceptuelles réelles ou possibles considérées comme des expériences élémentaires et immédiates. Mill, par exemple, définit les objets matériels comme des possibilités permanentes de sensation ; selon lui, quand on dit d'un objet matériel qu'il est perçu, c'est que certaines de ces possibilités se trouvent actualisées. Mach, Ayer et Carnap, entre autres, ont défendu une version ou l'autre du phénoménalisme. C'est finalement Neurath qui a convaincu Carnap d'abandonner le phénoménalisme en soutenant qu'il ne peut y avoir de discours intelligible sur les sensations ou données des sens que dans la mesure où les locuteurs ont précisé au préalable sa signification en référence à des objets physiques publics plutôt que privés. Carnap en vient donc à épouser plutôt le physicalisme, à savoir la doctrine phare des penseurs du Cercle de Vienne, selon laquelle la langue de toutes les sciences particulières, qu'il s'agisse des sciences humaines et sociales ou encore des sciences de la nature, est réductible en droit et en fait à la langue de la physique, et, en particulier, à des énoncés protocolaires concernant les objets physiques, leurs propriétés ainsi que leurs mouvements dans l'espace-temps. Selon cette doctrine, on peut simplement exiger des concepts scientifiques qu'ils soient réductibles à des prédicats d'observation, car cette exigence suffit à la confirmabilité des phrases qui impliquent ces concepts. En fait, dès le début des années 1930, les positivistes logiques du Cercle remplacent le solipsisme méthodologique par le physicalisme en vertu de la thèse voulant que tout ce qui est subjectivement confirmable le soit aussi intersubjectivement. Pour les membres du Cercle, la thèse de l'unité du langage de la science se fonde sur le physicalisme, appelé également matérialisme méthodologique : si la langue de la science doit et peut être une, c'est bien la langue de la physique qui doit assurer et assurera de fait cette

unité. Cependant, dès 1936-1937 (voir « Testability and Meaning »), Carnap se bute à un problème qui met radicalement en question la réductibilité physicaliste et, du même coup, la thèse de l'unité de la langue de la science : les définitions explicites ne permettent pas d'introduire les termes dispositionnels dans la langue scientifique. Carnap propose certes de remplacer ces définitions par des énoncés de réduction, mais cette modification représente à elle seule un net aveu de l'échec du physicalisme.

Cela n'implique pas pour autant de désavouer l'empirisme comme doctrine gnoséologique. Se proposant justement de réorienter l'empirisme, Quine (1969) soutient que les termes observationnels ne dérivent pas des sensations seules : objectiver enveloppe plus que les stimuli sensoriels. Voilà pourquoi la référence aux objets contient un résidu qui dépasse l'observation et ne se laisse pas déterminer par le simple examen de données du comportement. Suivant la thèse quinquienne de l'inscrutabilité ou, comme il préfère le dire, de l'indétermination de la référence, que la référence soit proprement inscrutable pour nous signifie la chose suivante : supposons que j'aie un mot (un concept) par quoi je désigne mon expérience sensible du lapin ; je n'aurai jamais de preuve empirique me montrant que ce à quoi ce concept s'applique est un lapin plutôt qu'un segment temporel de lapin, ou inversement. Je peux faire désigner autre chose à mes mots, quitte à ajuster l'emploi des particules logiques et des variables. Autrement dit, des mots chargés d'une fonction sémantique, c'est-à-dire de dénoter un concept ou une chose, n'ont leur dénotation assurée par aucun fait. Ainsi, nous pouvons connaître la vérité ou la fausseté de phrases dont nous ne sommes pas à même de dire avec certitude, sur une base empirique, de quoi elles parlent. S'il en va ainsi, c'est qu'à la différence de ce qu'il en est pour la vérité et la fausseté des phrases, il n'y a pas de conditions stimulatoires qui soutiennent la référence des termes : celle-ci ne se scrute pas, car elle ne s'appuie sur aucun état de fait. Elle est, à vrai dire, transcendante. Car la détermination des référents des expressions est essentiellement liée à la manière de régler les dispositifs linguistiques individuels et ne repose pas sur un donné physique, sur des faits. Ainsi, les conditions de vérité et de fausseté des phrases s'expriment selon Quine en stimuli-signification que le changement de référence n'affecte pas. Du point de vue épistémologique (au sens de Wundt), nous pouvons assigner au même mot des références distinctes : il n'existe pas de réponse unique à des questions comme « Ceci est-il un lapin ? », ou « Cela est-il un nombre ? ». De fait, l'inscrutabilité de l'ontologie commence dans le parler quotidien ; des corps solides aux champs magnétiques ou gravitationnels, toutes nos entités sont à référence indécidée. Dans un ouvrage postérieur, Quine (1990) semble vouloir faire de l'indétermination de la référence un terme générique couvrant aussi bien ce qu'il appelait avant l'inscrutabilité de la référence. C'est que le terme inscrutabilité laisse entendre qu'il existe bel et bien une certaine référence unique à un

terme donné (même si celle-ci demeure inscrutable), ce qui, comme on l'a vu, ne correspond pas aux vues de Quine. Il reste vrai de dire selon Quine que le parler d'objets suppose plus que la faculté de réagir à des présences en émettant des phrases. Ce parler est intériorité articulée, ce qui implique la division de la référence. S'y ajoutent ainsi des éléments ensemblistes et logiques, en particulier la quantification et l'identité. Bien sûr, parler d'objets consiste aussi à employer des termes pour des objets : termes de masse, termes singuliers, termes généraux. Il y correspond cependant, d'après Quine, des mécanismes ou des patrons d'objectivation : objectivation ambiguë ou par catégorie archaïque, par ostension directe ou différée, par dispositifs individuels (quantificateurs et relation d'égalité), etc.

La question épistémologique

On pourrait certes considérer que la problématique ontologique et la problématique gnoséologique sont l'envers et l'endroit d'un même questionnement systématique propre à l'entreprise philosophique. La question de savoir ce qui existe réellement n'est pas complètement détachable de celle de savoir comment nous savons que ce que nous prétendons exister existe bel et bien. Si c'est à la science qu'il revient de nous enseigner ce qui existe et comment il se fait que les choses se présentent comme elles le font, alors il doit y avoir un ultime questionnement, épistémologique celui-là, qui examine minutieusement la démarche scientifique elle-même. C'est ce que prétend faire la philosophie en examinant le travail de la connaissance scientifique sous l'angle méthodologique ou, ce qui revient au même, sous l'angle d'une logique appliquée. De ce point de vue, la question de l'objectivité scientifique est la question épistémologique par excellence. C'est avec Kant et à partir de lui que la philosophie pense pouvoir substituer un questionnement épistémologique à un questionnement ontologique, et l'on peut dire en ce sens que Kant est le premier philosophe de l'objectivité, même si, suivant sa doctrine idéaliste, ce sont les structures épistémologiques du sujet transcendantal qui assurent les conditions de possibilité d'une science objective comme celle de Newton et qui en garantissent universellement la « prétention à la validité » (*Geltungsanspruch*). Que connaît-on – ou plutôt, que peut-on vraiment connaître en science ? Kant n'hésiterait pas à dire : les phénomènes. Au sens large, un phénomène est tout ce qui apparaît à la conscience, tout ce qui est perçu, tant dans l'ordre physique que psychique. Au sens strict cependant, un phénomène est un événement ou un fait d'observation se situant au niveau de l'expérience quotidienne et du sens commun, ou encore (par opposition à un microphénomène) à l'échelle macroscopique. Selon le contexte, on peut aussi vouloir distinguer l'événement observable ou le fait d'observation unique du phénomène, qui a tendance à se reproduire et dont les diverses occurrences appartiennent d'emblée à une certaine classe

intéressant la science (par ex., le phénomène de la circulation du sang ou celui de la coagulation sanguine). C'est avec Galilée et la révolution scientifique des Temps modernes qu'apparaît cette conception épistémologique. Galilée (1564-1642) croyait fermement que le « livre de la Nature » est écrit dans le langage des mathématiques. Aussi entendait-il restreindre la physique à des assertions concernant les qualités primaires des choses matérielles, tels leur forme, leur grosseur, leur poids, leur nombre, leur position, ou leur « quantité de mouvement ». Pour lui, en effet, les qualités primaires d'un objet matériel quelconque sont susceptibles de subir des variations quantitatives mesurables sur une échelle donnée, tandis que les qualités secondaires, tels la couleur, l'odeur, le goût ou le son, n'existent que dans l'esprit du sujet qui perçoit l'objet en question. En limitant l'objet de la physique aux qualités primaires et à leurs relations, Galilée se trouvait à exclure les explications téléologiques du domaine de cette science et à rejeter de la sorte les interprétations aristotéliennes selon lesquelles les choses matérielles suivent un mouvement naturel afin de retrouver leur place naturelle. Même si Galilée était conscient du fait qu'on ne peut réfuter une hypothèse voulant que des corps libres de toute attache se déplacent à la surface de la Terre afin d'atteindre leur place naturelle, il rejetait cette sorte d'interprétation car, pour lui, elle ne réussissait aucunement à « expliquer » les phénomènes.

L'objectif de « sauver les apparences », c'est-à-dire de rendre compte systématiquement de tout ce qui est observable, pose le problème de caractériser précisément et adéquatement le concept d'observable. Cette entreprise philosophique, qui a accaparé à peu près tout ce que le présent siècle a compté comme philosophes des sciences, n'est toujours pas réglée. On ne saurait l'ignorer pour autant et il convient d'en traiter maintenant. Selon plusieurs néopositivistes, en science, on trouve d'un côté des termes qui désignent des objets, propriétés et relations observables, de l'autre, des termes qui peuvent faire référence à des événements inobservables, ou encore à certains aspects ou traits inobservables d'événements. Les termes de la première catégorie sont dits termes d'observation, termes observationnels, ou termes non théoriques, alors que les termes de la seconde catégorie sont appelés termes théoriques. Généralement, on ne trouve cependant pas chez ces auteurs de définition précise de ce qu'il faut entendre par observable et inobservable : observer semble être compris au sens courant, soit prêter attention par l'intermédiaire des sens (surtout de la vue). Popper (1934), quant à lui, en fait un terme primitif de son épistémologie. Cependant, Achinstein (1968) fait remarquer qu'observer, c'est s'engager dans une activité spécifique qui demande que l'on se concentre sur certains aspects d'un phénomène empirique ; cela équivaut non pas à voir, entendre, etc., mais bien à reconnaître. Ainsi, selon Achinstein, il est possible d'envisager au moins deux cas de figure intéressants.

a) On peut observer X, ou observer X en train de faire

quelque chose, même si X nous est caché : par exemple, on peut observer le feu grâce à la seule fumée, un bateau par les seules vagues qu'il provoque, un avion supersonique par la trace blanche qu'il laisse dans le ciel, etc. En pareils cas, les conditions suivantes doivent être réunies pour qu'on puisse véritablement parler d'observation de X : i) un certain Y (la fumée, la trace, etc.) est associé à X au sens où X produit Y, ou encore Y voile X ; ii) Y se trouve dans le voisinage de X et se maintient dans son voisinage si X bouge ; iii) regarder Y est la façon la plus appropriée, sinon la seule façon, d'observer X. Or, il faut noter que plusieurs termes théoriques pourraient, dans ces conditions, faire référence à des objets, propriétés ou relations observables : l'électron qui laisse une trace dans la chambre d'ionisation, le changement de température qui fait grimper la colonne de mercure, le champ électrique qui a un effet sur l'électroscope. Pourquoi alors, demande Achinstein, ne serait-il pas approprié de soutenir que nous observons des électrons, des champs électriques et des modifications de température ? b) On peut illustrer le deuxième cas de figure de la façon suivante : on observe X en regardant l'image Y que X projette dans un miroir. En pareil cas, les conditions suivantes doivent être remplies pour qu'on puisse parler d'observation de X : i) ce à quoi on porte attention (l'image Y) est produit par X ; ii) Y ressemble à X ; iii) Y se modifie de la même façon que X lorsque X bouge ou se transforme ; iv) Y existe en même temps que X. Selon Achinstein, on peut ainsi parler d'observation lorsqu'on utilise des instruments, tels le télescope, ou le microscope électronique à balayage, qui nous renvoient des images de ce que l'on désire observer. Cependant, lors d'une observation de ce genre, il n'existe pas toujours de frontière clairement identifiable entre ce que nous devons à l'objet observé lui-même et ce qui relève de l'instrument : encore ici, la distinction entre observable et inobservable paraît en être une de degré beaucoup plus que de nature. Par ailleurs, selon une suggestion de Carnap (1936-1937), ce qui est observable peut être décrit dans un vocabulaire d'observation de façon typique. Pour Achinstein, en revanche, on peut décrire ce qu'on observe de diverses façons selon le contexte et le but poursuivi, et on peut utiliser pour ce faire aussi bien le « vocabulaire théorique » que le « vocabulaire d'observation » : si l'on demande à un physicien ce qu'il a observé dans une chambre d'ionisation, il peut aussi bien répondre en toute légitimité qu'il a vu des électrons traverser la chambre, ou qu'il a aperçu une trace produite par les électrons, ou encore qu'il a remarqué des séries de fines gouttelettes qui se sont condensées sur les ions de gaz.

Toute la question devient maintenant celle de savoir comment deux physiciens (mais nous aurions pu parler aussi de deux chimistes, de deux biologistes, voire même de deux économistes, etc.) feront pour sinon faire consensus du moins en venir à un accord explicite et formel non seulement sur ce qu'ils observent objectivement mais surtout sur la bonne façon d'en

rendre compte dans un cadre théorique objectif. Il existe deux manières distinctes de poser la question de l'objectivité en science. La première a fait école jusqu'à l'apparition du Cercle de Vienne, la seconde a commencé de s'imposer avec le positivisme logique. Avant que les épistémologues ne se donnent pour tâche de « reconstruire rationnellement » les théories scientifiques, si possible en les axiomatisant, et à mettre au point, grâce aux outils formels de la logique mathématique, un langage unifié pour toutes les sciences empiriques, les questions épistémologiques étaient débattues sur le terrain de la psychologie de la recherche. Bachelard constitue encore, même si son œuvre surgit pour l'essentiel après la Seconde Guerre mondiale, une figure prototypique de l'analyse épistémologique d'orientation psychologique plutôt que logique. C'est à la formation de l'esprit scientifique que celui-ci dit s'intéresser. À l'opposé, Popper s'intéresse plutôt à la « logique de la recherche » (*Logik der Forschung*) ou à la « logique de la découverte scientifique » — même si, paradoxalement, une des thèses centrales de Popper est justement qu'un tel algorithme logique ne saurait exister et qu'il faut plutôt concentrer l'analyse épistémologique sur la méthode scientifique, exclusivement fondée selon lui sur la proposition d'hypothèses explicatives, quel que soit le domaine, suivie de tentatives nombreuses, variées, rigoureuses et systématiques de réfutation.

Il faut bien voir que la caractéristique de la question épistémologique contemporaine de l'objectivité part du souci de créer les conditions de la convergence de pensée. Pour Kant, par exemple, le sujet transcendantal étant un sujet humain générique, le monde sensible est le même pour tous : les catégories, entre autres celle de cause, s'appliquent de la même manière chez tous les êtres humains pour autant qu'ils aient les mêmes facultés cognitives, et donc les mêmes capacités judicatives. L'objectivité est garantie du fait que les structures de la sensibilité et de l'entendement sont stables et fixes. Kant n'envisage pas, par exemple, qu'une géométrie non euclidienne puisse servir de métrique pour définir l'espace cosmique autrement que le fait Newton dans ses *Principia*. Les questions soulevées par Poincaré à ce propos au début du siècle, à l'époque où se prépare justement la révolution einsteinienne, sont impensables pour Kant. Pour nous, la situation est tout autre : non seulement Einstein a transformé la cosmologie avec la théorie de la relativité générale, mais, au même moment, c'est toute la physique de l'infiniment petit qui, avec la théorie des quanta, a subi une radicale mutation. Comme l'a bien mis en lumière B. d'Espagnat, la mécanique quantique nous force à revisiter nos positions sur la question de l'objectivité scientifique. En effet, la réalité quantique suppose par sa nature même une interaction avec les instruments qui la mesure. Reichenbach insiste à raison sur le fait que, ce qui pose un singulier problème d'objectivité en contexte quantique, c'est que le système observé n'est pas totalement indépendant, ni ontologiquement ni épistémologiquement, du système

observateur. La conception classique du rapport sujet/objet ne convient donc plus dans un tel contexte théorique. Quelle conception méthodologique de l'objectivité convient donc ici ? La réflexion épistémologique contemporaine a été très profondément marquée du fait que ceux qui l'animaient croyaient que la physique était la plus avancée de toutes les sciences empiriques. Ils ont donc ajusté leurs conceptions pour tenir compte des développements révolutionnaires que connaissait cette discipline en plein essor, convaincus que l'épistémologie qui allait en surgir aurait un caractère général et conviendrait *mutatis mutandis* à toutes les disciplines. Et c'est à Popper, pourrait-on convenir, qu'il revient d'avoir poussé le plus loin la réflexion spécifiquement méthodologique à propos de l'objectivité.

Pour Popper (1956, 1963, 1972), l'objectivité de la science consiste tout simplement dans l'objectivité de la méthode critique, c'est-à-dire dans le fait qu'aucune théorie n'est jamais affranchie de la critique, et non pas dans le caractère désintéressé du savant. Selon Popper, il est tout aussi faux d'accepter que l'objectivité de la science dépend de l'objectivité du savant que de croire que le savant des sciences de la nature est plus objectif que celui des sciences sociales : le premier est tout aussi partisan que le second. Toujours d'après Popper, l'exigence d'objectivité scientifique peut être interprétée comme une règle méthodologique selon laquelle la science exclut les énoncés qui ne sont pas susceptibles d'être soumis à des tests intersubjectifs. Le problème de l'objectivité scientifique s'identifie donc selon lui avec le problème de l'objectivité des énoncés de base de la science, puisque la valeur des autres énoncés scientifiques est fonction de leurs relations avec ces énoncés. Kuhn (1962), en revanche, considère que ce qui garantit la valeur des énoncés de base, ce n'est pas l'accord critique des chercheurs, mais la confiance commune qu'ils accordent à l'ensemble des dogmes définissant leur discipline scientifique. Selon lui, l'objectivité scientifique n'est pas fondée sur la critique rationnelle permanente de nos croyances, contrairement à ce que prétend Popper, mais sur la stabilité d'une matrice disciplinaire établissant ce qui est admissible et ce qui ne l'est pas. Contredisant ce point de vue, Shapere (1974) croit pour sa part qu'une activité ou proposition de la science est objective dans la mesure où elle se fonde sur des considérations émanant seulement du domaine scientifique concerné. Ce dernier doit être bien délimité et son exploration doit donner lieu au développement de techniques permettant de soulever, traiter et résoudre des problèmes spécifiques. Shapere entend soutenir de la sorte qu'il faut complètement dissocier la question de la psychologie du savant ou du contexte sociologique de ses recherches du problème de l'objectivité de la science. L'objectivité scientifique exige en outre selon lui que le corpus du domaine bien délimité qu'on explore se révèle consistant avec le corpus des techniques et théories acceptées dans les autres domaines bien délimités de la science.

Ces trois analyses ne nous éloignent pas vraiment du

décor qu'avait planté les néopositivistes du Cercle de Vienne, qui ont certainement marqué de manière indélébile notre façon de penser en matière d'épistémologie. Du reste, dire que le positivisme logique a, en cette matière, tenu le haut du pavé jusqu'au tournant des années 1960 ne rend pas vraiment justice à la révolution radicale à laquelle nous assistons en philosophie des sciences avec l'avènement du *Wiener Kreis*. Car, d'une part, les idées mises en place par les penseurs du Cercle débordèrent très largement le Cercle lui-même, et plusieurs philosophes qui ont marqué le *XX^e* s. au coin de leur génie propre – pensons en particulier à Russell, Wittgenstein, Reichenbach, Hempel et Popper, n'en ont pas été membres mais y ont été reliés d'une manière ou d'une autre. D'autre part, même après les années 1960, ces idées ont continué d'être structurantes, ne serait-ce que parce que les penseurs les plus marquants des quarante dernières années ont tous sans exception défini leur problématique par rapport aux idées que les empiristes ou les positivistes logiques ont mises en avant et ont discutées très rigoureusement. Ils furent les premiers, du reste, à dire exactement pourquoi leur conception de la connaissance scientifique faisait problème et à ouvrir ainsi la réflexion à des horizons nouveaux. Ainsi, sans les contributions philosophiques capitales de ces philosophes, la plupart des avancées épistémologiques subséquentes auraient sans aucun doute été proprement impensables. Par exemple, l'orientation philosophique de Quine serait inexplicable, car toute son œuvre est caractérisable comme la recherche de ce qu'il a lui-même appelé un « empirisme sans les dogmes ». Popper serait aussi inexplicable, lui qui s'est ouvertement défini comme « l'opposition officielle aux thèses du Cercle de Vienne » et aussi comme « celui qui a tué le positivisme logique ». Mais la suite serait tout aussi inexplicable : car il y a une suite logique du propos philosophique allant de Popper à Feyerabend, Lakatos et Grünbaum, tout comme il y a une suite logique du propos qui va de Quine, Carnap, Reichenbach et Hempel à Hanson, Kuhn, Salmon, Laudan et Van Fraassen, pour ne citer que quelques-unes des figures marquantes des années plus récentes. Tous les épistémologues ont contribué à leur manière à redéfinir pour notre époque le problème de l'objectivité de la connaissance scientifique.

► ACHINSTEIN P., *Concepts of Science. A Philosophical Analysis*, Baltimore, Johns Hopkins Press, 1968. – ASQUITH P. & KYBURG H. Jr. éd., *Current Research in Philosophy of Science. Proceedings of the PSA Critical Research Problems Conference*, East Lansing (Mich.), Philosophy of Science Association, 1979. – AYER A.J., *Language, Truth and Logic*, Londres, Gollancz, 1936 (éd. rev., 1946; New York, Dover, 1952). – BACHELARD G., *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1938. – BUNGE M., *Treatise on Basic Philosophy*, Dordrecht/Boston/Lancaster, D. Reidel Publ. Co., 8 vol., 1974-1986 (voir spécialement les vol. 3 [Ontologie I : *The Furniture of the World*, 1977] et 4 [*A World of Systems*, 1979]). – CARNAP R., *Der Logische Aufbau der Welt*, Berlin, 1928 (trad. angl., *The Logical Structure of the World*, Berkeley/Los Angeles, Univ. of California Press, 2^e éd., 1967); *Die physikalische Sprache als*

Universalsprache der Wissenschaft (1932), trad. et introd. M. Black, *The Unity of Science*, Londres, Kegan Paul, Trench, Trubner & Co., 1934; *Logische Syntax der Sprache*, Vienne, 1934 (trad. A. Smeaton, *The Logical Syntax of Language*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1964); *Testability and Meaning, Philosophy of Science*, vol. 3, 1936-1937, p. 419-471; vol. 4, p. 1-40 (reprod. sous forme d'opuscule avec corrections et ajouts, New Haven [Conn.], Graduate Philosophy Club, Yale Univ., 1950); *Meaning and Necessity*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1947 (2^e éd. augm., 1956; trad. fr. F. Rivenc & P. de Rouilhac, Paris, Gallimard « Bibliothèque de Philosophie », 1997); *Philosophical Foundations of Physics*, New York, Basic Books, 1966 (trad. J.-M. Lucciani & A. Soulez, *Les fondements philosophiques de la physique*, Paris, Armand Colin, 1973). – COLODNY R. éd., *Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain*, Pittsburgh, Univ. of Pittsburgh Press, 1972. – D'ESPAGNAT B., *À la recherche du réel. Le regard d'un physicien*, Paris, Gauthier-Villars, 1979. – DUHEM P.M., *La Théorie physique, son objet, sa structure* (1906), 2^e éd. rev. et augm., Paris, Marcel Rivière, 1914 (reprod. fac-similé avec avant-propos, index et bibliogr. P. Brouzeng, Paris, Vrin, 1981). – EINSTEIN A. & INFELD L., *The Evolution of Physics : The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta*, New York, Simon & Schuster, 1942 (trad. M. Solovine, *L'évolution des idées en physique : des premiers concepts aux théories de la relativité et des quanta*, Paris, Flammarion, 1948). – FEYERABEND P.K., *Against Method*, Londres, New Left Books, 1975 (trad. B. Jurdant & A. Schlumberger, *Contre la méthode. Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Paris, Le Seuil, 1979). – GEACH P.T., AYER A.J. & QUINE W.V.O., « Symposium : On What There Is », *PAS*, suppl. vol. 25, 1951, p. 125-160. – GOCHET P., *Quine en perspective : essai de philosophie comparée*, préf. W.V.O. Quine, Paris, Flammarion, 1978. – HANSON N.R., *Patterns of Discovery*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1958. – HEIDEGGER M., *Kant et le problème de la métaphysique*, trad. fr. A. de Waelhens & W. Biemal, Paris, Gallimard, 1953; *Qu'est-ce qu'une chose ?*, trad. O. Rebol & J. Taminaux, Paris, Gallimard, 1971. – HEMPEL C.G., *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*, New York, Free Press, 1965 (rééd., 1968). – JACOB P. dir., *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique de 1950 à nos jours*, Paris, Gallimard « Bibliothèque des sciences humaines », 1980; *L'empirisme logique, ses antécédents, ses critiques*, Paris, Minuit « Propositions », 1980. – KANT E., *Kritik der reinen Vernunft* (1781), trad. A. Tremesaygues & B. Pacaud, *Critique de la raison pure*, Paris, PUF, 1944. – KUHN T.S., *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962 (2^e éd. rev. et augm., 1970); trad. fr. L. Meyer, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion 1983. – LAKATOS I., « Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes », in LAKATOS I. & MUSGRAVE A. éd., *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1970, p. 91-196. – LARGEAULT J., *Quine : questions de mots, questions de faits*, Toulouse, Privat, 1980. – LAUDAN L., *Progress and its Problems : Toward a Theory of Scientific Growth*, Berkeley, Univ. of California Press, 1977 (trad. P. Miller, *La dynamique de la science*, Bruxelles, P. Madaga, 1987); *Science and Relativism : Some Key Controversies in the Philosophy of Science*, Chicago/Londres, Univ. of Chicago Press, 1990; *Science and Values : The Aims of Science and Their Role in Scientific Debate*, Berkeley, Univ. of California Press, 1984. – MACH E., *Beiträge zur Analyse der Empfindungen* (1886), trad. F. Eggers & J.-M. Monnoyer, *L'Analyse des sensations : le rapport du physique au psychique*, préf. J.-M. Monnoyer, Nîmes, Jacqueline Chambon, 1996. – MALHERBE J.-F., *La philosophie de Karl Popper et le positivisme*

logique, Namur, Presses Univ. « Philosophie et Lettres », 1976 (2^e éd., rev. et corr., 1979). – NAGEL E., *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*, New York, Harcourt, Brace & World, Inc., 1961. – NEURATH O., « Prokollsätze » (1932-1933), *Erkenntnis*, vol. 3; trad. angl. G. Schick in AYER A.J. éd., *Logical Positivism*, New York, Free Press, 1959. – PHILONENKO A., *L'œuvre de Kant*, Paris, Vrin, 1975. – POINCARÉ H., *La Science et l'Hypothèse*, Paris, Flammarion « Bibliothèque de Philosophie scientifique », 1902 (2^e éd., préf. J. Vuillemin, Paris, Flammarion « Champs », 1968). – POPPER K.R., *Logic of Scientific Discovery*, Londres, Hutchinson, 1959 (1^{re} éd. orig. all., *Logik der Forschung*, Vienne, Julius Springer Verlag, 1934/1935; trad. N. Thyssen-Rüttel & P. Devaux, préf. J. Monod, *La Logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1973); *Conjectures and Refutations*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1963 (trad. M.-I. & M.B. de Launay, *Conjectures et réfutations*, Paris, Payot, 1985); *Objective Knowledge*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1972 (2^e éd. rev. et augm., 1979; trad. part. C. Bastyns, *La connaissance objective*, Bruxelles, Complexe, 1982); *Realism and the Aim of Science. From the Postscript to the « Logic of Scientific Discovery »*, éd. W.W. Bartley, III, Totowa (NJ), Rowman & Littlefield, 1983; *The Open Universe. From the Postscript to the « Logic of Scientific Discovery »*, éd. W.W. Bartley, III, Londres, Hutchinson, 1982 (trad. R. Bouveresse, *L'Univers irrésoûlu. Plaidoyer pour l'indéterminisme*, Paris, Hermann, 1984). – PUTNAM H., *Philosophical Papers*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2 vol., 1975. – QUINE W.V.O., « Two Dogmas of Empiricism », *The Philosophical Review*, vol. 60, 1951, p. 20-43 (trad. P. Jacob, « Les deux dogmes de l'empirisme », in JACOB P. dir., *op. cit.*, p. 87-112); *From a logical point of view*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1953; *Ontological Relativity and Other Essays*, New York/Londres, Columbia Univ. Press, 1969 (2^e éd., 1986); trad. J. Largeault, *Relativité de l'ontologie et autres essais*, Paris, Aubier-Montaigne « Analyse et raisons », 1977); *Pursuit of Truth*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1990 (trad. M. Clavelin, *La poursuite de la vérité*, Paris, Le Seuil, 1993); *The Roots of Reference*, La Salle (Ill.), Open Court « The Paul Carus Lectures », n° 14, 1974; *Word and Object*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1960 (2^e éd., 1964; trad. P. Gochet & J. Dopp, *Le mot et la chose*, Paris, Flammarion, 1977). – REICHENBACH H., *Experience and Prediction*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1938; *Philosophical Foundations of Quantum Mechanics*, Berkeley, Univ. of California Press, 1965; *The Rise of Scientific Philosophy*, Berkeley, Univ. of California Press, 1951 (trad. G. Weill, *L'avènement de la philosophie scientifique*, Paris, Flammarion « Bibliothèque de Philosophie Scientifique », 1955). – ROUSSET B., *La Doctrine kantienne de l'objectivité*, Paris, Vrin, 1967. – RUSSELL B., *Our Knowledge of the External World*, Londres, George Allen & Unwin, 1914 (trad. P. Devaux, *La Méthode scientifique en philosophie*, Paris, Payot, 1971); *An Inquiry Into Meaning and Truth*, Londres, George Allen & Unwin, 1940 (trad. P. Devaux, *Signification et vérité*, Paris, Flammarion, « Science de l'homme », 1969). – SALMON W.C., *The Foundation of Scientific Inference*, Pittsburg, Univ. of Pittsburgh Press, 1965. – SCHEFFLER I., *Science and Subjectivity*, Indianapolis, Bobbs Merrill, 1967; *The Anatomy of Inquiry. Philosophical Studies in the Theory of Science*, New York, Alfred A. Knopf, 1963 (trad. part. P. Thuillier, *Anatomie de la science. Études philosophiques de l'explication et de la confirmation*, Paris, Le Seuil « Science ouverte », 1966). – SEBESTIK J. & SOULEZ A. dir., *Le Cercle de Vienne. Doctrines et controverses*, Paris, Méridiens/Kincksieck « Épistémologie », 1986. – SHAPER D., « Scientific Theories and Their Domains », in SUPPE F. et al., 1974, p. 518-565. – SOULEZ A. dir., *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, Paris, PUF « Philosophie d'aujourd'hui », 1985.

– SUPPE F., *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*, Urbana/Chicago, Univ. of Illinois Press, 1989. – SUPPE F. et al., *The Structure of Scientific Theories*, Chicago, Univ. of Illinois Press, 1974 (2^e éd. augm., 1977). – VAN FRAASSEN B.C., *The Scientific Image*, Oxford, Clarendon Press, 1980; *Laws and Symmetry*, New York, Oxford Univ. Press, 1989 (trad. et prés. C. Chevalley, *Lois et symétrie*, Paris, Vrin « Mathesis », 1994). – VUILLEMIN J., *Physique et métaphysique kantienne*, Paris, PUF, 1955. – WITTGENSTEIN L., *Philosophische Untersuchungen. Philosophical investigations 1945-1949*, trad. G.E.M. Anscombe, Oxford, Basil Blackwell, 1953 (2^e éd., 1967; trad. P. Klossowski, *Tractatuslogico-philosophicus suivi de Investigations philosophiques*, Paris, Gallimard, 1961, rééd. 1986, p. 109-364).

Robert NADEAU

→ Carnap; Cercle de Vienne; Donné; Empiricismisme; Épistémologie; Expérience; Fait; Mach; Physicalisme; Quine; Réalisme; Réfutabilité; Reproductibilité; Transcendantal; Validation.

OBSERVABLE

PHYSIQUE

Le concept d'observable se présente aujourd'hui comme un concept de la théorie quantique, concept essentiel puisque c'est le nom qu'il est convenu de donner, dans ce domaine, aux grandeurs physiques. Plus même, le mot « observable » désigne deux choses à la fois : une grandeur physique donnée et sa représentation par un opérateur, nécessairement « hermitique », dans le formalisme de la théorie quantique. Qu'un opérateur agissant dans un espace « abstrait » (espace de Hilbert) soit appelé « observable » a de quoi surprendre, puisque aussi bien dans observable il y a observer, c'est-à-dire regarder, c'est-à-dire encore se servir de ses yeux, donc d'une partie de son corps concret, corps dont on sait qu'il est proscrit du domaine de la science objective. D'où ce fait paradoxal : une entité abstraite (dans la mesure où ce qualificatif s'applique bien aux objets des mathématiques) porte un nom dont la liaison avec l'un des organes des sens ne peut être ignorée.

Ce paradoxe qui, comme tous les paradoxes, n'en est pas entièrement un et peut donner lieu à une « explication », peut être éclairé par la considération de l'histoire du problème de l'observation tout au long de l'histoire de la physique et singulièrement au cours du *XIX^e* s. Par problèmes de l'observation il faut entendre une constellation d'interrogations qui ne cessent de resurgir, chaque fois que la science, qui se veut objective, en vient à douter de sa propre objectivité. Ces interrogations ont pris, au fur et à mesure que la physique déroulait son histoire, des formes diverses, allant de la distinction entre objet et sujet à la définition de ce que l'on entend par phénomène, allant tout aussi bien de la place de la conscience face au monde réel (?) à la dichotomie entre apparence et réalité, etc.

On sait que le principe de relativité (« il existe des points de vue équivalents sur le monde ») est ce qui

définit l'objectivité de la physique classique. « Je » n'est pas un élément singulier ; « je » appartient à une classe d'équivalence et ne se définit que de cette appartenance ; le « je » de la conscience est remplacé par une classe de sujets ; autrement dit, le sujet de la science n'est pas singulier mais multiple. Cette forme d'objectivité soumet les apparences mises sous forme algébrique aux contraintes d'invariance par changement de point de vue à l'intérieur de la classe d'équivalence (contraintes qui sont, elles, d'essence géométrique).

Sauf preuve du contraire, la physique du XIX^e s. s'est très bien passée de l'idée d'observateur ; la véritable entrée en scène du mot « observateur » est concomitante des problèmes posés à la fin du siècle par l'apparente incompatibilité entre le principe de relativité et la constance de la vitesse de la lumière, élément central de l'électromagnétisme de Maxwell. On trouve le mot chez Poincaré, par exemple ; mais Einstein ne l'emploie pas dans son article fondateur de 1905 ; à cet égard, il faut remarquer que si le mot « observateur » ne figure pas non plus dans l'exposé que fit Einstein de sa théorie en 1921 (*Les théories de la relativité restreinte et générale*), il apparaît, tout naturellement, comme un mot qui ne nécessite aucune explication, dans l'ouvrage écrit en 1936, à Princeton, en collaboration avec Infeld (*L'évolution des idées en physique*).

Que s'était-il passé entre-temps qui puisse expliquer cette substitution du mot observateur à celui plus « abstrait », moins anthropocentrique en tout cas, de système de référence ou référentiel ? D'où vient que les théories de la relativité d'Einstein qui élargissent en deux temps (1905 et 1916) la validité du principe de relativité, c'est-à-dire la légitimité du sujet multiple, élément d'une classe d'équivalence, soient, dans les années 1930, présentées par Einstein lui-même (même s'il est probable qu'Infeld ait rédigé une grande partie de l'ouvrage) en termes d'observateurs, c'est-à-dire d'individus ? C'est que les physiciens ont, entre 1918 et 1933, vécu une expérience qui a profondément modifié leur conception du monde : la construction de la théorie quantique. Or l'un des bouleversements majeurs apportés par la théorie quantique est l'idée que la séparation entre sujet et objet n'est pas aussi claire dans le domaine quantique que dans le domaine classique et qu'en particulier un phénomène ne saurait être décrit indépendamment de son observation.

On sait que c'est la conclusion à laquelle était arrivé Werner Heisenberg dans son article sur les relations d'indétermination : « Si l'on veut préciser ce qu'il faut entendre par l'expression "position d'un objet", par exemple pour un électron (relativement à un référentiel donné), alors on doit indiquer des expériences déterminées à l'aide desquelles on peut mesurer la "position de l'électron" ; autrement, ce mot n'a aucun sens » (W. Heisenberg, « Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik », 1927, cité par C. Chevalley dans le lexique qu'elle a ajouté à N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard « Folio-Essais », 1991). Ce thème a été longuement développé par Bohr qui, après avoir

affirmé qu'il est impossible de donner une définition d'un phénomène sans y inclure le dispositif expérimental qui permet de faire « apparaître le phénomène », va même jusqu'à dire qu'il est incorrect de parler de « la perturbation d'un phénomène introduite par l'observation » car il n'existe pas de phénomène indépendamment de son observation ; ce que nous nommons phénomène inclut toujours son observation ; et Bohr de citer quelques expériences de pensée au cours desquelles un même être apparaît sous forme corpusculaire ou sous forme ondulatoire, selon l'appareil utilisé pour le détecter. La question de l'observation, souvent identifiée à celle de la mesure (ce qui demanderait à être précisé), s'est donc trouvée au cœur des préoccupations des physiciens à partir de 1927.

En quoi consiste dès lors l'observation, ou la mesure, à supposer que les deux termes soient vraiment synonymes ? Une mesure en physique classique est une opération au terme de laquelle est assigné à une grandeur physique un nombre, résultat de la mesure, muni d'une marge d'imprécision en général caractéristique de l'instrument utilisé pour effectuer la mesure. Rien de tel dans le domaine quantique où, comme l'a montré l'expérience de Stern et Gerlach (mesure du moment magnétique d'atomes d'argent), la même mesure (même appareil, même objet sur lequel on effectue la mesure) peut donner plusieurs résultats (en l'occurrence deux) différents. Plus même, alors qu'en physique classique l'état d'un système est déterminé par la donnée (assortie des indéterminations expérimentales) des valeurs des diverses grandeurs physiques intéressant le système, dans le domaine quantique une telle détermination n'est plus possible. Pour deux raisons (qui sont d'ailleurs liées) ; premièrement parce que le résultat d'une mesure n'est pas unique, comme on vient de le dire ; deuxièmement, parce que les inégalités de Heisenberg (dites relations d'indétermination) rendent impossible de déterminer exactement (et ceci indépendamment des erreurs expérimentales) deux grandeurs, telles que la position et la quantité de mouvement, que pour cette raison on dit « incompatibles ». Très vite, il est apparu que non seulement le mot phénomène devait être redéfini, mais aussi que le processus de mesure lui-même devait être repensé.

Arthur Eddington (dans *New Pathways in Science*) définit ainsi ce changement dans la conception de l'opération de mesure : « Dans la théorie d'Einstein [rappelons que cette théorie est généralement considérée comme la dernière théorie classique], l'observateur est un homme qui part à la recherche de la vérité armé d'un mètre. En théorie quantique, il est équipé d'un crible. » En effet, en théorie classique la mesure d'une grandeur physique, dont celle d'une longueur avec un mètre est l'archétype, consiste à placer en regard l'un de l'autre l'objet à mesurer et l'instrument, portant des graduations, et à observer entre quelle et quelle graduation tombe l'extrémité d'un ruban (par exemple), l'autre extrémité ayant été (plus ou moins bien) mise en concordance avec l'origine de la

graduati. Toutes les opérations de mesure classiques sont de ce type ; qu'on songe à la mesure du poids avec une balance, celle d'un courant électrique avec un ampèremètre, celle d'une pression avec un manomètre, etc. On dit souvent que l'opération de mesure consiste en une comparaison (entre l'objet à mesurer et un étalon) ; c'est manquer une partie importante de l'opération ; en effet, la mesure (même classique) s'apparente bien plus à une sélection ; il s'agit de faire entrer l'objet à mesurer entre les dents d'une fourche (ne parle-t-on pas d'ailleurs d'un résultat de mesure en indiquant dans quelle « fourchette » il se trouve ?). Si l'on veut améliorer la mesure, on choisit une fourche aux dents plus rapprochées, ce qui permet, parmi les résultats de la première mesure situés à l'intérieur d'une certaine fourchette, de sélectionner ceux qui se situent à l'intérieur d'une fourchette plus étroite. Bien que ce ne soit pas l'usage, on peut parler à propos de la mesure classique de crible ; on fait passer le système sur lequel on veut effectuer une mesure à travers un crible et plus le crible est fin meilleure est la mesure.

Cette manière de décrire l'opération de mesure, inhabituelle en physique classique, est en revanche parfaitement adéquate en physique quantique. À ceci près, comme on va le voir, que l'idée d'un crible considéré comme un tamis ou une passoire dont on peut varier la taille des mailles, doit être remplacée par celle d'un crible-filtre, c'est-à-dire un instrument qui sélectionne les constituants d'un « mélange » et les sépare les uns des autres. Le prisme (qui permet à Newton de découvrir que la lumière blanche est un mélange de lumières des diverses couleurs) illustre bien ce qui caractérise un filtre en tant qu'opérateur. Lors de la traversée du prisme, la lumière blanche est décomposée (c'est le terme technique ; on pourrait aussi dire de façon métaphorique : dé mêlée) en lumières des diverses couleurs qui suivent des trajets différents dans le prisme, en sorte qu'à la sortie le bleu (par exemple) émerge en un point différent du rouge (toujours par exemple). La lumière qui ressort selon les divers « canaux » est une lumière sans mélange (du moins en principe). Cela veut dire que si sur le trajet du pinceau bleu émergeant du prisme on interpose un deuxième filtre (un deuxième prisme), le résultat obtenu sera le même qu'avec un seul prisme : il n'y a pas de rouge (ni d'autre couleur d'ailleurs) dans la lumière qui émerge du premier prisme le long du canal bleu.

Un instrument de mesure en théorie quantique fonctionne sur un principe similaire. Soit A le nom d'une grandeur physique que l'on veut mesurer. On sait qu'une mesure de A ne donne que rarement un seul résultat et en général plusieurs $A_1, A_2, \dots, A_n, \dots, A_n$. On en déduit que l'instrument qui mesure A doit faire apparaître comme séparées les diverses valeurs A_i et les diriger selon des « canaux » différents. La difficulté conceptuelle vient de ce que, contrairement à la mesure classique qui est un processus de tout ou rien (le bout du ruban tombe ou ne tombe pas entre deux graduations données), la mesure quantique sélectionne une multiplicité de valeurs. Se pose alors la question de

savoir ce qui lors d'une mesure (portant nécessairement sur un grand nombre d'objets microscopiques puisque l'instrument lui-même est de taille macroscopique) oblige tel objet bien particulier à emprunter le canal i plutôt que l'un ou l'autre des $(n - 1)$ autres canaux. Cette difficulté est redoublée du fait que, une fois sélectionné le canal i , la mesure effectuée sur le même objet redonne toujours la même valeur A_i de la grandeur A quand on la mesure avec l'instrument imaginé précédemment. Autrement dit, le fait d'avoir emprunté le canal i a modifié l'état de l'objet sur lequel on cherche à mesurer la grandeur A. Il a en quelque sorte été projeté sur un autre état, état que l'on qualifie d'état propre de A, dans la mesure où il est caractéristique de A (toutes les mesures redonnent le même ensemble de valeurs filtrées A_i) et où une nouvelle mesure de A effectuée sur le système dans cet état ne redonne jamais que A_i (et aucune des $(n - 1)$ autres valeurs).

On voit alors que la grandeur A en vient à s'identifier avec l'appareil qui la mesure, qui n'est autre que la matérialisation dans l'espace de l'ensemble de ses états propres. L'idée de Heisenberg et Bohr selon laquelle le phénomène ne peut être séparé de ses conditions expérimentales de réalisation se trouve ici poussée à l'extrême : la grandeur physique est définie par l'instrument qui la mesure. Cet instrument est lui-même un filtre, c'est-à-dire un opérateur de sélection (ou de projection). Rien d'étonnant dès lors à ce que la grandeur physique soit identifiée à un opérateur mathématique. Opérateur agissant dans ce qu'il est convenu d'appeler l'espace des états du système et projetant l'état du système sur l'un des états propres de la grandeur considérée, c'est-à-dire sur ce qu'en mathématiques on appelle les vecteurs propres de l'opérateur.

Reste à comprendre pourquoi le nom d'observable fut dévolu à cet opérateur, à la grandeur physique qu'il représente (et définit). Le fait que ce que l'on observe, c'est-à-dire mesure, est l'ensemble des valeurs propres que définit l'instrument de mesure (parfaitement observable, lui, car il est de taille macroscopique), a certainement dû jouer un rôle dans cette désignation d'un opérateur par un mot dont la référence à l'« observateur » est évidente. Que cet observateur apparaisse ici non pas comme une personne singulière mais comme un multiple (élément d'une classe d'équivalence) ne fait aucun doute puisque c'est un appareil, et non un être humain, qui intervient dans la définition de l'« observable ». En ce sens l'exigence d'objectivité semble avoir été préservée. En fait, la mesure, lorsqu'on l'étudie plus en détail, pose de tels problèmes conceptuels (selon quel type d'évolution un état d'un système est-il projeté brusquement sur un état propre de la grandeur à mesurer ?) qu'on en est venu à relâcher quelque peu cette contrainte d'objectivité ; certains, et non des moindres, ont même été jusqu'à faire entrer la conscience de l'observateur dans le processus de mesure. Si bien qu'au bout du compte, l'introduction du mot observable apparaît plutôt comme une tentative pour se raccrocher à l'objectivité

telle qu'elle avait été définie par Galilée et la physique classique, en dépit des difficultés que pose la théorie quantique. La dénomination « observable » apparaît alors comme un moyen d'écarter tout danger de dérive du côté de la subjectivité, de la nonobjectivité (classique). Procédure qui relève plus de la pensée magique que de la connaissance rationnelle, dans la mesure où elle repose sur une dénégation, comme s'il suffisait de nier un danger pour qu'il disparaisse.

► EDDINGTON A., *New Pathways in Science*, Cambridge, 1935 (trad. fr., Paris, Hermann, 1936). – EINSTEIN A., *Über die Spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie Gemeinverständlich*, Braunschweig, Vieweg, 1917 (trad. fr., M. Solovine, *Les théories de la relativité restreinte et générale*, Paris, Gauthier-Villars, 1988). – EINSTEIN A. & INFELD L., *Das Abenteuer der Physik*, trad. fr. M. Solovine, *L'évolution des idées en physique*, Paris, Flammarion, 1982. – PENROSE R., *The Emperor's New Mind*, Oxford Univ. Press, 1992. – WEYL H., *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton Univ. Press, 1947. – WHEELER J.A., « Include the observer in the wave function ? », in LEITE LOPEZ J. & PATY M. éd., *Quantum Mechanics, a Half Century Later*, Dordrecht, Reidel, 1977. – WHEELER J.A. & ZUREK W.H. éd., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton Univ. Press, 1983.

Françoise BALIBAR

→ Controverse Bohr-Einstein; Équivalence (Principe d'); Mesure en mécanique quantique; Quantique.

ONCOGÈNE

Les oncogènes sont les gènes dont une modification de structure ou de niveau d'expression – c'est-à-dire de l'efficacité avec laquelle ils donnent naissance aux protéines pour lesquelles ils codent – peut participer à la formation de cancers. Aujourd'hui les travaux sur les oncogènes constituent certainement le domaine de recherches le plus actif en cancérologie fondamentale. Cela n'a rien de surprenant : à chaque époque, les biologistes ont vu l'origine du cancer dans l'objet qui se trouvait privilégié par les recherches. Le XIX^e s. s'intéressa, à la suite de Virchow, à l'origine cellulaire du cancer et à la caractérisation de la cellule cancéreuse. Les biologistes de la fin du XIX^e s. et du début du XX^e s. cherchèrent – et parfois crurent trouver – les bactéries responsables de la formation des cancers.

L'idée que des modifications de gènes pouvaient être responsables de l'apparition des cancers est aussi ancienne que la génétique. S'appuyant sur de nombreuses observations faites chez l'homme ou chez l'animal, elle s'opposa longtemps à deux autres théories qui voyaient l'origine du cancer dans l'action des virus ou dans celle des produits toxiques de l'environnement.

La théorie « environnementale » et la théorie génétique du cancer se rejoignirent au début des années 1970 quand Bruce Ames montra que la grande majorité des agents chimiques cancérogènes étaient, spontanément ou après transformation par l'organisme, capables d'interagir avec l'ADN et de provoquer la

formation de tumeurs. Théorie virale et théorie génétique du cancer convergèrent à leur tour en 1976 quand Dominique Stehelin, Harold Varmus et Michael Bishop démontrèrent, grâce aux nouveaux outils du génie génétique, que le matériel génétique cancérogène porté par les virus était dérivé du génome des organismes infectés. Ces oncogènes cellulaires sont des ennemis de l'intérieur, des gènes dont la mutation ou la dérégulation peut provoquer la formation de cancers.

Deux résultats frappèrent les esprits et contribuèrent à la rapide victoire de la nouvelle théorie : ces oncogènes sont en nombre limité – l'on retrouve les mêmes oncogènes chez des animaux différents ou dans des cancers d'origines tissulaires différentes – et ils appartiennent tous à un même ensemble de gènes dont le rôle est de coder pour les protéines et les enzymes qui permettent aux signaux venus des cellules environnantes et de l'ensemble de l'organisme d'adapter le taux de division cellulaire aux besoins de cet organisme.

Depuis ces premières découvertes, le nombre des oncogènes s'est accru. Sont venus s'ajouter les anti-oncogènes ou gènes suppresseurs de tumeurs, dont le rôle est de freiner la division cellulaire et dont seule l'inactivation conduit à la formation de cancers. Les gènes qui contrôlent la mort cellulaire peuvent aussi, après mutation, se transformer en oncogènes : la mort cellulaire est un des moyens que l'organisme utilise pour rejeter les cellules anormales, mutées. L'inhibition de la mort cellulaire favorise la formation de ces cellules anormales, potentiellement cancérogènes.

La découverte des oncogènes avait laissé espérer des progrès rapides dans le diagnostic des cancers et, peut-être, dans leur guérison par thérapie génique. L'augmentation du nombre des oncogènes et des anti-oncogènes a démontré la complexité des voies et des réseaux de régulation qui assurent le contrôle de la division cellulaire. Complexité qui rend difficile l'interprétation des très nombreuses observations accumulées sur les modifications des oncogènes dans les cancers humains, et le choix des cibles pour une intervention thérapeutique.

Cette difficulté d'intégrer les très nombreuses observations faites au niveau moléculaire et génétique n'est pas propre à l'étude du cancer. Elle est représentative des limites actuelles de la compréhension moléculaire du vivant. L'enjeu dans le domaine du cancer – la guérison – n'en rend que plus criant le décalage entre la précision et la qualité des observations et la pauvreté des moyens thérapeutiques engendrés par cette connaissance. Même si les études moléculaires du cancer se développent au cours des prochaines années, sa guérison reposera encore probablement assez longtemps sur l'usage de méthodes largement empiriques – chirurgie, utilisation des rayonnements, chimiothérapie – dont l'efficacité ne dérive pas des connaissances moléculaires accumulées ces dernières années.

Le développement d'un tumeur cancéreuse est un processus qui concerne l'organisme entier : l'étude des oncogènes n'en a révélé que le pan moléculaire, à peine cellulaire.

► FUJIMURA J.H., *Crafting Science : A Sociohistory of the Quest for the Genetics of Cancer*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1996. – MORANGE M., « The Discovery of cellular oncogenes », *Hist. Phil. Life Sci.*, vol. 15, 1993, p. 45-59. – « From the regulatory vision of cancer to the oncogene paradigm », *J. Hist. Biol.*, vol. 30, 1997, p. 1-27. – VARMUS A. & WEINBERG R.A., *Genes and the Biology of Cancer*, New York, Scientific American Library, 1993.

Michel MORANGE

→ ADN; Biotechnologies; Gène; Rétrovirus.

OPÉRATIONNALISME

On attribue à Percy W. Bridgman (*The Logic of Modern Physics*, 1927) l'élaboration explicite du point de vue opérationnaliste voulant que tout concept scientifique soit déterminé par l'ensemble des opérations qui lui sont associées et qui régissent son application effective. Bridgman eut à préciser et modifier plusieurs aspects de ses conceptions (en particulier : « A Physicist's Second Reaction to Mengenlehre », *Scripta Mathematica*, n° 2, 1934; *The Nature of Physical Theory*, 1936; « The Nature of Some of Our Physical Concepts », *The British Journal for the Philosophy of Science*, n° 1, 1951), lesquelles eurent un large écho autant dans le domaine des sciences physiques d'où elles provenaient que dans celui des sciences humaines. On retrouvera dans *The Validation of Scientific Theories* (P. Frank, 1957) un bon aperçu des débats qui entourèrent à l'époque les thèses opérationnalistes. L'opérationnalisme eut à subir d'importantes critiques de la part du mouvement empiriste logique et les thèses opérationnalistes perdirent de leur vigueur avec l'implantation, vers la fin des années 1950, d'un modèle canonique des théories scientifiques qui envisageait ces dernières comme des systèmes axiomatiques pourvus d'une interprétation empirique partielle et indirecte, modèle qui représentait en fait l'abandon des exigences opérationnalistes considérées comme trop restrictives en ce qui a trait à la détermination des concepts en science.

Les motivations mêmes, la formulation exacte et le statut épistémologique des prises de position opérationnalistes ont fait d'emblée l'objet de controverses. Bridgman était réticent à voir dans l'opérationnalisme une méthodologie à part entière (il préférait utiliser l'expression « operational analysis »); dans son esprit, ses positions reflétaient simplement la pratique des physiciens suite à l'avènement de la théorie restreinte de la relativité; l'exigence d'opérationnalisation des concepts était pour lui la position généralement adoptée suite au sort fait aux notions d'espace et de temps absolus dans cette même théorie. Grünbaum (*in* Frank, 1957) a fait remarquer avec justesse que ce n'est pas l'impossibilité d'accorder un sens opératoire aux concepts d'espace et de temps absolus, mais bien la prise en compte théorique de la vitesse finie de la

lumière qui a forcé la révision de la notion de simultanéité employée en mécanique prérelativiste.

Les empiristes logiques tels Carnap et Hempel ont tôt fait de souligner les affinités de l'opérationnalisme avec les aspects sémantiques de leur propre programme (qui exigeait de s'assurer que tous les termes d'une théorie scientifique donnée soient pourvus d'une interprétation empirique), alors que d'autres ont plutôt fait un rapprochement avec le pragmatisme (l'opérationnalisme rapportant le sens des termes scientifiques à un ensemble d'opérations, d'activités, et non à un ensemble de propriétés d'objets).

Dans sa version stricte (« Un concept est identifiable à son ensemble correspondant d'opérations »), l'opérationnalisme rappelait certes une certaine forme de « vérificationnisme ». La question s'est rapidement posée de savoir ce qui pouvait compter comme « opération ». Bridgman, quant à lui, incluait non seulement des opérations reliées à la mesure, mais aussi des opérations ou calculs mathématiques reliés à des déterminations de valeur, et même, en toute généralité, des « opérations verbales ». Une telle prodigalité au niveau de l'acceptation du terme « opération » ne pouvait qu'affaiblir de façon essentielle, sinon trivialisait la thèse opérationnaliste. Un autre volet de la question porte sur la notion de « définition opérationnelle ». Dans son analyse de la définissabilité des termes scientifiques, l'empirisme logique considérait que déjà à un niveau très élémentaire, celui des soi-disant termes de disposition (tels « soluble » ou « agressif ») qui abondent en science, la mise en relation des concepts à des opérations directement reliées à l'observation ne constituait pas une définition au sens où l'entend la logique formelle. Ainsi, un exemple simple de définition explicite d'un terme T sur la base d'un terme O serait un énoncé qui a la forme logique suivante : « $\forall x (Tx \equiv Ox)$ ». Or la réduction, par exemple, d'une disposition T à un ensemble S de stimuli observables et un ensemble R de réactions observables (selon le schéma behavioriste) aurait la forme logique : « $\forall x [Sx \supset (Tx \equiv Rx)]$ ». Un tel énoncé pourrait tout au plus être considéré comme une définition partielle du terme T, puisque celui-ci n'est aucunement défini pour les objets non soumis aux conditions initiales S (en vertu de l'interprétation vérificationnelle du connecteur \supset). On parla d'abord d'« énoncés de réduction » (Carnap, 1936-1937) plutôt que de « définitions », pour enfin abandonner toute restriction sur la forme logique que peuvent prendre de tels énoncés; les définitions opérationnelles furent alors considérées comme des « règles de correspondance » établissant des liens mi-nomologiques, mi-heuristiques entre des termes « théoriques » et des termes directement reliés à l'observation.

De façon plus générale, l'empirisme logique jouait qu'un opérationnalisme strict allait à l'encontre de la pratique scientifique en ce que : a) Un seul et même concept scientifique peut être associé à différentes procédures expérimentales : on considère alors que ces différentes opérations sont autant de modèles de mesure d'une même valeur, alors qu'un opérationnalisme strict serait

tenu de voir, par exemple, autant de concepts différents de « température » qu'il y a de façons différentes de mesurer une température. b) Les concepts scientifiques ont un « caractère ouvert », c'est-à-dire qu'on considère possible et surtout avantageux que de nouvelles procédures expérimentales puissent être découvertes pour un seul et même concept. c) Certains concepts « théoriques » en science ne sont associés à aucune procédure expérimentale.

Dans la mesure où les considérations d'ordre sémanticoformel conservent leur pertinence, les critiques que rencontre en retour l'approche empiriste logique n'enlèvent rien à la portée de celle qu'elle a adressée à l'opérationnalisme. Quant au volet pragmatiste des thèses opérationnalistes, Bridgman aimait souligner que son point de vue promulguait une notion de vérité qui se rapporte ultimement à des actions. On a pu à ce sujet comparer les conceptions de Bridgman à celles de Ch.S. Peirce (Chauviré, 1986), bien que des rapprochements avec Helmholtz (Helmholtz, 1867) soient tout aussi possibles.

► CARNAP R., « Testability and Meaning », *Philosophy of Science*, n° 3, 1936, p. 419-471 ; n° 4, 1937, p. 1-40. — CHAUVIRÉ C., « De Cambridge à Vienne. La maxime pragmatiste et sa lecture vérificationniste », in SEBESTIK J. & SOULEZ A. éd., *Le Cercle de Vienne. Doctrines et controverses*, Paris, Klincksieck, 1986, p. 43-58. — FRANK P. éd., *The Validation of Scientific Theories*, Boston, Beacon Press, 1957. — HELMHOLTZ H. VON, *Optique physiologique*, trad. fr. E. Javal & Th. Klein, Paris, Masson, 1867 (rééd. Paris, J. Gabay, 1989). — HEMPEL C.G., *Foundations of Concept Formation in Empirical Science*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1952. — TUOMELA R., *Theoretical Concepts*, Vienne, Springer, 1973.

Jean LEROUX

→ Bunge ; Carnap ; Cercle de Vienne ; Concept ; Vérification.

ORIGINES DE LA VIE

La question des origines de la vie a retenu l'attention des premiers philosophes présocratiques. Les interrogations initiées alors sont restées pendant plusieurs siècles la prérogative des métaphysiciens et des théologiens. Ce domaine est aujourd'hui encore considéré par la majorité de la communauté scientifique comme un problème à part, bien que les recherches expérimentales se soient considérablement développées ces quarante dernières années.

De l'Antiquité à l'âge classique

De Thalès à Socrate (VI^e-V^e s. av. J.-C.) trois grands systèmes de pensée ont donné naissance à la philosophie et à la science : 1) L'École ionienne, fondatrice du savoir rationnel, suppose un élément originel, l'eau, « à partir de laquelle toutes les choses sont composées ». 2) Au contraire, pour l'École pythagoricienne, l'origine de toute existence est à rechercher dans l'Un, source

des nombres, entités numériques ou monades fondées sur l'opposition des contraires. 3) Empédocle d'Agrigente, de formation pythagoricienne, considère quant à lui que la première génération est constituée de membres séparés et disjoints ; la deuxième génération assemble ces membres « au hasard » ; la troisième forme enfin des êtres cohérents. Seuls les êtres viables sont conservés à la quatrième génération selon le principe de la génération sexuée (conception mécaniste, développée par les atomistes adhérents, Leucippe et Démocrite, considérés souvent comme les « précurseurs » antiques du matérialisme).

Aristote, quant à lui, envisage sans difficulté, le passage spontané de l'inerte au vivant, les objets inanimés et les êtres vivants étant constitués des mêmes éléments, de la même matière : « [...] parmi les animaux, les uns naissent d'animaux et présentent avec eux une parenté de forme, les autres ont une "génération spontanée" et ne viennent pas de parents semblables à eux-mêmes : il y en a qui naissent de la terre en putréfaction... » (*Histoire des Animaux*, V, 1, 539a). Ces conceptions se sont perpétuées tout au long du Moyen Âge jusqu'à la Renaissance.

Au XVI^e s. et au début du XVII^e les alchimistes se référent principalement aux textes bibliques pour fournir une explication à tous les phénomènes, à partir de la transformation de l'eau considérée comme la substance primordiale. Pourtant, en 1668, le naturaliste et poète italien Francesco Redi, sans toutefois se prononcer contre la « génération spontanée » des animaux, démontre par une série d'expériences que des larves de mouches ne peuvent apparaître spontanément dans un morceau de viande placé dans un bocal, si l'on a pris soin de le recouvrir de gaze. Au XVII^e s., la conception d'une nature « quasiment vivante » disparaît avec les débuts de la science moderne. Avec Descartes apparaît une nouvelle philosophie, un nouveau système de pensée où la nature est une matière qui se transforme sous l'effet d'une impulsion initiale, puis qui se conserve et se transmet selon des lois naturelles. La matière étant identique dans tous les corps du monde, les êtres ne diffèrent des choses que par l'agencement même de cette matière.

En réaction aux idées de Descartes, qui considère la matière comme inerte, et le vivant mécanique (animal-machine), les XVIII^e et XIX^e s. seront tentés par le réductionnisme souvent présenté comme matérialiste. Le XVIII^e s. « invente » également le vitalisme et l'hylozoïsme (1765), doctrine selon laquelle toute matière est vivante.

Le XVIII^e s. et le passage de la matière inerte à la matière vivante

La physique de Newton, bien que demeurant largement mécaniste, diffère beaucoup de la physique cartésienne et se traduit en biologie par la nécessité de se référer à l'expérience.

La chimie considère que la matière est composée de

particules ayant une certaine affinité : « Les petites particules des corps n'ont-elles pas certaines vertus ou forces par où elles agissent à certaines distances [...] les unes sur les autres pour produire les phénomènes de la nature ? » écrit Newton dans son *Traité d'optique*. Cette affinité entre les particules, combinée aux mouvements et chocs, permet une conception, à la fois, chimique et mécanique de la vie.

Leibniz influence également la pensée biologique de ce siècle par l'intermédiaire de la force dynamique (qui remplace l'inertie cartésienne) et qui confère une activité propre à la matière, éliminant ce qu'il y a de passif dans la matière purement étendue. Le XVIII^e s. fut une période particulièrement importante de l'histoire de la pensée. C'est pendant ce siècle que furent réellement posées les bases d'une explication des origines du monde et de la vie.

Buffon propose une histoire physique du monde, esquissée pour la première fois en dehors de tout contexte théologique et biblique. C'est autour de l'*Histoire Naturelle* que se livre, dès 1749, l'une des premières batailles de la « guerre » philosophique de ce siècle. Buffon violemment attaqué en tant que matérialiste conçoit la construction des animaux et des végétaux à partir de molécules organiques vivantes, sous l'effet d'une sorte d'attraction analogue à l'attraction newtonienne. Cette idée de l'unité de la nature est reprise par Diderot dans l'article « Animal » de l'*Encyclopédie*. Opposé à la dualité, matière et esprit, Diderot suppose une unité matérielle de la nature, de la matière inerte au vivant sensible, et exprime remarquablement dans l'*Interprétation de la nature* d'abord, puis dans les *Entretiens* et dans le *Rêve de d'Alembert*, l'idée selon laquelle la nature est une, et contient en elle-même les principes de son autodétermination, c'est-à-dire le refus du concept créationniste et de la téléologie (Maurel, 1997).

Le matérialisme « dynamique » de Diderot a contribué à éliminer la question théologique de la création et met au jour, de ce fait, un nouveau champ épistémologique. Cependant, les conceptions de Buffon et de Maupertuis sont associées à celle de la « génération spontanée » illustrée par les travaux de l'abbé John Tuberville Needham. En 1795, Lazaro Spallanzani reproduit les expériences de Needham sur la génération spontanée des mouches dans un bocal, en soumettant les fioles à un chauffage plus long et en fermant plus efficacement les flacons par étirage du col à la flamme, il prouve qu'aucun animalcule n'apparaît spontanément dans de telles conditions. Ce n'est pourtant qu'un siècle plus tard que la question fut tranchée à la suite des résultats présentés par Pasteur.

Au XIX^e s., le problème des origines de la vie sur Terre devient un sujet d'intérêt scientifique

La conjonction de trois événements scientifiques majeurs (l'hypothèse de Kant-Laplace qui considère la Terre comme porteuse d'une histoire liée à l'évolution

des arrangements de la matière, la théorie darwinienne de l'évolution et les expériences de Pasteur montrant la présence des micro-organismes dans l'air) permet alors de poser de problème de la manière suivante : des organismes simples ont dû apparaître sur Terre en l'absence d'organismes préexistants, mais nous n'avons pas de « preuve » que la vie même dans sa forme la plus simple, ait pu se développer à partir de matière inanimée. Comment rendre compte alors de l'apparition de la vie sur la Terre dans des conditions naturelles ? À l'issue du débat entre Pasteur et Pouchet deux conceptions principales s'opposent : la panspermie qui considère que la vie est éternelle et la biogenèse évolutive, selon laquelle la vie est apparue progressivement à partir de la matière minérale. La panspermie, approche rigide du dilemme pastorien, nie l'origine temporelle de la vie et suggère que la Terre aurait été, en des temps lointains, ensémencée par des germes de vie venant du cosmos. En cette fin de XIX^e, Hermann von Helmholtz (1871), lord Kelvin (1871) ou Svante Arrhenius (1903) développent cette thèse. En France, le botaniste Gaston Bonnier sera l'un de ses plus ardents partisans. Finalement, à partir des années 1910, les travaux expérimentaux de Paul Bequerel démontrent que dans les conditions drastiques du milieu cosmique aucune forme de vie connue dans la nature ne survivrait. Ces résultats favorisèrent alors l'abandon de cette théorie. La proposition plus récente de Hoyle et Wickramasinghe (1979) n'a obtenu qu'un succès restreint ; quant à Crick et Orgel (1973) ce n'est que par provocation qu'ils ont remis cette théorie en lumière.

À l'opposé de cette première conception, d'autres ont imaginé la transformation graduelle des composés du carbone conduisant, dans les conditions de la Terre primitive, à la fabrication d'organismes extrêmement simples. Cette idée est à la base de la théorie protoplasmique et d'une théorie de l'évolution prébiotique soutenue par des biologistes éminents comme Ernst Haeckel (1866), Thomas Huxley (1868), Carl Nägeli (1884), Eduard Pflüger (1875) et Giglio-Tos (1900). Ils furent les véritables initiateurs des travaux actuels dans le domaine de l'évolution prébiotique. À la fin du XIX^e s. et dans les toutes premières années du XX^e, les particules vivantes de protoplasme portent plusieurs noms : ce sont les « gemmules » de Darwin, les « monères » ou « plastidules » de Haeckel, les « micelles » de Nägeli. Mais il faut attendre les années 1920 pour que les détails d'un mécanisme de formation du protoplasme, et par conséquent des protéines qui le composent à partir de la matière inorganique, soient proposés.

Vers une formulation en termes modernes

En 1924, un jeune biochimiste soviétique, spécialiste de physiologie végétale, Alexandre Ivanovitch Oparin (1894-1981), publie un petit ouvrage intitulé *L'Origine de la vie*. Dans une perspective pluridisciplinaire et matérialiste, il présente un modèle dans lequel l'apparition de la vie est conçue comme un phénomène

progressif qui s'intègre dans l'histoire de l'évolution du globe. Ce texte présente les fondements de la théorie qu'il soutiendra toute sa vie. La matière vivante contenant les mêmes éléments que la matière inerte, sa structure n'est donc pas, selon lui, responsable de la distinction entre l'inerte et le vivant. Pour Oparin, la solution réside dans l'étude du protoplasme qui « détient le secret de la vie ». Il estime que les protéines en solution colloïdale peuvent constituer des structures proches du protoplasme primitif.

Ainsi, des composés hydrocarbonés se seraient formés dans l'atmosphère primitive. Le refroidissement du globe aurait conduit à la condensation de la vapeur d'eau en « un océan primordial bouillant » contenant des molécules organiques variées. Dans ce milieu privilégié, de nouvelles réactions auraient produit des particules complexes formées d'hydrocarbures et de protéines. Au sein de cette solution colloïdale, des gouttes de matière organique se seraient isolées ; elles auraient été, pour Oparin, les premiers organismes. De telles structures pouvaient, selon lui, croître, se diviser, et incorporer d'autres. Ce dernier aspect, de caractère darwinien, conduit progressivement, à travers la sélection, au perfectionnement de ces êtres primitifs.

En 1929, le biologiste britannique John Burdon Sanderson Haldane (1892-1964), sans connaître les travaux d'Oparin (à qui il cédera plus tard l'antériorité de ces idées) signe un court texte intitulé *L'Origine de la vie*. L'approche du savant britannique est riche en données de biologie moderne, telles que des notions sur les virus ou les gènes. Se référant à des synthèses de sucres et d'acides aminés réalisées à partir d'un mélange d'eau, de dioxyde de carbone et d'ammoniac soumis à un rayonnement ultra-violet, il imagine que « les premières créatures vivantes ou semi-vivantes furent probablement de grandes molécules synthétisées sous l'influence des radiations solaires, et seulement capables de se reproduire dans le milieu très favorable dans lequel elles se formèrent ».

En 1936, Oparin approfondit sa théorie dans un nouvel ouvrage largement diffusé, notamment lorsqu'il paraît deux ans plus tard en langue anglaise. La planétologie comparée lui permet d'affirmer que l'atmosphère primitive devait être réductrice et il en exclut le dioxyde de carbone. Par ailleurs, depuis 1924, ses arguments fondés sur la notion de protoplasme sont renforcés par les résultats obtenus par le Belge Bungenberg de Jong. Ce dernier réalise la synthèse de structures, les *coacervats*, qui, selon Oparin, peuvent préfigurer les premières cellules au métabolisme hétérotrophe et la reconstitution de la vie en laboratoire.

À partir des années 1950,
le développement de la chimie prébiotique

Autour des années 1950, un nouveau champ expérimental se dessine. Des chimistes tentent des synthèses organiques dans des conditions dites primitives. Ces expérimentations ont pour but de déterminer les pre-

mières étapes de l'apparition de la vie. Ainsi, en 1951, le chimiste américain Melvin Calvin bombarde, grâce à un cyclotron, une solution de dioxyde de carbone radioactif et obtient des composés réduits. Simultanément, à partir de données de planétologie comparée, un autre Américain, Harold Urey, propose les caractéristiques d'un milieu primordial réducteur et suggère que « la production expérimentale de composés organiques à partir d'eau et de méthane en présence de lumière ultraviolette appartenant approximativement au spectre de distribution de la lumière solaire pourrait être profitable ».

Un an après, en 1953, la revue *Science* publie un article de Stanley Miller, jeune étudiant de Urey. Celui-ci expose un mélange de méthane, d'ammoniac, d'eau et d'hydrogène à des décharges électriques, pendant une semaine, et obtient plusieurs acides aminés. Par la suite, de multiples synthèses sont effectuées en respectant des conditions réductrices analogues et de nombreux auteurs s'illustrent dans ce nouveau domaine de la chimie prébiotique. Ils produisent notamment des acides aminés et des sucres et étudient le rôle de molécules intermédiaires telles que le formaldéhyde et l'acide cyanhydrique. Au-delà des synthèses de monomères des polymérisations sont tentées. Ainsi, en 1958, S.W. Fox et K. Harada utilisent la chaleur pour condenser des acides aminés et obtiennent des « protéinoïdes ». Ces structures, en solution dans l'eau chaude, se condensent en « microsphères ». Pour beaucoup elles évoquent les bactéries actuelles ou les microfossiles primordiaux observés par les paléontologistes (Schopff, 1983).

En 1961, Juan Oro inaugure une nouvelle voie en synthétisant de l'adénine à partir d'acide cyanhydrique. Par la suite, la biologie moléculaire ayant révélé l'importance de l'ADN et de l'ARN, la chimie prébiotique explorera les voies de synthèses de bases et de nucléosides. Enfin, dans les années 1980, on conçoit un monde primordial, dit de l'ARN, dans lequel cet acide nucléique serait apparu le premier et aurait été capable d'assurer la survie et la reproduction de l'ancêtre commun à toutes les cellules (Gilbert, 1986).

Toutes ces expérimentations s'inscrivent dans un contexte paradigmatique au sens de Kuhn. Sur le plan scientifique les auteurs travaillent à vérifier et à compléter la théorie initialement proposée par Urey. D'un point de vue institutionnel, une communauté s'est rapidement organisée. Dès 1956, un premier congrès se tient à Moscou et les principaux théoriciens et expérimentateurs définissent les limites de ce nouveau domaine de recherche. En 1968, avec le soutien de la NASA, l'International Society for the Study of the Origin of Life est créée. L'ISSOL avec ses publications associées successives et ses congrès constitue l'institution dominante qui contribue à définir la théorie officielle. Durant les dernières décennies l'essor de la bioastronomie et de l'exobiologie a montré que d'autres institutions, telles que le CNES ou l'ESA, consacrent une part de leurs programmes à des recherches sur les origines de la vie.

Les fondements de la problématique actuelle

Au début des années 1980, des études révèlent que l'atmosphère primitive pouvait contenir du CO₂. Cette remise en question d'un précepte fondamental permet un renouvellement du champ d'application des résultats de la chimie prébiotique. À partir de cette période, la théorie du Britannique Graham Cairns-Smith, datant des années 1960, trouve un nouvel écho. Il suggère, reprenant une idée chère à John Desmond Bernal dès les années 1940, qu'un support argileux aurait pu jouer le rôle de catalyseur et initier la périodicité de molécules primitives. Selon lui, un matériel originel de nature géochimique aurait été supplanté en plusieurs étapes par des acides nucléiques organiques. Cette perspective est prolongée par les travaux sur la recherche d'analogues menée par l'école animée par Leslie Orgel. Enfin, depuis 1988, Günther Wächterhäuser, soutenu par Karl Popper, défend l'idée qu'un support minéral, la pyrite, aurait permis la formation de molécules organiques et le développement autotrophique d'un métabolisme de surface primitif.

En outre, aux apports de la chimie prébiotique les débats actuels confrontent des données issues de domaines variés, tels que les études spatiales, les simulations informatiques, les recherches théoriques ou biomimétiques sur l'auto-organisation. Ainsi, l'édification de modèles modernes confirme que la compréhension des origines de la vie repose sur la nécessité d'une approche pluridisciplinaire.

► ARRHENIUS S., *L'Évolution des mondes* (1903), trad. T. Seyrig, Paris, Béranger, 1910. — BERNAL J.D., *The Physical Basis of Life*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1951. — BUFFON G.L. LECLERC DE, *Histoire naturelle générale et particulière*, Paris, Imprimerie royale, puis hôtel de Thou, puis chez Plassan, in-4°, 45 vol., 1749-1804. — BUNGENBERG DE JONG H.G., « Die Koacervation und ihre Bedeutung für die Biologie », *Protoplasma*, 1932, 15, p. 110-1176. — CALVIN M., *et al.*, *Science*, 1951, vol. 114, p. 416-418. — CRICK & ORGEL, « Directed panspermia », *Icarus*, 1973, 19, 341-346. — DIDEROT D., « Animal », *Encyclopédie*, Paris, GF-Flammarion, 1986 ; *De l'interprétation de la Nature*, Paris, Éd. Sociales « Classiques du Peuple », 1971 ; *Le Rêve de d'Alembert*, in *Le néveu de Rameau et autres dialogues philosophiques*, Paris, Gallimard « Folio », 1984. — FOX S.W. & HARADA K., *Science*, 1958, vol. 128, p. 1214. — GIGLIO-TOS E., *Les Problèmes de la vie*, Cagliari, chez l'auteur, 4 vol., 1900-1912. — GILBERT W., *Nature*, 1986, vol. 319, p. 618. — HAECKEL E., *Loi biogénétique fondamentale*, 1866. — HALDANE J.B.S., « The Origin of Life », *The Rationalist Annual*, 1929. — HELMHOLTZ VON, *On the origin of the planetary system* (1871), in *Popular lectures on scientific subjects*, vol. 2, trad. E. Atkinson, Londres, p. 139-197, 1893. — HUXLEY T.H., *La Base physique de la vie* (1868), in *Les Problèmes de la biologie*, Bibliothèque Scientifique Contemporaine, Baillière & fils, 1892. — KAMMINGA H., « Historical perspective : The problem of the origin of life in the context of development in biology », *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 1988, 18, p. 1-11 : « The origin of life on the Earth : theory, history and method », *Uroboros*, 1991, vol. 1, 1, p. 95-110. — MAUREL M.C., « Le passage de la matière inerte à la matière vivante et les débuts de l'approche scientifique », *Recherches sur Diderot et l'Encyclopédie*, 1997. — MILLER S.L., *Science*, 1953, vol. 117, p. 528-529.

— NÄGELI C.W. VON, *A mechano-physiological theory of organic evolution*, trad. C.A. Waugh, Chicago, Open Court Publ. Co., 1884. — OPARIN A.I., *The Origin of Life* (1924), in BERNAL J.D., *Origin of Life*, Londres, Weidenfeld & Nicholson, 1967, p. 199-234 ; *The Origin of Life* (1936), trad. angl. S. Margulis, New York, MacMillan Co., 1938. — ORO J., *Biochem. Biophys. Research. Comm.*, 1960, 2, 407. — PFLÜGER E., « Über die physiologische verbrennung in den lebendigen organismen », *Archiv für gesammte physiologie*, 1875, vol. 10, p. 251-367. — POPPER K., « Pyrite and the origin of life », *Nature*, 1990, p. 344-387. — SCHOPFF J.W. éd., *Earth's earliest biosphere : its origin and evolution*, Princeton Univ. Press, 1983. — THOMSON W. (lord Kelvin), *Presidential address to the British Association for the Advancement of Science, assembled at Edinburgh*, Londres, 1871. — UREY H.C., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1952, vol. 38, p. 351-363.

Marie-Christine MAUREL et Stéphane TIRARD

→ ADN ; Gène ; Génération spontanée ; Pasteur contre Pouchet ; Plasma germinatif.

OROGENÈSE

Le mot et le concept

Le mot orogénèse qui désigne la phase « au cours de laquelle s'édifient les reliefs terrestres » n'apparaît qu'au début de ce siècle (Haug, 1907). Le terme de tectonique, pour la science qui s'occupe de la structure de l'écorce terrestre, le précède de peu. On trouve cependant chez Littré (1868) le mot orogénie pour englober « la formation des montagnes ». Mais, bien entendu, les notions correspondantes sont plus anciennes.

On peut donner comme date de naissance de la tectonique le long mémoire présenté le 22 juin 1829 par Léonce Élie de Beaumont (1798-1874) devant l'Académie des sciences, sous le titre : *Recherches sur quelques-unes des révolutions de la surface du globe, présentant différents exemples de coïncidence entre le redressement des couches de certains systèmes de montagnes et les changements soudains qui ont produit les lignes de démarcation qu'on observe entre certains étages consécutifs des terrains de sédiment*. Par sa longueur, ce titre résume bien la problématique de l'auteur. On se situe dans le cadre catastrophiste des « révolutions du globe » telles que Cuvier (1769-1832) les envisage, et qui se traduisent par des changements « soudains » de faune entre « étages successifs de terrains de sédiment ». Et l'on désire mettre en relation ces lignes de démarcation avec les redressements des couches des montagnes. L'idée directrice, formulée avec prudence, étant que les soulèvements ont produit « pour le moins » des déplacements (façon de ne pas évoquer les destructions) dans le lieu d'habitation de certains êtres organisés.

Concernant la formation des montagnes, Élie de Beaumont note qu'elle a été successive : les redressements datent de plusieurs époques différentes, chacune marquée par un défaut de parallélisme entre les couches antérieures et les dépôts postérieurs. L'auteur désigne ainsi ce que nous nommons des discordances

angulaires, qui lui permettent de distinguer autant de « systèmes de montagnes ». La brusquerie du redressement se reconnaît à l'absence de lacune entre les couches relevées et les couches restées horizontales. Par ailleurs, les chaînons parallèles ont été produits « d'un seul jet ». Ce parallélisme jouera un rôle essentiel dans la suite de la théorie. Enfin, quoique « la cause du redressement ne soit pas entrée pas dans l'objet de [son] travail », l'auteur rappelle les deux principales solutions : affaissement ou soulèvement. Mais très vite il optera pour le « refroidissement séculaire » de l'intérieur du globe qui « doit mettre leurs enveloppes dans la nécessité de diminuer sans cesse de capacité, malgré la constance presque rigoureuse de leur température, pour ne pas cesser d'embrasser leurs masses internes dont la température décroît insensiblement » (L. Élie de Beaumont, in H.T. de La Bèche, *Manuel géologique*, 1833, p. 665). Le refroidissement entraîne deux conséquences : l'écorce se plisse pour s'adapter à la surface décroissante des masses internes ; son mouvement d'ensemble est un affaissement.

Le thème des soulèvements multiples n'est pas neuf. Sans remonter aux auteurs du siècle précédent, on peut citer un devancier immédiat : en 1824, Léopold de Buch (1774-1853) distinguait quatre systèmes différents de montagnes en Allemagne. Élie de Beaumont le félicite – en oubliant qu'Ami Boué (1794-1881) avait abouti à des conclusions analogues dès 1822, mais avait été contraint de publier en Allemagne, en 1827, ses vues trop neuves. Pourtant le sens des soulèvements n'est pas le même. Buch opte pour les soulèvements. Il conçoit la formation des montagnes par une intrusion de porphyre pyroxénique et enchaîne sur une théorie, destinée à un certain succès, dite des cratères de soulèvement : les cônes volcaniques munis de caldeira (Ténériffe, Vésuve, etc.) ne sont pas des projections émises par la bouche, mais des zones de soulèvement de l'écorce dont le cratère est la déchirure ; et les chaînes montagneuses, des soulèvements suivant une cassure plus ou moins linéaire. Humboldt (1769-1859) adopte la thèse, d'autant plus aisément qu'il a vu depuis longtemps la même chose au Mexique. Mais pourquoi Élie de Beaumont, qui vient d'expliquer les plissements montagneux par la contraction de l'écorce, adopte-t-il cette théorie (concurrente) pour rendre compte de la formation des volcans d'Auvergne ? Ce n'est qu'à la fin des années 1840, après les études de H. de la Bèche (1796-1855) sur l'écrasement consécutif à la contraction, qu'il développe sa première hypothèse, en élaborant la théorie du réseau pentagonal. Mais même alors, il se refuse à parler en termes d'affaissements quand Constant Prévost (1787-1856) lui demande de le rejoindre sur ce point.

Il est vrai que tout oppose les deux auteurs. Prévost défend en France l'actualisme contre le catastrophisme de l'école de Cuvier. En matière d'orogénèse il enseigne les idées de J.-A. De Luc (1727-1817), qui a aussi reconnu les orogénèses multiples. Mais il les concevait comme des effondrements de l'écorce par

affaissements du toit de cavernes souterraines, ce qui en 1850, quand Prévost fait sa demande, est notoirement archaïque. Élie de Beaumont a beaucoup avancé dans l'analyse de ses « systèmes ». Dans sa communication de 1829, il en distinguait 4, en 1833, il était à 12, à 16 en 1847, et en 1852 à 22, avec l'espoir affirmé d'atteindre un jour la centaine. Persuadé, dès le début, que les dislocations de même âge ont même direction, il les attribue à une « même cause mécanique ». Chaque système se trouve ainsi disposé sur un fuseau, centré sur un demi grand cercle de la terre, un peu comme une côte de melon. Les cercles eux-mêmes, au nombre de 15, se croisent 5 par 5, dessinant 12 pentagones, comme sur un dodécaèdre régulier. (Le pentagone joue sur les surfaces sphériques le rôle de l'hexagone dans le plan : sa juxtaposition remplit tout l'espace.) Le nombre des systèmes étant supérieur à 15, certains systèmes modernes font retour à d'anciennes directions, dites « récurrentes ».

Les prédécesseurs

Cette architectonique très géométrisée peut surprendre. Elle est l'œuvre d'un polytechnicien qui, entraîné par les facilités de sa théorie, ne prend bientôt plus la peine de vérifier l'âge des orogénèses : la direction, repérée sur carte, implique une époque de soulèvement. Cependant, ce dogmatisme ne fait que renforcer une conviction fort ancienne des observateurs. De Buch croyait aussi à l'unité de direction des montagnes de même âge. Par ailleurs, Buffon avait décrit les chaînes de montagnes du monde en les rapportant à deux directions orthogonales : méridiennes ou parallèles à l'équateur. Et au XVIII^e s., le père Kircher figurait aussi les chaînes comme des armatures enserrant le globe. Les auteurs qui refusent cet ordre le font en général parce qu'ils croient que la genèse des montagnes se fait par effondrement. Car De Luc n'est pas, loin de là, le premier à le prétendre. Descartes l'a précédé dans sa 4^e partie des *Principes de la philosophie* (1644). Imaginant la différenciation progressive du globe terrestre, il le pourvoit d'un océan souterrain, dans lequel l'écorce s'effondre par pans à mesure qu'elle se dessèche. L'Anglais Burnet (1681) le suivra. Entre les deux, peut-être indépendamment, Nicolas Sténon (1638-1686) propose un schéma d'évolution de la Toscane en deux cycles géologiques, chacun composé d'une phase de sédimentation, une autre d'exondation et une troisième d'affaissement des strates supérieures par suite du grignotage des zones internes. Sténon est sans doute le premier auteur à parler de formation successive des montagnes.

La répétition des orogénèses se retrouve, avec les mêmes effondrements, chez Fuchsel (1722-1773), auteur allemand. Limitée à deux, comme chez Sténon, mais sous forme de soulèvement, et associée à la formation des volcans, on la trouve en 1740, chez l'Italien Lazzaro Moro (1687-1764), qui construit un

système annonçant les cratères de soulèvement, puis chez Hutton, premier auteur à comprendre les discordances, et à suggérer une répétition indéfinie des soulèvements. James Hutton (1726-1797) attribue aux « feux souterrains » trois actions : transformation des sédiments meubles en roches cohérentes, par interposition d'un liquide entre les grains, formation en profondeur de masses entièrement fondues qui font intrusion, et soulèvement des strates surincombantes lors de cette intrusion. Le soulèvement s'accompagne du plissement des terrains repoussés par l'intrusion granitique. L'érosion subséquente des couches mises au jour recoupe les plis, sur la tranche desquels se déposeront de nouvelles couches discordantes. Hutton nomme « jonction » ce contact entre couches anté et post-orogéniques.

H.-B. de Saussure (1740-1799) aurait pu, en parallèle, aboutir à des conclusions voisines. Après s'être imaginé que les plis s'expliquaient par des bizarreries de la cristallisation, il remarque que les poudingues verticaux de Vallorcine ont nécessairement été redressés. « Je fus curieux de voir ces poudingues dans leur lieu natal [...] mais là, quel ne fut pas mon étonnement de trouver leurs couches dans une situation verticale [...] Que des particules de la plus extrême ténuité, suspendues dans un liquide, puisse s'agglutiner entr'elles & former des couches verticales, c'est ce que nous concevons très bien, & dont nous avons la preuve en fait dans les albâtres, les agathes, & même dans les cristallisations artificielles. Mais qu'une pierre toute formée, de la grosseur de la tête, se soit arrêtée au milieu d'une paroi verticale, & ait attendu là que les petites particules de la pierre vinssent l'envelopper, la souder & la fixer dans cette place, c'est une supposition absurde & impossible » (*Voyages dans les Alpes*, § 689 et 690).

Plus tard, il observe des couches en « C », c'est-à-dire des têtes de nappes qui lui font penser à un raccourcissement de la région. Mais Saussure est resté néptunien, et il ne dispose d'aucun mécanisme capable de serrer les terrains. Quoiqu'il parle de refoulements, il achoppe à expliquer le phénomène. Comme son contemporain Dolomieu (1750-1801) qui voyait l'écorce des Alpes « refoulée », soulevée et même « chevauchée », mais l'imputait à un choc latéral, analogue à celui de la comète de Whiston (1695). Les intrusions huttoniennes montrent l'avantage heuristique du modèle plutonien. Néanmoins, les mouvements tangentiels ont été invoqués, dès 1723, par l'ingénieur français Henri Gautier (1660-1737), suivi peu après par l'abbé de Sauvages.

Trois théories globales

L'historien américain M.T. Greene qualifie le système d'Élie de Beaumont de première synthèse tectonique globale (*Geology in the 19th Century*, 1982), et place en deuxième position celle de l'Autrichien Édouard Suess (1831-1914). Toutes deux ont en commun de reposer sur les effondrements produits par

le refroidissement terrestre. Comme celui-ci engendre une contraction du globe, on peut réunir les deux théories dans un programme (au sens de Lakatos) « contractionniste ». Après un petit ouvrage sur l'*Origine des Alpes*, Suess se lance dans la rédaction de sa monumentale *Face de la terre*, dont la parution s'étale de 1883 à 1909. Remarquant que les Alpes et beaucoup d'autres chaînes sont arquées, il abandonne le principe de direction pour déterminer l'âge des orogénèses. Par ailleurs, il concentre son attention sur les contraintes qui résultent de la tension entre croûte et intérieur du globe. Les unes, parallèles à la surface (tangentiels), produisent les poussées latérales génératrices de plissements. Les autres, verticales (radiales), provoquent des cassures et des effondrements, les uns polygonaux, comme le quadrilatère de Bohême, les autres circulaires, tel le golfe de Naples. Les effondrements expliquent les régressions marines, tandis que la sédimentation océanique est responsable des transgressions, moins importantes cependant, puisque le mouvement d'ensemble est un affaissement de l'écorce. Suess attribue donc les changements des lignes de rivage aux seuls mouvements de la mer (eustatisme), ce qui offre l'avantage de les rendre simultanés sur l'ensemble du globe, facilitant les corrélations à distance.

Dans le même temps, Marcel Bertrand (1847-1907), disciple français de Suess, contribue à préciser la formation des chaînes de montagnes. Après avoir surpris la société géologique par une comparaison entre les Alpes de Glaris et le bassin houiller franco-belge, esquisse de sa conception des grands recouvrements (nappes de charriages), il prononce, le 21 mars 1887, une conférence sur « la chaîne des Alpes et le continent européen », où il substitue au principe de direction un principe de continuité : la genèse d'une unité orogénique est continue, quoique divisée en une série de phases successives. Aux vingt ou trente systèmes de montagnes succèdent quelques grandes chaînes juxtaposées, couvrant toute l'Europe. La dernière est la chaîne alpine, qu'on suit de la Suisse aux Carpathes, précédée d'une chaîne qu'il nomme houillère puis hercynienne, et que Suess appelait varisque. Au nord, une chaîne encore plus ancienne, étendue de la Norvège à l'Écosse (ancienne Calédonie), est nommée calédonienne. Mais l'auteur ne se limite pas à l'Europe. Observant des analogies entre les Alleghanis et la chaîne hercynienne, de même qu'entre les Montagnes vertes et les Calédonides, il postule le prolongement des chaînes européennes à travers l'Atlantique. Dans le cadre de la synthèse de Suess, l'affaissement des océans est naturel. On sait qu'en 1912, un géophysicien allemand cherchera une autre explication. M.T. Greene fait de la conception wegenérienne la quatrième théorie globale, la troisième étant la théorie planétissimale de T.C. Chamberlin, dont le succès ne parvint pas de ce côté de l'Océan. En sorte qu'un historien européen limiterait à trois le nombre des synthèses globales.

► BERTRAND M., « La chaîne des Alpes et la formation du continent européen », *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 3, 15, 1887, p. 423-447. — ÉLIE DE BEAUMONT L., « Recherches sur quelques-unes des révolutions de la surface du globe... », *Annales des sciences naturelles*, 18, 1829, p. 5-25, 284-416, et 19, 1830, p. 5-99 et 177-240. — GOHAU G., *Idées anciennes sur la formation des montagnes - Préhistoire de la tectonique*, Univ. Jean-Moulin (Lyon III), 1983 (thèse pour le doctorat d'État) (multigraphié). — GREENE M.T., *Geology in the*

Nineteenth Century - Changing Views of a Changing World, Ithaca/Londres, Cornell Univ. Press, 1982. — SUESS E., *La Face de la terre*, trad. et notes E. La Margerie, Paris, A. Colin, 4 vol., 1897-1918 (éd. all., 1883-1909).

Gabriel GOHAU

→ Catastrophisme ; Courant de convection ; Expansion terrestre ; Stratigraphie ; Tectonique des plaques ; Terre.

PARACELSE, ~ 1493-1541

Médecin et alchimiste suisse de langues latine et allemande. Theophrastus Philippus Aureolus Bombastus von Hohenheim joua un rôle éminent dans l'histoire mouvementée de la médecine, de l'alchimie et de la philosophie à l'époque de la Renaissance sous le surnom de Paracelsus, celui qui surpasse Celsus, le célèbre médecin romain du siècle d'Auguste. Ce contemporain de Rabelais fut selon Giordano Bruno « le premier qui ait de nouveau considéré la médecine comme une philosophie ». Après des études à Ferrare, médecin il parcourut toute l'Europe avant d'enseigner à la Faculté de médecine de Bâle en 1526, à l'appel de l'éditeur d'Érasme. Mais ses cours en allemand et ses attaques contre Galien, Avicenne ou Râzi, le contraignirent à reprendre son existence de médecin nomade. Son œuvre écrite est considérable ; pour l'essentiel elle ne put être éditée de son vivant. Paracelse reprend en une synthèse originale, due à des connaissances médicales précises, nombre d'idées de l'époque dans le sillage du néoplatonisme de Marsile Ficin, de l'hermétisme et de la kabbale. L'univers est un tout vivant, hiérarchisé et harmonieux à l'image de la trinité divine, comme de l'homme : monde terrestre, monde astral, monde divin ou bien corps, âme, esprit, ou encore soufre, mercure et sel qu'on trouve en germes dans la terre et à partir desquels toutes choses sont produites. Ces secrètes similitudes sont lisibles par tout un système de signatures et la divination fait corps avec la connaissance elle-même : « Nous autres hommes nous découvrons tout ce qui est caché dans les montagnes par des signes et des correspondances extérieures, et c'est ainsi que nous trouvons toutes les propriétés des herbes et tout ce qui est dans les pierres. » C'est pourquoi la médecine exige la connaissance de la philosophie, de l'astronomie et de l'alchimie. La maladie est un déséquilibre, son traitement exige le déchiffrement des relations en miroir qui existent entre la partie et le tout afin de permettre par l'addition de ce qui manque ou la soustraction de ce qui est en excès, le rétablissement de l'harmonie entre l'homme et le cosmos.

◉ Un médecin, Johannes Huser réalisa à Bâle la 1^{re} édition complète, 1589-1591. — *Sämtliche Werke*, I éd. K. Sudhoff, Munich, 14 vol., 1922-1933 ; II éd. K. Goldammer, Wiesbaden, 14 vol., 1955-1998. — *Das Buch von den natürlichen Diagen*

P

(1525-1526). — *Zehn Bücher der Archidoxen* (1526). — *De modo pharmacandi* (1528). — *Paragranum* (1530). — *Opus parumirum* (1531). — *Astronomia magno oder die ganze philosophia sagax* (1537-1538). — *Œuvres complètes*, trad. fr. Grillet de Grivy, Paris, 1913-1914 (rééd., Paris, Éd. Traditionnelles, 1984). — *Œuvres médicales choisies*, trad. B. Gorceix, Paris, PUF, 1968.

► BRAUN L., *Paracelse*, Zurich, 1990. — GOLDAMMER K., *Paracelsus : Natur und Offenbarung*, Hanovre, 1953. — KOYRÉ A., « Paracelse », *Les mystiques, spiritualistes, alchimistes du XVI^e siècle allemand*, Paris, 1955 (rééd., Paris, Gallimard, 1970). — MARIÉL P., *Paracelse ou le tourment du savoir*, Paris, Hermann, 1974. — PAGEL W., *Das medizinische Weltbild des Paracelsus*, Wiesbaden, 1962.

François REMOISSENET

→ Alchimie ; Analogie ; Élément ; Sel ; Symbole ; Vitalisme et mécanisme.

PARADIGME

Le mot « paradigme », quoique ancien, a connu un renouveau dans son usage et dans sa signification du fait de l'impulsion que lui a fournie l'œuvre de Thomas Kuhn dans laquelle ce terme occupe une place centrale. Le livre publié en 1962 sous le titre *La structure des révolutions scientifiques* peut être considéré comme une présentation de ce concept dans le sens nouveau que lui donne Kuhn. La fortune du terme sera par la suite l'occasion d'un grand nombre de débats, de discussions sur sa signification précise ; de confusions aussi, que Kuhn lui-même, en dépit de nombreuses mises au point, ne parviendra pas à rectifier complètement. Il sera ainsi conduit à se démarquer d'un certain nombre de travaux qui, employant le concept de paradigme dans un sens qu'il n'approuve pas, se réclament de son œuvre.

Le paradigme avant Kuhn

On trouve le mot paradigme utilisé à plusieurs reprises dans l'œuvre de Platon (*pradigma*). Dans l'étude qu'il a consacrée à ce concept chez Platon, Victor Goldschmid conclut : « Qu'il soit [le paradigme] poétique ou scolaire, allusif ou développé, probable ou vérifié, mythique ou dialectique, qu'il soit

procédé de recherche ou procédé de combat, son rôle est toujours d'exercer l'élève à une méthode et de lui faire découvrir une vérité, de contribuer à l'exercice jamais achevé de la méthode dialectique et la découverte de la vérité qui jamais entièrement ne se dévoile à nos yeux. » Le terme a parfois été traduit par « exemple ». Ainsi Léon Robin, qui a opté pour cette dernière traduction, ajoute en note la remarque suivante : « Le grec, rendu ici par "exemple" est *paradigma* ; or l'opération décrite consiste à montrer (*digma*, "ce que l'on montre"). » Ce que l'on montre par l'exemple. C'est le sens qu'on retrouve dans l'usage grammatical du terme où paradigme se rapporte à la manière de conjuguer ou de décliner un verbe quand celle-ci est enseignée à partir d'un exemple. Le paradigme est alors le verbe qui tient lieu de modèle pour tous les verbes qui suivent la même règle grammaticale dans leur conjugaison ou déclinaison.

Le paradigme chez Kuhn

Dans *La structure des révolutions scientifiques* (SSR, les références sont données dans l'édition française), le terme est d'abord introduit pour caractériser la différence entre les sciences de la nature et les sciences humaines : « C'est en essayant de comprendre cette différence que j'ai été amené à reconnaître le rôle joué dans la recherche scientifique par ce que j'ai depuis appelé les *paradigmes*, c'est-à-dire les découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs, des problèmes types et des solutions » (SSR, p. 11).

Mais, dans la suite du texte, le mot apparaît avec des sens variables. Margaret Matsterman a dénombré au moins vingt-deux emplois différents de ce terme dans *La structure des révolutions scientifiques*. Kuhn, quant à lui, n'en reconnaît que deux qu'il discute et analyse dans la postface de la seconde édition de son livre, publiée sept ans après la première.

Dans un premier sens, le mot désigne l'ensemble des valeurs et des techniques que partage un groupe scientifique. Le paradigme, entendu en ce sens, est ce qui fixe la manière correcte de poser et d'entreprendre la résolution d'un problème. Kuhn propose de réserver pour cet emploi spécifique du mot le terme de « matrice disciplinaire » qui lui paraît viser de manière plus appropriée l'ensemble des théories ou plus généralement des connaissances que partage un groupe de chercheurs travaillant sur un même sujet à un moment donné. Les éléments qui composent le paradigme au sens de matrice disciplinaire sont divers : il peut s'agir de généralisations symboliques du type de celles qui sont trouvées dans les équations mathématiques de la physique ($F = ma$, $PV = nRT$, $E = mc^2$, etc.), ou bien de métaphores fréquemment employées qui reflètent le statut de certains des éléments mis en jeu dans la théorie (comme par exemple la métaphore hydraulique employée dans la description d'un circuit élec-

trique : les électrons sont dans le circuit conducteur comme l'eau dans un circuit de tuyauterie), ou bien des explications verbales au sujet de tel ou tel phénomène, ou encore des schémas, dessins, modèles, etc. Tout ceci forme la « matrice disciplinaire » qui constitue le cadre auquel les scientifiques d'une discipline se réfèrent lorsqu'ils évoquent des résultats ou des problèmes se posant dans leur domaine.

Dans un second sens, le mot paradigme désigne non pas ces entités représentatives elles-mêmes mais la manière dont celui qui est éduqué dans la discipline apprend à les reconnaître, à les isoler, à les distinguer. Ce second sens renvoie à la phase pratique de la formation du scientifique, celle au cours de laquelle il s'exerce sur des problèmes que les connaissances acquises permettent de résoudre. Kuhn tire ici profit de son expérience pédagogique (il a enseigné la physique avant de développer ses conceptions épistémologiques). Il fait remarquer qu'il arrive fréquemment qu'un étudiant, après avoir lu et assimilé le contenu théorique d'un chapitre, ne parvienne pas cependant à résoudre les problèmes qui lui sont proposés en fin de chapitre. Les éléments théoriques, quoique convenablement compris, ne lui suffisent pas pour « voir » le problème d'une manière qui puisse efficacement être traitée par les concepts développés dans la théorie. L'étudiant sait ce qu'il faut savoir mais demeure incapable d'utiliser ce savoir. C'est en méditant sur des exemples qu'il apprend à voir ce qu'il faut voir pour que la théorie puisse s'appliquer. Le savoir théorique prend alors une valeur opérationnelle. Mais ceci n'a été rendu possible qu'en éduquant la perception par l'exemple.

Le rôle des paradigmes dans la science selon Kuhn

Si ces deux sens sont distingués dans l'effort de définition que Kuhn réalisera après-coup sur le concept qu'il propose, ils sont, dans l'édition initiale de *La structure des révolutions scientifiques*, le plus souvent confondus. Une présentation de la notion telle qu'elle peut être trouvée dans ce texte implique donc des références croisées à l'un ou l'autre de ces sens.

Le concept de paradigme, dans le double sens qui vient d'être développé, joue un rôle central dans la version que Kuhn propose de l'activité scientifique. Il permet en particulier de distinguer deux régimes de l'activité scientifique que Kuhn baptise « science normale » et « révolution scientifique ». À chacun de ces régimes correspond un type de rapport au paradigme : rapport d'acceptation, d'adhésion dans la science normale, rapport de rejet et de fondation d'un nouveau paradigme dans la révolution scientifique.

Science normale. — Le paradigme est ce qui ouvre la carrière de la science « normale ». En proposant à ceux qui s'y attellent des énigmes bien délimitées, bien identifiées, le paradigme rend possible un travail collectif d'élucidation. Ceux qui s'engagent dans cette

élucidation n'ont pas à reprendre à chaque fois les questions à leur commencement, mais peuvent au contraire bénéficier d'un certain « état du problème » laissé par leurs prédécesseurs. Ils peuvent ainsi travailler dans un domaine précis et limité. Leur recherche acquiert du même coup un aspect ésotérique dont le sens n'est accessible qu'à ceux qui sont en état d'appréhender l'état du problème en question. Le paradigme ouvre la voie à une spécialisation, à un affairement concerté (au moins dans ses grandes lignes), il ouvre des problèmes précis et délimités. Situation qui est caractéristique d'une discipline pourvue d'un paradigme et qui la distingue nettement d'une activité de recherche privée de paradigme dans laquelle chaque chercheur individuel doit, à chaque fois, tout reconstruire par lui-même ou bien accepter des présupposés sous la sauvegarde de la seule autorité de quelque prédécesseur. Le paradigme au contraire fixe les normes d'un champ de recherche de telle sorte que ceux qui s'y adonnent disposent, grâce à lui, d'une base de réflexion stable et commune : « Les hommes dont les recherches sont fondées sur le même paradigme adhèrent aux mêmes règles et aux mêmes normes dans la pratique scientifique » (SSR, p. 30). Il guide l'attention des chercheurs vers certains problèmes : « En l'absence d'un paradigme ou d'une théorie prétendant à ce titre, tous les faits qui pourraient jouer un rôle dans le développement d'une science donnée risquent de sembler également important » (SSR, p. 36). Le paradigme, c'est ce qui indique quels faits sont importants et quels autres, négligeables, quels faits doivent retenir l'attention et quels autres, être ignorés.

Dans la période de science « normale », le paradigme est utilisé à la fois comme base de questionnement et comme cadre de référence pour les réponses possibles. Pendant cette phase, les chercheurs étendent le domaine d'application du paradigme et tirent profit de sa fécondité. Ils cherchent à « décliner » la réalité selon la règle donnée par le paradigme. Cette opération rencontre par endroits des difficultés, des résistances. Elles constituent les énigmes que propose le paradigme. C'est sur elles que s'affairent les scientifiques. Une réussite scientifique sera une opération de déclinaison supplémentaire qui, d'une part, honore la sagacité de celui qui l'a produite (il est par là parvenu à résoudre un problème, une énigme), et d'autre part, consolide la confiance générale dans le paradigme régnant et dans la capacité qu'a celui-ci de permettre la résolution d'un nombre toujours croissant de problèmes.

Mais il arrive que certains problèmes résistent aux efforts répétés des membres les mieux qualifiés de la communauté des scientifiques. S'institue alors une situation de crise dans laquelle des hypothèses nouvelles sont produites qui remettent en cause, de manière plus ou moins profonde, le paradigme alors en vigueur. Ces tentatives occultent la possibilité qu'un changement de paradigme puisse non plus résoudre le problème mais le faire disparaître en adoptant un point

de vue différent. Lorsqu'une telle possibilité est aperçue, un nouveau paradigme apparaît.

Révolution scientifique. — La révolution scientifique est l'établissement d'un tel nouveau paradigme. Mais l'opération par laquelle un paradigme fait son apparition est d'abord une opération individuelle. Elle concerne un chercheur ou un petit nombre de chercheurs seulement. Se pose alors le problème du moyen par lequel ce chercheur ou ce groupe restreint de chercheurs va convaincre ses collègues de la pertinence du nouveau point de vue. Ceux-ci n'ont pas de raison particulière d'être convaincus, car le nouveau paradigme présente des éléments d'incompatibilité avec l'ancien, lequel, ayant déjà démontré sa fécondité (car aussi bien ce n'est pas pour rien qu'il est un paradigme), n'est remis en question qu'avec réticence par les membres du groupe qui ont appris à travailler avec lui. Ils opposent une résistance à l'établissement du nouveau paradigme : « La source de cette résistance, c'est la certitude que l'ancien parviendra finalement à résoudre tous ses problèmes, que l'on pourra faire entrer la nature dans la boîte fournie par le paradigme » (SSR, p. 209).

Dans le changement de paradigme s'opère un changement complet dans la conception de la manière pertinente de poser les problèmes. Le nouveau paradigme, s'il permet de mettre fin à certains problèmes sur lequel l'ancien achoppait, remet en cause les succès qui ont été obtenus dans le cadre que celui-ci fixait. Il est l'occasion de controverses entre les tenants de l'ancien paradigme et ceux du nouveau : « Les deux partis voient inévitablement de manière différente les situations expérimentales ou les observations auxquelles ils font référence. Étant donné que le vocabulaire dans lequel ils s'expriment se compose toutefois, en grande partie, des mêmes termes, ils doivent établir entre ces termes et la nature un rapport différent, ce qui rend leur communication inévitablement partielle. En conséquence, la supériorité d'une position sur l'autre ne peut se prouver par la discussion. » Après la révolution s'institue un nouveau paradigme qui, à nouveau, ouvre des énigmes et un temps de science normale fondé sur de nouvelles bases. Le bilan d'un tel cycle est la substitution d'un paradigme par un autre, avec le changement subséquent de ce qu'il faut voir dans une situation donnée pour pouvoir résoudre un problème avec les outils du paradigme.

Le paradigme ouvre donc la possibilité de la science normale en définissant le cadre dans lequel il convient de voir une situation donnée pour pouvoir la traiter adéquatement, mais, en même temps, il contraint la vision à demeurer dans le cadre de ce qui est par lui perçu. L'exemple couramment invoqué à ce sujet est celui de Newton : le paradigme newtonien possède une puissance propre qui permet d'aborder un nombre important de problèmes. Mais il est aussi une limitation (il est possible d'en juger ainsi depuis Einstein). Le paradigme a la double fonction d'un cadre : il soutient et il enferme.

Paradigme et communauté scientifique

Cet aspect du paradigme met en relief sa valeur collective : il est en effet une sorte de « bien commun » partagé par la communauté. Kuhn est d'ailleurs parfois tenté de définir une communauté de chercheurs par le fait que ses membres partagent un même paradigme. Mais il s'aperçoit aussi de la circularité qu'il introduit par ces définitions symétriques : si d'une part la communauté scientifique est définie par le fait que ses membres partagent un certain paradigme et que, d'autre part, le paradigme est défini comme ce qui est partagé par une communauté de chercheurs, il y a un problème. Kuhn essaiera donc de définir la notion de communauté scientifique sans recourir à la notion de paradigme. Il fera appel à une caractérisation empirique de type sociologique : une communauté de chercheurs est un groupe qui se définit par le fait « que ses membres assistent aux mêmes conférences spécialisées, qu'ils se distribuent entre eux les versions préliminaires ou les épreuves de leurs articles avant publication, et, par-dessus tout, par l'existence entre eux d'un réseau de communication formel et informel, incluant la correspondance et les liens que révèlent les citations privilégiées » (SSR, p. 242). Et Kuhn précise que les communautés de spécialistes, entendues en ce sens, ne comportent guère plus d'une centaine de membres et parfois beaucoup moins.

Incommensurabilité des paradigmes

Le remplacement d'un paradigme par un autre ne s'effectue pas sur une base entièrement rationnelle mais requiert un élément de conversion : « Chacun peut espérer convertir l'autre à sa conception de la science et de ses problèmes, aucun ne peut espérer prouver son point de vue. La concurrence entre les paradigmes n'est pas le genre de bataille qui puisse se gagner avec des preuves » (SSR, p. 204). Ce caractère des paradigmes, Kuhn le qualifie par le terme « incommensurable ». Les paradigmes ne peuvent pas, à proprement parler, être comparés entre eux. C'est pourquoi Kuhn insiste sur le fait que le phénomène qui permet de passer de l'un à l'autre s'apparente à une conversion. Conversion dont il voit une analogie dans les expériences perceptives élaborées par les psychologues gestaltistes (psychologie de la forme). Comme par exemple dans l'expérience que permet de réaliser la figure du « canard-lapin » : une figure qui peut être tantôt vue comme représentant un canard, tantôt comme représentant un lapin et dont Kuhn évoque fréquemment l'analogie avec ce qui a lieu dans le changement de paradigme. C'est là ce qui oppose la doctrine de Kuhn à ce qui constitue, dans les versions les plus courantes de la science, la cause invoquée du progrès : la démonstration rationnelle. Kuhn affirme au contraire que « la transition entre deux paradigmes [...] ne peut se faire poussée par la logique et l'expérience neutre » (SSR, p. 207). L'incommensurabilité des paradigmes explique bien plutôt le rejet du nouveau paradigme par

les tenants de l'ancien : « Si deux scientifiques ne sont pas d'accord, par exemple sur la fécondité relative de leurs théories... aucun d'entre eux ne peut être convaincu d'erreur. Aucun d'entre eux ne sort non plus des limites de la science. » Israël Scheffer commente ce point dans *Science and objectivity* : « Accepter un paradigme, c'est accepter non seulement des théories et des méthodes, mais aussi des normes et des critères qui servent à justifier le paradigme aux yeux de ses partisans [...]. Il s'ensuit que tout paradigme se justifie de lui-même et que la controverse entre paradigmes ne peut avoir le caractère d'un débat objectif ; l'aspect non rationnel de la conversion est un trait fondamental du changement de paradigme. »

S'il y a un incommensurable entre les paradigmes successifs qu'une discipline scientifique quelconque adopte pour décrire son objet, peut-on réellement parler de progrès ? Ou doit-on concéder que le nouveau paradigme, s'il offre des prises différentes sur la nature, n'est ni meilleur ni moins bon, qu'il est simplement autre ? Si la science connaît des sauts successifs entre des paradigmes incommensurables, on ne peut pas plus parler d'une vérité (dont la science s'approcherait) que de progrès. Chaque paradigme est vrai dans le cadre qu'il définit lui-même. C'est bien là l'idée que Kuhn paraît avoir : « Plus ils [les historiens des sciences] étudient de près par exemple la dynamique aristotélicienne, la chimie du phlogistique ou la thermodynamique calorifique, plus ils ont la certitude que ces conceptions de la nature qui furent courantes en leur temps n'étaient, dans l'ensemble, ni moins scientifiques, ni davantage le produit de l'idiosyncrasie humaines que celles qui sont courantes aujourd'hui » (SSR, p. 19).

Cette conception a été très largement critiquée. Mentionnons ici la critique de Imre Lakatos dans *Criticism and the growth of knowledge* : « Pour Kuhn, le changement de paradigme est une opération mystique qui n'est pas et ne peut pas être conduite par des règles rationnelles et qui tombent entièrement dans le domaine de la (socio)psychologie de la découverte. Le changement de paradigme est une sorte de conversion religieuse [...], il n'y a pas de norme rationnelle pour la comparaison des paradigmes [...]. Ainsi, selon Kuhn, les révolutions scientifiques sont irrationnelles, une question de psychologie au sens commun de ce terme. » Et la critique prend ensuite une allure philosophique, « relativisme, subjectivisme, irrationalisme ».

La doctrine de Kuhn paraît en effet s'apparenter à une forme de relativisme : il n'y a pas une vérité mais des vérités, chacune, pour son propre compte, aussi valable que les autres. C'est ainsi que Kuhn est amené à préciser sa position par rapport au relativisme : « Je ne doute pas, par exemple, que la mécanique de Newton ne soit une amélioration par rapport à celle d'Aristote, ou que celle d'Einstein ne soit meilleure que celle de Newton en tant qu'instrument pour la résolution d'énigmes. Mais je ne vois pas, dans leur succession, une direction cohérente de développement ontologique... je comprends que l'on soit tenté de qualifier

cette position de "relativiste", mais je pense, malgré tout, que ce terme est inexact. »

Situation inextricable : d'un côté Kuhn met en évidence les raisons qu'on pourrait avoir de mettre en doute l'idée de progrès scientifique comme progression régulière vers la vérité, et de l'autre il affirme qu'il y a bien progrès des connaissances dans la science. Point d'achèvement de la doctrine, et point aussi sur lequel ses commentateurs se diviseront, soit pour tenter d'éclaircir (et avec quelles difficultés !) la position de Kuhn, soit pour s'en tenir aux affirmations de Kuhn selon lesquelles le qualificatif de « relativisme » ne s'applique pas à sa doctrine, soit enfin pour s'engager dans les perspectives ouvertes par son œuvre et qui vont, pour une part, dans un sens opposé à ses déclarations.

La notion de « paradigme » après Kuhn

C'est en particulier dans le domaine de la sociologie de la connaissance que ces perspectives ont été le plus largement exploitées. Dans l'introduction du livre qu'il a dirigé, publié sous le titre *Paradigms and revolutions, appraisals and applications of Thomas Kuhn's philosophy of science*, Gary Gutting fait le point sur les diverses influences de l'œuvre de Kuhn : « Les sociologues des sciences ont été, dans l'ensemble, beaucoup plus réceptifs à la notion de paradigme que les historiens et les philosophes. Ils ont vu dans l'œuvre de Kuhn les éléments qui allaient leur permettre de révolutionner leur discipline. » La sociologie des sciences, discipline traditionnellement associée au nom de Robert Merton, avait en effet établi comme principe ferme de ses analyses la nécessité de distinguer les aspects sociaux des aspects cognitifs de la science. Les premiers étaient spécifiquement l'objet visé par la sociologie de la connaissance, tandis que les seconds étaient réputés échapper à ce champ. C'est cette distinction que certains sociologues, s'autorisant de l'œuvre de Kuhn, ont remise en question, considérant qu'elle ouvrait la possibilité d'études sociologiques sur le développement des contenus scientifiques eux-mêmes. Dans *Social processes of scientific development*, Richard Whitley écrit par exemple : « En autorisant à concevoir la part irrationnelle qui concourt au développement scientifique, Kuhn a ouvert la porte à une analyse sociologique du développement scientifique. » Kuhn paraît ici être convoqué comme un allié et même comme un précurseur. Mais d'autres font remarquer aussi que Kuhn n'est, en l'occurrence, pas cité de manière appropriée. Dans une étude sur le concept de paradigme en sociologie, publiée dans le volume dirigé par Gary Gutting mentionné précédemment, Eckberg et Hill écrivent : « Un grand nombre de sociologues ont fait un usage erroné du concept de paradigme. Le résultat en est que le concept de paradigme a été utilisé avec des significations que Kuhn ne lui a jamais données. » L'emprunt fait à Kuhn par la sociologie des sciences demeure ainsi un objet de controverse.

La fortune du terme « paradigme »

Le terme paradigme a connu une fortune considérable dans les années qui ont suivi la publication de *La structure des révolutions scientifiques* et après. En témoignent les livres nombreux dont les titres indiquent qu'ils se proposent d'examiner, de définir, ou même de proposer un paradigme. Quelques exemples : *La naissance du paradigme herméneutique* (Presses Universitaires de Lille, 1991); *Les défis de la complexité : vers un nouveau paradigme de la connaissance ?* (Paris, L'Harmattan, 1994); *Le paradigme informatique* (Paris, Descartes, 1995), etc. En témoigne aussi le recours devenu rituel à ce concept dans certains domaines ou dans certaines disciplines. M. Blang écrit par exemple : « Le raisonnement dit paradigmatique devient rapidement un trait constant des controverses en économie, et "paradigme" un mot obligé pour tout historien de la pensée économique. » La fortune du terme « paradigme », comme c'est le cas, peut-être, de n'importe quel terme, est due, pour une bonne part, à son ambiguïté, son équivocité.

En pareils cas, deux voies s'ouvrent à l'analyse : définir le concept afin d'en régler l'utilisation ou bien faire l'inventaire des usages du terme, opérations bien différentes l'une de l'autre. Si, dans l'examen de l'usage d'un terme, il n'y a pas lieu de prendre comme une objection le fait que celui-ci ait pu être détourné de son sens initial, si au contraire un tel examen doit admettre que tout usage, aussi inattendu et même inapproprié soit-il, a au moins la valeur que lui donne celui qui l'emploie, ce n'est plus à un terme que nous avons affaire, mais à une fonction qui est susceptible de changer, d'évoluer, éventuellement même de s'inverser. La question qui s'ouvre alors n'est plus : « Que signifie paradigme ? », mais « À quelle nécessité interne correspond l'emploi de ce terme chez tel ou tel ? ». Kuhn ne s'est pas aventuré dans ces régions. Critiqué, il a cherché à préciser le sens du terme dans une définition qui lui a toujours cependant échappé.

C'est là une démarche inverse de celle par laquelle Michel Foucault a pu introduire et développer le terme d'*épistémè*, qu'on compare bien souvent à celui de « paradigme » pour faire valoir la proximité des concepts qui sont désignés par ces termes. La différence des attitudes de Kuhn et de Foucault, le premier se mettant en quête d'une définition, le second se gardant d'un pareil projet, mériterait d'être analysée en détail. Elle montrerait probablement que derrière la proximité apparente des concepts se dissimule une divergence importante des philosophies. Elle apporterait peut-être aussi un éclairage intéressant sur la question qui a été ici désignée comme le point d'achèvement de la doctrine de Kuhn et qui l'a conduit à désavouer une partie de ce qui s'est réclamé de ses travaux.

► BRAUNECK P., *Das Paradigmenproblem in der Pädagogik unter dem spezifischen Aspekt der Arbeitslehre*, Francfort/Neu

York, P. Lang, 1992. — DUNBAR D., *The balance of nature's polarities in new paradigm theory*, New York, P. Lang, 1994. — FOUCAULT M., *L'archéologie du savoir*, Paris, Gallimard, 1969. — FREEMAN C. & MÉNDRAS H. dir., *Le paradigme informatique : technologie et évolutions sociales*, Paris, Descartes, 1995. — GOLDSCHMIDT V., *Le paradigme dans la dialectique platonicienne*, Paris, PUF, 1947. — GREICH J. dir., *Comprendre et interpréter : le paradigme herméneutique de la raison*, Paris, Beauchesne, 1993. — GUTTING G., *Paradigms and revolutions : appraisals and applications of Thomas Kuhn's philosophy of science*, Notre Dame, Univ. of Notre Dame Press, 1980. — HOYNINGEN-HUENE P., *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns : Rekonstruktion und Grundlagenprobleme*, F. Vieweg, Braunschweig, 1989 (trad. de l'all. A.T. Levine, préf. T.S. Kuhn, *Reconstructing scientific revolutions : Thomas S. Kuhn's philosophy of science*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1993). — KUHN T.S., *The essential tension : selected studies in scientific tradition and change*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1977 (trad. fr. M. Biezunski, P. Jacob, A. Lyotard-May & G. Voyat, *La tension essentielle*, Paris, Flammarion, 1977); *The structure of scientific revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1970 (trad. fr. L. Meyer, *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 1983). — LAGUEUX M., *Le recours au concept de « paradigme » dans l'analyse de la pensée économique*, Montréal, Univ. de Montréal, 1980. — LAKATOS I. & MUSGRAVE A. dir., *Criticism and the growth of knowledge*, Cambridge (MA), Univ. Press, 1970. — LAKS A. & NESCHKE A. dir., *La Naissance du paradigme herméneutique : Schliermacher, Humboldt, Boeckh, Droysen*, Lille, Presses Univ., 1990. — MEHRTEUS S.E. dir., *Revising science : essays toward a new knowledge base for our culture*, Waterbury (Vt.), Potlatch Group, 1996. — SCHARNBERG M., *The myth of paradigm-shift, or, How to lie with methodology*, Uppsala, Almqvist & Wiksell International, 1984. — SCHEFFER I., *Science and subjectivity*, Indianapolis, Bobbs-Merrill, 1967. — SCHWARTZ P. & OGILVY J., *The emergent paradigm : changing patterns of thought and belief*, Menlo Park (CA), SRI International, 1979. — THOMAS Y., *Au seuil d'un nouveau paradigme : le baroque à la lueur des théories lupasquiennes*, New York, P. Lang, 1985. — WHITLEY R., *Social processes of scientific development*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1974. — WILSON R.A., *The new inquisition : irrational rationalism and the citadel of science*, Phoenix (Ariz.), Falcon Press, 1986. — ZAMBRYCKA-KUNACHOWICZ A. dir., *In search of paradigm*, trad. du polonais K. Kwasińiewicz, Cracovie, Wydawnictwo Platan, 1992.

Pascal NOUVEL

→ Épistémologie ; Expérience ; Foucault ; Kuhn ; Progrès ; Réalisme ; Réfutabilité ; Révolution scientifique ; Rupture ; Sociologie des sciences ; Système ; Théorie.

PARCIMONIE

L'idée que la nature est simple, et qu'elle repose sur un petit nombre de principes ou de lois a souvent été l'un des postulats directeurs de la vision classique de la connaissance scientifique. En conséquence les philosophes et les savants ont souvent considéré que la simplicité ou la parcimonie d'une théorie était une raison de la considérer comme vraie. Même les philosophes qui ne souscrivent pas à une forme de réalisme, et qui nient, au nom d'un instrumentalisme ou d'un nominalisme, que nos théories puissent être vraies, pensent que l'adéquation empirique d'une théorie est d'autant

plus garantie qu'elle est parcimonieuse, et repose sur une économie de principes. Ainsi Mach évoquait un principe général d'« économie de pensée » pour toute la connaissance scientifique. Quelles sont les justifications de ces idées ?

Une théorie est plus parcimonieuse qu'une autre si elle repose sur un moins grand nombre de principes ou d'entités. Il n'est cependant pas évident que la simplicité soit la même chose que la parcimonie, car la première peut dépendre de l'unité ou de la liaison des principes. En ce sens, on peut considérer que la théorie aristotélicienne du monde physique est plus économique que la théorie newtonienne, mais que la seconde est plus simple, au sens où elle est plus profonde, parce que ses principes sont plus généraux. Le problème est que la simplicité est une notion relative, que nous ne pouvons apprécier qu'en fonction de l'état de notre savoir : en un sens, la description du monde que nous donne la physique contemporaine est considérablement plus complexe que celle que nous donnait la science antique ; en un autre sens elle est considérablement plus explicative, et en ce sens plus simple. Comme le remarquait Poincaré la simplicité de la théorie newtonienne de l'attraction n'est peut-être qu'apparente. Mais comment mesurer la profondeur d'une explication sans recourir au critère selon lequel elle est meilleure ou plus adéquate ? Une réponse radicale est fournie par le conventionnalisme, par exemple celui de Poincaré, pour qui les principes sur lesquels reposent nos théories, comme les axiomes de la géométrie, sont des conventions, dont le choix doit dépendre de la commodité. Mais si elles le sont, n'est-ce pas parce qu'elles sont vraies, et explicatives, auquel cas nous revenons à l'idée qui précède ?

Même si l'on parvient à répondre à ces questions, il demeure celle de savoir quelle raison nous avons de considérer la simplicité comme un signe de la vérité ? Newton et Leibniz pensaient que la réponse dépend d'un trait de la nature elle-même. Dans les *Principia* le premier énonce que « la nature ne fait rien en vain... car elle aime la simplicité et n'affecte pas la pompe des causes superflues », et le second supposait que le monde réel obéit à des lois simples parce que Dieu obéit au critère de la simplicité pour le choisir. Maupertuis invoquait aussi un « principe de moindre action ». La théorie moderne de la connaissance a douté de ces justifications réalistes ; elle a confiné la simplicité au niveau méthodologique, en limitant la parcimonie aux hypothèses que nous émettons sur la nature, sans nous prononcer sur leur simplicité réelle. La forme la plus usuelle que prend cette démarche consiste à rechercher les principes unificateurs du raisonnement scientifique. Ceux qui défendent une forme d'empirisme considèrent que la vertu principale des théories est qu'elles soient le mieux confirmées inductivement et les plus probables et cherchent dans les règles inductives leur critère de simplicité. Popper au contraire soutient que les scientifiques devraient préférer des théories hautement réfutables ou improbables, et qu'une théorie est d'autant plus profonde

explicativement qu'elle se prête au plus grand nombre de tests négatifs. Le problème que posent ces propositions, outre le fait que les critères de confirmation empirique ainsi obtenus ne sont pas nécessairement « simples », est qu'elles sont globales et formelles : elles stipulent que la méthode scientifique doit répondre à une forme unique, abstraite par rapport à ses contenus particuliers. Comme celles des classiques, elles espèrent que simplicité et parcimonie doivent répondre à un seul type de justifications. Mais il n'est pas évident que le recours à la parcimonie puisse être justifié indépendamment d'hypothèses d'arrière-plan. En ce sens, les hypothèses auxiliaires ou *ad hoc*, que Popper rejette comme inadéquates, sont souvent nécessaires pour établir le lien entre une théorie et des observations. Il en est de même si l'on s'appuie sur la probabilité comme critère de simplicité : la probabilité d'une hypothèse ou le fait qu'elle doit être préférée à une autre ne s'établit pas dans l'absolu, mais en fonction de la probabilité *a priori* d'autres hypothèses, et de postulats empiriques d'arrière-plan. Si c'est le cas, tout argument en faveur du choix d'une hypothèse considérée comme la plus simple dépend de telles théories d'arrière-plan. Et il n'est pas évident qu'il y ait une formule générale qui détermine cette relation. En ce sens, les critères de la simplicité ne peuvent être que locaux et non pas globaux, contextuels et non pas généraux.

L'idée de simplicité est étroitement liée également à celle de « lois de la nature » propre à la physique classique. Mais si, comme l'ont soutenu des philosophes des sciences comme Van Fraassen (1985) nous devons renoncer à cette idée et admettre que la science est à la recherche de « principes de symétrie » locaux, l'idéal de la simplicité devient largement chimérique (mais on remarquera aussi que l'image courante selon laquelle le monde décrit par la science est nécessairement « complexe » est tout aussi illusoire). Sa principale justification semble motivée par des considérations métaphysiques, comme celles qui inspirent le nominalisme. On peut chercher, par exemple (Field, 1980), à reformuler les mathématiques de manière à les débarrasser de tout postulat ontologique en faveur d'entités abs-traites, telles que des classes ou des ensembles, pour ne conserver que des engagements ontologiques envers des entités individuelles et des signes, mais cette démarche rend-elle compte des mathématiques ? Elle prétend simplifier l'ontologie, mais elle rend plus complexe la reconstruction des engagements des mathématiciens, qui peuvent à bon droit considérer que la postulation des ensembles est plus simple, et que le seul critère de simplicité admissible réside dans le fait qu'un scientifique tient certaines entités comme indispensables pour la vérité de sa théorie.

► FIELD H., *Science without Numbers*, Blackwell, Oxford, 1980. — MACH E., *Erkenntnis und Irrtum*, trad. fr., *La connaissance et l'erreur*, Paris, Flammarion, 1908. — POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902. — POPPER K.R., *Logik der Forschung*, Vienne, 1935 (trad. fr., *La logique de la connaissance scientifique*, Paris, Payot, 1972). — VAN

FRAASSEN B.C., *Laws and Symmetry*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1985 (trad. fr. C. Chevalley, Paris, Vrin, 1995).

Claudine TIERCELIN

→ Découverte ; Expérience ; Induction ; Méthode ; Nominalisme antique.

PARTICULE → Corpuscule

PASCAL Blaise, 1623-1662

Écrivain, philosophe et savant français. Né à Clermont-Ferrand en 1623, Pascal perd sa mère en 1626 et est élevé par ses deux sœurs Gilberte et Jacqueline. Éduqué par son père, qu'il suit à Paris en 1633 puis à Rouen en 1640, il maîtrise à 12 ans les six premiers livres des *Éléments* d'Euclide, publiée à 17 ans l'*Essai pour les coniques* et invente à 19 ans la machine arithmétique. Le génie mathématique de Pascal brillera encore en 1658 avec ses travaux consacrés au problème de la cycloïde.

Après s'être converti avec les siens selon l'esprit de l'abbé de Saint-Cyran, il prend connaissance des travaux de Torricelli sur la pression atmosphérique, publie les *Expériences nouvelles touchant le vide* et conçoit l'expérience du puy de Dôme en 1647. Revenu à Paris avec sa famille en 1648, il rédige le *Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs*, polémique avec le R.P. Noël, réalise l'expérience de la tour Saint-Jacques et compose un *Traité du vide* qui sera édité, après sa mort, en 1779.

À la mort de son père, Pascal se trouve à la tête d'une importante fortune. Commence alors sa « période mondaine », durant laquelle il fréquente la famille du duc de Roannez et correspond avec Fermat. Suite à sa seconde conversion, évoquée par le *Mémorial* (23 nov. 1654), il s'engage résolument en faveur du jansénisme. Montrant, dans ses *Entretiens avec M. de Sacy*, le directeur de Port-Royal, que la philosophie ne peut répondre à une attente que seule la révélation peut combler, il publie, après de brèves retraites aux Granges, *Les Provinciales* (1656-1657) dans lesquelles il répond aux attaques des jésuites, rédige *De l'esprit géométrique et de l'art de persuader* et commence une *Apologie de la religion chrétienne* dont les fragments seront publiés en 1670 par Port-Royal, « dans l'état même qu'on les avait trouvés », sous le titre de *Pensées*.

● *Œuvres complètes*, Brunschvicg-Boutroux-Grazier, Paris, Hachette, 14 vol., 1904-1914. — *Œuvres complètes*, éd. L. Lafuma, Paris, Le Seuil, 1963. — *Œuvres complètes*, Mesnard J., Paris, Desclée de Brouwer, 4 t. parus, 1964, 1970, 1991, 1992.

► BOUCHILLOUX H., *Apologétique et Raison dans les Pensées de Pascal*, Paris, Klincksieck, 1995. — CARRAUD V., *Pascal et la philosophie*, Paris, PUF, 1992. — GOUHIER H., *Blaise Pascal, commentaires*, Paris, Vrin, 1966 ; *Blaise Pascal, conversion et apologétique*, Paris, Vrin, 1986. — MAGNARD P., *Nature et*

histoire dans l'apologétique de Pascal, Paris, Les Belles Lettres, 1975 ; *Pascal, la clé du chiffre*, Paris, Éd. Universitaires, 1993. — SERRES M., « Le paradigme pascalien », in *Le système de Leibniz et ses modèles mathématiques*, Paris, PUF, 1968. — THIROUIN L., *Le Hasard et les Règles. Le modèle du jeu dans la pensée de Pascal*, Paris, Vrin, 1991.

François BOITUZAT

→ Induction complète ; Logique et informatique ; Probabilité ; Probabilité (physique) ; Transformation géométrique.

PASTEUR CONTRE POUCHET

Lorsque se déroulent les funérailles nationales de Louis Pasteur (1822-1895), en octobre 1895, le personnage, connu du monde entier, fait déjà depuis des années l'objet d'un véritable culte. Chacun garde en mémoire la séance solennelle du 27 décembre 1892 qui s'est tenue pour son jubilé dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne, l'hommage vibrant des institutions savantes françaises et étrangères en présence de Sadi Carnot alors président de la République.

Pasteur ? Depuis le fameux jour du mois d'août 1885 où il a « vacciné » et guéri de la rage le jeune berger alsacien Joseph Meister, chaque écolier sait répondre : c'est le bienfaiteur de l'humanité, celui grâce auquel la science désormais peut « délivrer l'homme des fléaux qui l'assiègent ». Ne l'a-t-il pas lui-même déclaré lors de l'inauguration, en 1888, de l'Institut fondé sous son nom, grâce à une souscription internationale sans précédent ? Un moraliste : « Toutes les vertus se sont cotisées pour élever cette demeure de travail. » Un ardent patriote enfin qui, le 18 janvier 1871, n'a pas hésité à renvoyer à l'université de Bonn son diplôme de docteur *honoris causa*.

Devant une telle statue, comment ne pas être tenté par quelque déboulonnage ? Plusieurs s'y sont essayés. Pasteur, observent-ils, n'a laissé aucun grand traité scientifique. Comment le comparer à Newton, à Darwin ou même à Claude Bernard ? Il n'a approfondi aucun des domaines de recherches qu'il a abordés. Ne le voit-on pas se déplacer d'un sujet à l'autre, sans autre ordre apparent que celui des commandes qui lui sont passées ? Après ses travaux de jeunesse en chimie fondamentale, on le voit étudier les fermentations pour assainir les cuves d'un industriel de la région lilloise, s'attaquer en 1865 à la maladie des vers à soie à la demande du ministère de l'Agriculture puis, après 1870, sollicité par les éleveurs, se consacrer à la maladie du charbon chez les moutons et au choléra des poules. Vient enfin la mise au point de la nouvelle méthode de « vaccination » qui ouvre la voie à ce qu'on a pu appeler la pastorisation de la médecine...

Si le parcours est impressionnant, la cohérence de la démarche n'est pas apparente. Pasteur du moins s'est constamment affirmé comme un extraordinaire expérimentateur. Mais, rétorque-t-on, le hasard l'a beaucoup servi et, parmi ses plus célèbres expériences, certaines se sont révélées, de son propre aveu, n'avoir pas la

valeur probante qu'il leur avait accordée sur le moment ! On peut noircir le portrait. Le bienfaiteur de l'humanité avait un détestable caractère : arrogant avec ses collègues, agressif avec ses contradicteurs, autoritaire avec ses subordonnés, il savait en revanche flatter les autorités politiques... L'homme que la République allait encenser n'avait-il pas d'abord cultivé avec succès l'amitié de la famille impériale ? Habile à se concilier les journalistes de la grande presse, ne s'est-il pas montré trop habile à mettre en scène ses expériences et à frapper les imaginations pour convaincre ? Quant à sa rigueur morale, ne tient-elle pas davantage du conformisme d'un conservateur endurci que d'une conviction éthique réelle ? On ne lui concède alors que le crédit d'une énergie indomptable, laquelle peut aussi passer pour une insatiable volonté de puissance. Comment en effet ne pas parler à son propos d'une « stratégie de pouvoir » ? Elle se déploie méthodiquement, pendant quarante ans, de l'Académie des sciences à l'Académie française en passant par l'École normale supérieure et l'Académie de médecine.

Le trouble qui saisit les historiens face au personnage ne tient-il pas en définitive à l'énigme que constitue le ressort interne de son œuvre ?

On oublie trop souvent que Pasteur commença sa carrière scientifique comme chimiste, et par un coup d'éclat. Il montre en 1848 que certaines molécules au comportement déconcertant sont composées de deux molécules jumelles, dont l'une se révèle être l'image non superposable de l'autre dans un miroir : dissymétrie moléculaire. L'illustre physicien Jean-Baptiste Biot salue l'exploit : non seulement l'admirable dextérité de l'expérimentateur, mais l'idée d'avoir utilisé la cristallographie en chimie. Le jeune normalien ouvrait ainsi la voie à ce que le Hollandais Jacobus Van't Hoff appellera bientôt la « chimie dans l'espace », notre « stéréochimie ».

Mais Pasteur pour sa part s'arrête là. On s'interroge. Il en donne pourtant très clairement la raison : il lui suffit d'avoir ainsi établi par voie expérimentale une propriété qui permet de distinguer sûrement les molécules organiques des molécules inorganiques (elles dévient la lumière vers la gauche). Ne tient-on pas là le ressort interne de toute son œuvre, le principe du mouvement qui l'anime ?

Lorsqu'il aborde la question de la fermentation, c'est pour établir, contre le maître de la chimie allemande Justus von Liebig, qu'on ne saurait réduire ce processus à une décomposition de la matière inanimée. Il prouve qu'on doit l'imputer à la présence de micro-organismes. Le vivant ne saurait provenir que du vivant. Claude Bernard, ironique à l'occasion (« Pasteur ne voit que ce qu'il vise »), comprend tout de suite qu'il a trouvé en lui un frère d'armes. Il fait attribuer à ce chimiste le prix de physiologie de l'Académie dès 1859. Pasteur a compris qu'il faut affirmer l'autonomie du vivant si l'on veut en faire un objet de science auquel on puisse appliquer les concepts des sciences physico-chimiques. Ses recherches ultérieures le confirment : en biologie, il se bat à double

front, contre le matérialisme qui veut réduire le vivant à l'inerte, contre le vitalisme traditionnel qui imagine quelque « force vitale » mystérieuse inaccessible à l'expérimentation.

Mais, sous-tendant cette ligne constante, s'exprime des ses premiers travaux une prise de position philosophique sur laquelle il ne transigera jamais : qu'on cesse de mêler subrepticement science et religion par philosophie interposée. N'était-ce pas là déjà l'erreur fondamentale de Liebig dont la pensée restait tributaire de la philosophie romantique allemande de la nature ? Il « animait » la matière pour mieux réduire le vivant à l'inerte.

En 1858, Félix Archimède Pouchet, physiologiste rouennais, lit une communication devant l'Académie des sciences. Il prétend avoir expérimentalement provoqué une « génération spontanée » de micro-organismes vivants à partir d'une solution inerte de matière putrescible. L'année suivante il publie un épais volume développant sa théorie. Pasteur y voit tout de suite un défi personnel à relever. Pendant cinq ans, il va mettre un extraordinaire acharnement à réfuter Pouchet sur le terrain de l'expérimentation : celui qui avait été le sien dans ses premiers travaux, celui sur lequel Pouchet a cru pouvoir transporter la vieille question de la génération spontanée. Pasteur sait que la procédure expérimentale de Pouchet n'est pas susceptible d'abolir la différence qu'il a établie entre les molécules organiques et inorganiques. Elle doit donc comporter une faille. Mais la source ultime de l'erreur de son adversaire ne fait pas de doute à ses yeux : la question de l'origine de la vie ainsi posée réintroduit subrepticement, sous couvert de philosophie, la religion dans la science... La preuve : Pouchet, émule de Cuvier, voit dans l'idée de génération spontanée un argument en faveur de l'intervention divine dans la Création, mais Pasteur fera remarquer que de nombreux darwiniens en tirent pour leur part des arguments en faveur de l'athéisme...

La portée politique de l'argumentation mise en scène dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne, le 7 avril 1864, devant l'élite du monde intellectuel apparaît clairement. Il s'agit d'un grand spectacle philosophique. Aux autorités religieuses, et tout spécialement à l'Église catholique, il adresse ce message clair : « Cessez d'avoir peur de la science. » Elle ne met pas les dogmes en péril. Elle démontre au contraire elle-même par la pratique de l'expérimentation qu'on ne saurait confondre les deux ordres de pensée. Au pouvoir politique : la science, si on ne tente pas de l'enrôler au service de quelque philosophie préétablie, fera régner la paix civile et, par ses applications, apportera le bien-être à tous. A nouveau, Pasteur se bat à double front : contre le spiritualisme et contre le scientisme.

Il vient un temps où les dirigeants de la III^e République adhèrent à ce discours. Le scientisme officiel avait nourri un anticléricalisme militant. Paul Bert s'en était fait l'un des héros. Il devint bientôt l'un des soutiens de Pasteur à l'Assemblée. La position qu'avait défendue le chimiste s'accorde parfaitement avec les

exigences d'apaisement et de concorde nationale qui s'imposent après les déchirements de la séparation de l'Église et de l'État. À la science son domaine, à la religion le sien. Événement symbolique. En 1882, Pasteur, reçu à l'Académie française par Ernest Renan, succède à Émile Littré, disciple d'Auguste Comte. Il réserve à son prédécesseur un singulier éloge : une critique en règle du positivisme, au nom de l'expérimentation. La science dite positive a le tort de vouloir se substituer aux doctrines théologiques et métaphysiques, elle n'a pour domaine propre que celui du laboratoire ! Le positivisme le laisse, conclut-il, « réservé et défiant ».

Pasteur ne cesse, en contrepoint, d'exalter la valeur morale du travail expérimental. Inutile de vouloir fonder une morale laïque sur une science de la morale, c'est la science elle-même qui est morale ! Témoin le morceau de bravoure que, frappé d'hémiplégie et malade, il fait lire par son fils en 1892 à la Sorbonne : « Jeunes gens, jeunes gens, confiez-vous à ces méthodes sûres, puissantes, dont nous ne connaissons encore que les premiers secrets [...], vivez dans la paix sereine des laboratoires et des bibliothèques. » Dès 1871, il avait dépeint les laboratoires comme « les temples de l'avenir et du bien être ».

Pas plus que la qualité de ses travaux expérimentaux, ces motifs politiques n'auraient cependant suffi à lui gagner la gloire qui fut la sienne. Il la doit indéniablement aux applications de ses recherches en médecine. Mais, comme Jacques Léonard l'a bien montré, jusqu'en 1880 les médecins ne voient dans le pasteurisme que l'intrusion d'une nouvelle version de la fumeuse théorie des germes de Raspail. Ils ne manquent pas une occasion de souligner que Pasteur n'est « même pas médecin ». Émile Chauffard pourfend le « parasitisme ». On risque, contre lui, l'expression de « choléra intellectuel » ! Seuls le soutiennent alors les chirurgiens de l'École de Joseph Lister qui prônent l'antisepsie et surtout les hygiénistes, séduits par la vision microbienne du monde qui justifie leur ascension sociale.

À partir de 1881, dès lors qu'il aborde avec succès le traitement des maladies infectieuses, un brusque retournement se produit. Les grands noms de la médecine se rallient, conscients du surcroît de prestige que leur confèrera l'alliance avec la science du laboratoire. En 1887, Pasteur, après avoir « vaincu la rage », reçoit une extraordinaire ovation au Congrès international de médecine qui se tient à Vienne. Le prince des savants, le héros de la République devient désormais le « bienfaiteur de l'humanité » que célèbre, édition après édition, *Le Tour de France par deux enfants*, le manuel de lecture ordinaire du Cours moyen en usage dans les écoles. Ne voit-on pas les pastoriens donner son élan à la médecine tropicale et, se réjouit-on, ouvrir ainsi à nos troupes les voies par lesquelles pénètre la civilisation dans les régions deshéritées de la planète... ?

De la gloire pastorienne les motifs politiques immédiats ont disparu. Mais le pasteurisme n'a cessé de

s'infiltrer dans tous les domaines qui touchent, de près ou de loin, à la santé publique. L'image scientifique et triomphante de la médecine qu'il avait imposée a perduré, soutenue depuis par le système hospitalier et les grandes industries pharmaceutiques. Plus généralement Pasteur a été l'un de ceux qui ont donné corps dans notre pays à la communauté scientifique face à des élites restées littéraires, en s'appuyant sur l'industrie. Mettant à profit ce qu'on a appelé la « crise allemande » de la pensée française, il a voulu faire reconnaître l'effort en faveur de la recherche comme un devoir national.

Le personnage de Pasteur embarrasse aujourd'hui parce que l'image de la science que de toute son énergie il a contribué à promouvoir a subi trop de démentis dans ce siècle. Qui oserait encore écrire après Hiroshima que les progrès de la science constituent la promesse assurée de la paix et du bien-être ? Devant les piétinements de la recherche sur le SIDA, on a appris que l'indispensable rigueur expérimentale ne suffit pas à ouvrir une voie aussi directe qu'il le prétendait à l'application thérapeutique. La leçon la plus précieuse de Pasteur ne tient-elle pas cependant au lien qu'il a toujours maintenu entre son exigence expérimentale et sa position philosophique de combat à double front. À l'heure où le scientisme domine les sciences du vivant et où, sous couvert d'éthique, un certain spiritualisme menace la recherche fondamentale, il n'est peut-être pas inutile de méditer sur une œuvre immense, ardente, qui a contribué à changer la face de notre monde, sans en exclure le geste d'expérimentation sur Joseph Meister qui fit sa gloire universelle...

● *Mémoire sur la fermentation appelée lactique* (1847). – *Mémoire sur la fermentation alcoolique* (1860). – *Mémoire sur la fermentation acétique* (1864). – *Études sur le vin* (1866). – *Claude Bernard* (1866). – *Études sur le vinaigre* (1868). – *Études sur la maladie des vers à soie* (1870). – *Études sur la bière* (1876). – *La théorie des germes et ses applications à la médecine et à la chirurgie* (1878). – *Sur les maladies virulentes et en particulier sur la maladie appelée vulgairement choléra des poules* (1880). – *De la possibilité de rendre les moutons réfractaires au charbon par la méthode des inoculations préventives* (1881), in *Œuvres de Pasteur*, réunies par Pasteur Valléry-Radot, Paris, Masson & Cie, 1922-1939. – *Correspondance réunie et annotée par Pasteur Valléry-Radot*, Paris, Grasset, 1940. – *Écrits scientifiques et médicaux*, choix, prés. et notes A. Pichot, Paris, Flammarion, 1994.

► DAGOGNET F., *Méthodes et doctrine dans l'œuvre de Pasteur*, Paris, PUF, 1967 ; *Pasteur sans la légende*, Le Plessis-Robinson, Les empêcheurs de penser en rond, 1994. – DUBOS R., *Louis Pasteur, franc-tireur de la science*, trad. fr. E. Dussauze, Paris, PUF, 1955. – JACQUES J., *La molécule et son double*, Paris, Hachette, 1992. – LATOUR B., *Microbes, guerre et paix*, Paris, Métailié, 1984 ; *Science in action. How to follow scientists and engineers through society*, Harvard Univ. Press (Mass.), 1987. – SALOMON-BAYET C. dir., *Pasteur et la révolution pastorienne*, Paris, Payot, 1986. – VALLÉRY-RADOT R., *La vie de Pasteur*, Paris, Hachette, 1990.

Dominique LECOURT

→ Biotechnologies ; Épidémie ; Génération spontanée ; Micro-organisme ; Origines de la vie ; Stéréochimie.

PAULI Wolfgang, 1900-1958

Physicien suisse d'origine autrichienne né à Vienne, mort à Zurich. Pauli a formulé en 1925 le principe d'exclusion : deux électrons d'un même atome ne peuvent avoir des nombres quantiques identiques. En 1918 il entreprend des études de physique théorique à l'université de Munich. Dès 1921, il publie un texte sur la relativité qui demeurera longtemps une référence. La même année, il soutient son doctorat dirigé par Sommerfeld sur la théorie quantique de l'hydrogène moléculaire. En 1921-1922, il est assistant de Max Born à l'université de Göttingen où il rencontre Niels Bohr. Il séjourne à l'Institut de Copenhague d'octobre 1922 à septembre 1923 où il consacre ses recherches à l'effet Zeeman anormal. Le déplacement des lignes spectrales d'un atome placé dans un champ magnétique intense, inexplicable par la seconde théorie atomique de Bohr, suscite d'intenses controverses épistémologiques entre les deux hommes : la notion classique de trajectoire des électrons à laquelle Bohr demeure fidèle est vivement critiquée par Pauli qui y voit un obstacle au développement de la théorie quantique.

À son retour de Copenhague, Pauli enseigne la physique à l'université de Hambourg. À la suite de ses travaux sur l'effet Zeeman qui l'avaient conduit à introduire un quatrième nombre quantique, Pauli énonce en janvier 1925 le principe d'exclusion : dans un même atome, deux électrons ne peuvent posséder les mêmes quatre nombres quantiques.

En 1928 Pauli succède à Erwin Schrödinger comme professeur à l'Eidgenössische Technische Hochschule de Zurich. En 1930, il propose une solution au problème posé par la désintégration bêta : en violation du principe de conservation de l'énergie, on observe un spectre continu des électrons produits par la désintégration plutôt qu'un spectre discret. Décidé à ne pas abandonner ce principe fondamental Pauli suppose qu'une particule neutre et de faible masse accompagne l'électron au cours de la désintégration. Une nouvelle particule élémentaire est découverte en 1956 : elle sera identifiée comme le neutrino, conférant ainsi la réalité empirique aux spéculations théoriques de Pauli.

En juillet 1940, Pauli quitte Zurich pour Princeton. Il retournera à Zurich après la guerre et y demeurera jusqu'à sa mort. Wolfgang Pauli a reçu le prix Nobel de physique en 1945 pour le principe d'exclusion.

● *Writings on physics and philosophy*, Berlin, Springer-Verlag, 1994. – *Collected Scientific Papers*, éd. R. Kronig & V.W. Weisskopf, New York, Interscience Publ., 1964. – PAULI W. & JUNG C.G., *Naturerklärung und Psyche*, Rasher, 1952.

► LAURIKAINEN K.V., *The message of the atoms : Wolfgang Pauli and the unspeakable*, New York, Springer, 1996 ; *Theoretical Physics in the Twentieth Century, a Memorial Volume to Wolfgang Pauli*, New York, 1960 ; *Wolfgang Pauli's*

conception of reality, Symposium on the foundations of modern physics, Singapore, 1985.

Mathieu GOUNELLE

→ Électron ; Indiscernabilité ; Matière (PHYSIQUE) ; Quantique.

PAVLOV Ivan Petrovitch, 1849-1936

Physiologiste russe, initiateur des recherches sur ce qu'il a appelé la « physiologie de l'activité nerveuse supérieure ». Il reçut, en 1904, le prix Nobel de médecine et de physiologie pour ses travaux sur la physiologie digestive. Avec ses expériences sur les chiens, il instaurait un mode de recherche nouveau dans la physiologie avec l'idée d'obtenir « un tableau physiologique objectif et complet de l'activité supérieure des animaux, du fonctionnement normal du segment supérieur de l'encéphale, au lieu des expériences effectuées jusqu'alors et basées sur l'excitation artificielle et la destruction ». Il montra que la sécrétion des glandes salivaires d'un chien est déclenchée par la vue d'une nourriture alléchante, mais aussi par un quelconque signal accompagnant cette vue lorsque celui-ci a été émis à plusieurs reprises de manière concomitante à la présentation de nourriture. Dans ses *Conférences sur l'activité des principales glandes digestives* parues en 1897, il nomme « sécrétions psychiques » l'activité glandulaire déterminée par la seule émission du signal. Son intention n'est pourtant pas de suggérer que les réactions psychiques ont une nature spécifique. Il veut au contraire souligner l'unité du psychisme autour des notions d'excitation et d'inhibition et marquer que la liaison qui caractérise le réflexe conditionnel est une liaison entre des excitations (non une liaison entre un excitant et une réponse comme dans la tradition behavioriste américaine).

● *Les réflexes conditionnels, études objectives de l'activité nerveuse supérieure des animaux*, trad. fr. N.G. Gricouroff, Paris, Alcan, 1927. – *Le travail des glandes digestives*, trad. fr. V. Pachou & J. Sabrazès, Paris, Masson, 1901. – *Réflexes conditionnels et inhibition*, trad. fr. N. & G. Gricouroff, Paris, Gonthier, 1963.

Pascal NOUVEL

→ Neurophilosophie ; Réflexe.

PEIRCE Charles Santiago Sanders, 1839-1914

Savant et philosophe américain, inventeur du pragmatisme. Sa théorie du signe, centrale, renvoie la pensée, qui est signe, non seulement à son objet, mais également à une nouvelle pensée-signe, qui est son interprétant, et cela indéfiniment selon un processus triadique continu et partiellement virtuel. Les domaines de l'Être et du connaissable sont équivalents. Réaliste, Peirce suppose l'existence des phénomènes indépendamment de l'intelligence, mais ceux-ci ne peuvent être saisis

avec la précision postulée par le nominaliste. Il y a un vague essentiel aux choses mêmes et à la pensée, qui ne saurait atteindre à l'universalité et à l'exactitude absolues. Tout dans la nature est de l'ordre du hasard (tychisme), mais aussi tendance à la généralité ou continuité (synéchisme). La science est un ensemble de croyances (ou habitudes) faillibles, toujours susceptibles d'être réfutées par l'expérience. La méthode scientifique procède du vague au général. Elle a valeur autocorrectrice : la vérité, jamais définitive, est ce vers quoi tend la science. La déduction n'est pas plus certaine que l'induction : on observe qu'une démonstration est la preuve d'une proposition. L'induction n'est pas tant généralisation que vérification : elle suppose des lois probabilistes et l'identité de la fréquence à la loi. La formulation des hypothèses est le fait de l'abduction ou rétroduction, qui n'est pas un processus probabiliste, mais plutôt inférence à la meilleure hypothèse, véritable processus d'invention.

● *Collected Papers*, vol. 1-6 : éd. Ch. Hartshome & P. Weiss ; vol. 7-8 : éd. Burk, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1931-1958. – *Semiotics and Signifies. The Correspondance between Charles S. Peirce and Victoria Lady Welby*, éd. Ch.S. Hardwick, Bloomington/Indianapolis, Indiana Univ. Press, 1977. – *Writings of Charles Sanders Peirce, A Chronological Edition, Peirce Edition Project*, M.H. Fisch & C.J.W. Kloesel dir., Bloomington/Indianapolis, Indiana Univ. Press, vol. 1 (1857-1866), 1982 ; vol. 2 (1867-1871), 1984 ; vol. 3 (1872-1878), 1986 ; vol. 4 (1879-1884), 1990. – *The New elements of mathematics*, éd. C. Eisele, La Haye, Mouton, 4 vol., 1982-1989. – *The Essential Peirce*, éd. N. Houser & C. Kloesel, vol. 1 : 1867-1893, Bloomington/Indianapolis, Indiana Univ. Press, 1992. – *Écrits sur le signe*, choix, trad. et comm. G. Deledalle, Paris, Le Seuil, 1978. – *Textes anticaricéliens*, prés. et trad. J. Chenu, Paris, Aubier, 1984. – *Textes fondamentaux de sémiotique*, introd. D. Savan, trad. et notes B. Foucher-Axelsen & C. Foz, Paris, Méridiens-Klincksieck, 1987. – *Le raisonnement et la logique des choses* (Cambridge lectures, 1898), trad. C. Chauviré, P. Thibaud & C. Tiercelin, Paris, Le Cerf, 1995. – *À la recherche d'une méthode*, trad. et éd. J. Deledalle-Rhodes & M. Balat, dir. G. Deledalle, Presses Univ. de Perpignan, 1993. *Œuvres philosophiques*, éd. C. Tiercelin et P. Thibaud, vol. I, *Pragmatisme et pragmatisme*, Paris, Éditions du Cerf, 2002. Vol. II, *Pragmatisme et sciences normatives*, Paris, Cerf, 2003.

► CARONTINI E., *L'action du signe*, Louvain-la-Neuve, Cabay, 1984. – CHAUVIRÉ C., *Peirce et la signification. Introduction à la logique du vague*, Paris, PUF, 1995 ; *Le grand miroir : essais sur Peirce et sur Wittgenstein*, Besançon, Presses universitaires franc-comtoises, 2003. – CHIASSON Ph., *Peirce's pragmatism : the design for thinking*, Amsterdam, Atlanta, GA, Rodopi, 2001. – DELEDALLE G., *Lire Peirce aujourd'hui*, Bruxelles, de Boeck, 1990 ; *Charles S. Peirce's philosophy of signs essays in comparative semiotics*, Bloomington, Indiana Univ. Press, 2000. – HOOKWAY Ch., *Truth, rationality, and pragmatism : themes from Peirce*, Oxford, New York, Clarendon Press, Oxford Univ. Press, 2000. – JAPPY T., RÉTHORE J., éd., *Sémio- tique peircienne : état des lieux : actes du colloque international*, Canet-Plage, 27-30 juin 2001, Perpignan, Presses universitaires de Perpignan, 2002. – MARIETTI S., *Icona e diagramma : il segno matematico in Charles Sanders Peirce*, Milano, LED, Edizioni universitarie di lettere, economia, diritto, 2001. – MARTY R., *L'Algèbre des signes*, Amsterdam/Philadelphie, John Benjamins, 1990. – MISAK C. J., *The Cambridge*

companion to Peirce, Cambridge, UK, New York, Cambridge Univ. Press, 2004 ; *Truth and the end of inquiry : a Peircean account of truth*, Oxford, New York, Clarendon, Oxford Univ. Press, 2004. — RESCHER N., *Peirce's Philosophy of Science. Critical Studies in His Theory of Induction and Scientific Method*, Notre-Dame/Londres, Univ. of Notre-Dame Press, 1978. — REYNOLDS A., *Peirce's scientific metaphysics the philosophy of chance, law, and evolution*, Nashville, Vanderbilt Univ. Press, 2002. — TIERCELIN C., *La Pensée-signe. Études sur C.S. Peirce*, Nîmes, Jacqueline Chambon, 1993 ; *C.S. Peirce et le pragmatisme*, Paris, PUF, 1993. — WIRTH U., *Die Welt als Zeichen und Hypothese : Perspektiven des semiotischen Pragmatismus von Charles Sanders Peirce*, Frankfurt am Main, Suhrkamp, 2000.

Anne-Françoise SCHMID

→ Abduction ; Induction ; Langages formels ; Pragmatisme ; Proposition ; Réalisme ; Vérité.

PHÉNOMÈNE

Selon les remarques de J.-P. Dumont le problème posé par la définition du concept de phénomène peut montrer comment un concept archaïque scientifique a pu, au regard de la philosophie, remplir le rôle de modèle, puis qu'un problème formulé par les Pythagoriciens repris par Platon et Aristote s'est transmis à Kant qui formule le problème de la connaissance sous une forme critiquée par Hegel et Husserl.

Le terme de phénomène a d'abord correspondu au statut que les penseurs grecs, prédécesseurs ou contemporains de Socrate, ont assigné au perçu. Puis, sur la base de cette configuration du problème, la philosophie a élaboré ses catégories dont les principales, le sujet et l'objet, ont servi à donner une forme proprement spéculative à ce problème. Le concept de phénomène pose de façon générale la question de la nature de l'objectivité de nos connaissances, en particulier, est-ce parce que nous participons à l'élaboration des concepts et même des objets scientifiques que l'accès qu'ils ménagent au monde extérieur nous reste partiel ?

C'est d'abord dans le cadre d'une analyse de la perception que l'analyse du phénomène s'est développée. Les témoignages les plus significatifs relatifs à la nature du phénomène chez les Anciens ont été conservés par Platon et Aristote. Platon emprunte cette théorie de la perception à Empédocle (*Timée* 45b et 67c) et à Protagoras (*Théétète*, 155c-158b). Aristote connaît cet examen par Platon de la thèse de Protagoras (*Métaphysique* B, IV, 999b 3) et la reproduit pour la critiquer (G, IV-VI et K, VI). Tous ces témoignages présentent l'image concordante du phénomène comme une réalité physique engendrée dans l'espace intermédiaire entre le sens et l'objet sensible par la disposition du sens et par la nature de l'objet. La cause de la blancheur qui est dans l'objet et la lumière en provenance de l'œil engendrent à la rencontre de leur flux, dans la transparence diaphane du jour, un corps physique qui est le phénomène de la blancheur. D'où le fait que le phénomène est un être relatif.

Ce mixte qui le constitue, milieu entre ce qui vient de nous (ce par quoi nos sens ont accès au monde) et ce qui vient du monde (les effets du monde extérieur sur nous), impose une attitude à l'origine de tous les relativismes. Le logos humain impose à toute réalité sa mesure (Protagoras). La réalité à laquelle nous avons accès est donc relative à nos modalités d'appréhension. Mais si une telle attitude débouche nécessairement sur un scepticisme (comme le montre l'œuvre de Pyrrhon), Platon pose l'existence de réalités séparées, intelligibles et universelles, et Aristote celle de genre et d'espèce immanentes aux individus.

Ils font ainsi des phénomènes l'effet de réalités qui structurent le monde indépendamment de nous, échappant au moyen de ce réalisme à toute forme de scepticisme. Le mixte dont on part dans l'étude du sensible perçu est fondé dans les choses mêmes dont les objets perçus autant que les formes de notre perception participent. Une sorte de « transcendantal » — condition de connaissances *a priori* — est posée dans les choses mêmes.

Le phénomène c'est du sensible bien fondé et bien perçu grâce au lien qui relie l'objet perçu et le sujet percevant, lien situé dans les choses mêmes. C'est pourquoi Platon a pu définir la tâche de l'astronome comme étant celle de « sauver les phénomènes », *salvare apparentias* dira la Renaissance. Il s'agit en l'occurrence de rendre compte de l'apparence d'irrégularité des mouvements planétaires au moyen de combinaisons de mouvements circulaires qui leur restitue une signification cosmologique et donc ontologique. Ces combinaisons de mouvements circulaires sont à l'origine de toutes les descriptions mathématiques et astronomiques des mouvements des cieux et donc de notre science moderne. Le phénomène est ainsi causalement reconstruit comme effet d'une structuration des choses mêmes.

Le sens du concept de phénomène s'est vu devenir l'enjeu d'une réaction contre le relativisme. Pour Aristote, le concept de phénomène a le double sens de donné empirique et d'interprétation de ce donné. Mais le donné lui-même est bien en quelque sorte structuré pour être interprété de sorte que le donné empirique est une réalisation de la possibilité de l'interprétation ; celle-ci est assurée par la présentation de ce donné comme un fait. De la sorte une science de l'universel devient possible dont la cosmologie a été une des réalisations.

La révolution scientifique, quelle que soit la façon dont on pense sa réalisation, s'est effectuée essentiellement autour du concept de phénomène. Le mouvement de la Terre et sa réalité physique est un phénomène de type nouveau que la physique du XVII^e s. et Descartes, et les philosophes qui ont suivi, ont élaboré de façon diverse. Disons pour simplifier qu'ils enregistrent de façon extrêmement différente la participation reconnue de l'esprit humain à l'élaboration du phénomène. On peut comme l'a fait J. Vuillemin souligner cette nouveauté en montrant que l'énoncé « Si la Terre est réellement en mouvement le mouvement des étoiles est

illusoire » n'est pas équivalente à sa transposée « Si le mouvement des étoiles est réel, le mouvement de la Terre est illusoire ou apparent » au sens d'illusoire car le mouvement de la Terre n'apparaît pas. Il existe donc de manière essentielle un phénomène sensible, qui n'apparaît pas. On peut aller jusqu'à dire que deux sortes d'apparences sont promues, le phénomène au sens kantien précisément et l'apparence illusoire, différence dont l'Esthétique transcendantale fait état.

Le phénomène est donc ce qui apparaît dans l'espace et dans le temps et est donc un objet d'expérience. Il n'existe donc que dans le cadre de l'intuition sensible et dépend du mode d'intuition du sujet. Mais le phénomène de ce point de vue est le résultat d'une double position du sujet constituant. Il est effet de l'action du monde sur nous, action qui s'exerce dans le cadre des formes *a priori* de l'intuition sensible. C'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de l'expérience, bien qu'elles commencent avec elle. Mais le phénomène est également constitué par l'action des catégories de l'entendement ou concepts purs. Cette composition se réalise par la médiation de notre imagination qui, grâce aux schèmes qu'elle produit, permet donc la réalisation *in concreto* dans l'espace et dans le temps des concepts purs de l'entendement. Ainsi peut-on constituer la succession de phénomènes physiques en réalisant le concept de causalité dans l'espace et le temps, passant de la simple succession du cours du temps à l'ordre du temps. Le phénomène est ainsi le résultat d'une constitution objective. Cette constitution dépend en outre de ce qui reste à jamais l'inconnaissable corrélat du phénomène, à savoir l'objet tel qu'il existe en soi c'est-à-dire en dehors du fait qu'il est appréhendé et constitué comme phénomène. Selon la façon dont la connaissance, phénoménale par définition, est construite et décrite, il subsiste toujours une modalité d'inconnaissabilité, de non-appréhendable derrière ou sous le phénomène. Kant a tenté de saisir ou de faire saisir ce qui serait en soi, hors de toute connaissance, chose en soi, noumène lorsqu'il s'agit de l'objet qui pourrait être en relation directe et donc produit par l'entendement, objet transcendantal. Au premier sens le phénomène c'est l'être pour autant qu'il nous est donné et que nous le connaissons grâce à la médiation méthodique de l'espace et du temps, la chose en soi c'est le même être tel qu'il pourrait être connu sans conditions, pour une intuition créatrice. « Chose en soi et phénomène ne doivent pas être regardés comme deux êtres distincts, également réels l'un et l'autre, mais d'une autre manière et qui s'opposeraient pour ainsi dire comme l'archétype et la copie » (Daval, *La métaphysique de Kant*, Paris, 1953). Les catégories qui expriment la pensée d'un objet en général et comme formes de pensée font apparaître la particularité de l'intuition sensible. « L'intuition sensible n'est pas la seule intuition possible » (T.P., p. 227). « Les catégories s'étendent plus loin que l'intuition sensible en ce qu'elles pensent des objets en général, sans considérer la manière particulière (de la sensibilité) dont ils peuvent être donnés » (p. 228). Cette limitation s'exprime

dans le noumène qui est « simplement un concept limitatif qui a pour but de restreindre les prétentions de la sensibilité, et qui n'est donc que d'un usage négatif. Il n'est pourtant pas une fiction arbitraire, et il se rattache au contraire à la limitation de la sensibilité, sans toutefois pouvoir établir quelque chose de positif en dehors de la sensibilité » (p. 229).

Objectivité des phénomènes signifie liaison des phénomènes dans des séries causales déterminées par des lois. Et ici l'expérience apparaît inachevée et contingente. On doit opposer la chose scientifiquement déterminée et conditionnée à la chose en soi ou inconditionnée, c'est-à-dire comme constituant une connaissance achevée et complète. La révolution copernicienne instaurant un sujet constituant de la connaissance comme nouvelle catégorie philosophique impose la nécessité d'une chose en soi comme corrélat du phénomène. C'est montrer la nature de nos modes d'implication dans la constitution de nos objets de connaissances.

Mais Kant a fait de ce conditionnement positif dans la mesure où il est un élément de nos constructions conceptuelles la limite ultime de nos connaissances : puisse pour une part essentielle nous constituons les phénomènes il nous est impossible d'atteindre la chose en soi. Hegel a reconnu le mérite de Kant : « Les objets dont nous avons immédiatement connaissance sont de simples phénomènes, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas le fondement de leur être en eux-mêmes mais dans un Autre » (*Science de la Logique*, trad. Bourgeois, Vrin, 1986, p. 503). Il souligne donc ce qui provient de notre intervention. Mais il est faux de dire que l'en-soi des choses dont nous avons connaissance nous reste à jamais inaccessible.

Cette limitation elle-même doit être critiquée en même temps que la construction dont elle résulte. Aucun des présupposés ne doit être admis : catégories de l'entendement que Kant suppose données, la présupposition d'un substrat donné représenté comme déjà tout prêt, qui doit être la mesure de référence pour déterminer si l'une des déterminations de pensée lui convient ou non. Celle de la connaissance comme d'une simple mise en relation de tels prédicats tout prêts et fixes avec un substrat donné quelconque. Celle de l'opposition du sujet connaissant et de son objet qui ne peut être réuni avec lui, opposition dont, comme dans le cas de l'opposition qui vient d'être citée, chaque côté doit être pour lui-même pareillement quelque chose de fixe et de vrai. Les distinctions désignées par Kant ne sont ni données et, ce qui revient au même pour Hegel, ni fixes. Le sujet qui pense l'objet a en réalité pour objet lui-même, et lorsque la pensée vient à penser cet autre négatif qu'est l'objet extérieur elle s'aperçoit que l'extérieur est constitué ; le moment — selon la terminologie de la Phénoménologie de l'Esprit — de la conscience extérieure et celui de la conscience intérieure sont unifiés par un travail de la pensée, dialectique qui pousse et transforme les déterminations contradictoires les unes dans les autres.

Aussi bien Kant que Hegel ont maintenu une

distinction entre la connaissance phénoménale, phénoménologique dit Hegel, et la connaissance appelée ontologique. La première reste dans son cadre certaine, la seconde doit s'appuyer sur un système métaphysique. Hegel a unifié dans le système du savoir absolu ces deux formes de connaissance que Kant a construites comme séparées. Il s'agit de savoir si pour fonder les phénomènes il faut se référer à quelque chose qui, quel que soit son lieu d'application, dépasse les phénomènes. Ce problème a été celui des philosophies de la constitution. On sait que celles-ci, par-delà le kantisme, ont voulu proposer une théorie de l'abstraction naturelle.

Il faut, selon toutes les théories de la constitution, passer du plan des apparences à celui d'une réalité inférée. Il faut donc poser une distinction entre apparence et chose, ou entre apparence et phénomène, chose et phénomène n'étant obtenus qu'après rectification de l'apparence (J. Vuillemin, *La logique et le monde sensible*, Paris, Flammarion, 1971, p. 332).

Considérons les rectifications que l'on essaie de faire subir à l'apparence pour obtenir le phénomène scientifique. Russell a développé toute une construction en éliminant le concept de substance, en se passant des jugements de prédication pour décrire les propositions élémentaires empiriques et en garantissant l'applicabilité du principe des indiscernables. Nous savons que Russell par exemple a voulu éliminer le concept de l'individu considéré comme source de révélations nouvelles inépuisables. Mais ce n'est pas parce que le concept de substance est défini par des critères phénoménaux que l'idée de chose en soi est inutile. Le concept de substance, dit J. Vuillemin, semble faire partie de ce qui est nécessairement requis pour décrire l'univers.

Si le concept de phénomène pose éminemment le problème des relations entre un modèle archaïque et empirique de la science et de la perception et les diverses constitutions des théories de la connaissance, les philosophies de la constitution du début du XX^e s. en sont un aspect original. Elles ont essayé au prix de constructions puissantes et profondes d'effacer la coupure insupportable entre perception « empirique » et concepts scientifiques. Elles présentent toutes de ce point de vue une théorie de la bifurcation qu'il aurait fallu réduire. La bifurcation est un concept introduit par Whitehead qui répartit les données immédiates parvenant à notre conscience en deux classes qui ont pour effet de doubler la nature et la science physique dont elle est l'objet (Whitehead, *The Concept of Nature*, Cambridge, 1935). Elles cherchent un peu comme ce dernier une science « qui rejoindrait la perception dans une situation précédant la bifurcation ». Whitehead use d'un principe dit « cosmologique ». Le fini, le déterminé est « une entité dont l'existence ne se suffit pas à elle-même mais dont l'essence enveloppe le tout. Toutes les propositions sont erronées sauf si on les construit en référence à un arrière-plan que nous expérimentons sans aucune analyse consciente ». Ce principe métaphysique et cosmologique entraîne de

nombreuses difficultés conceptuelles et techniques. Une autre solution a été celle de Carnap et Goodman : ils s'efforcent d'aménager des apparences neutres qui ne requièrent ni priorité épistémologique, ni ontologique, ni aucun privilège d'accès. Le dernier donne de l'apparence une définition systématique. Son système est fondé entre autres sur une option « phénoménaliste ». Ce qui signifie qu'il admet comme base des éléments phénoménaux tels que les *qualia*, les présentations, etc. Ces éléments ne sont pas subjectifs ; (les physicalistes à la différence des phénoménalistes prennent quant à eux pour base des éléments physiques tels que les choses ou processus). Goodman s'efforce de reconstruire l'univers des apparences ou phénomènes. Pour ce faire il met en jeu la logique du premier ordre. Et il conçoit le problème comme étant de nature purement syntaxique. Mais de fait il ne résout pas la difficulté de s'en tenir à une neutralité sémantique précisément à cause de l'impossibilité qu'il rencontre de se tenir à une position phénoménaliste.

Cette difficulté reflète une difficulté plus profonde qui replace les doctrines de la constitution dans le jeu de la métaphysique classique, le désir de rétablir une continuité entre les données phénoménales premières et l'objectivation que les théories scientifiques construisent.

► DUHEM P., *La théorie physique, son objet, sa structure* (1906), 2^e éd., Paris, Chevalier & Rivière, 1914 ; *Sauver les phénomènes*, Paris, 1908. — GOODMAN N., *The Structure of Appearance*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1951. — HEGEL G.W.F., *La science de la Logique*, Paris, Aubier, 1986. — HOPKIN R.H., *The History of the Scepticism from Erasmus to Descartes*, Berkeley, 1979. — HUSSERL E., *Idees directrices pour une phénoménologie* (1912-1918), trad. fr., Paris, Gallimard, 1950 (rééd., Paris, Gallimard « Tel », 1986) ; *Recherches Logiques (Recherche VI)*, Paris, PUF « Épiméthée », 1963. — KANT E., *Critique de la Raison pure* (1781), trad. fr. J. Barni, revue A.J.L. Delamare & F. Marty, Paris, Gallimard, 1950. — VUILLEMIN J., *La logique et le monde sensible*, Paris, Flammarion, 1971. — WHITEHEAD A.N., *The Concept of Nature* (1920), Cambridge, Univ. Press, 1935.

Jean-Jacques SZCZECIŃSKI

→ Criticisme ; Découverte ; Expérience ; Phénoménisme ; Réalisme ; Théorie ; Transcendental.

PHÉNOMÉNISME

Ce terme désigne une attitude philosophique qu'il faut comprendre en référence à Kant et au concept de phénomène, puis de façon plus générale, dans ses conséquences comme une forme de relativisme. Kant avait posé comme un pilier de son système la différence entre le concept de phénomène, résultat objectif de la conjonction des concepts purs de l'entendement et de la réceptivité des formes de l'intuition, composition qui se réalise par le moyen des schèmes de l'imagination, médium entre la particularité de l'intuition et l'universalité des concepts. Corrélatrice de cette construction, point de référence absolu qui ne dépend en rien de nos

concepts, se trouve la chose en soi qui représente ce que pourrait être un objet de connaissance hors des conditions qui le font être tel. Une réaction contre le kantisme l'a interprété comme une philosophie qui nous rend l'absolu à jamais inaccessible et qui de plus, parallèlement, nous coupe du monde extérieur que nous ne pouvons connaître. En particulier, aussi bien dans l'idéalisme allemand que chez les lecteurs français de Kant, pour une part sous l'influence de Hegel, on a tenté de se débarrasser de la chose en soi. C'est le cas de Ch. Renouvier qui a développé une philosophie qui reprend le kantisme sans chose en soi à qui il a donné le nom de phénoménisme. Renouvier prend appui dans son itinéraire personnel sur la doctrine kantienne, et s'efforce sur un point au moins d'aller plus loin que Kant : il veut généraliser la notion de phénomène en « purifiant » le système de Kant en en supprimant les concepts de substance et de noumène, « élément corrompateur de la philosophie ».

Il semble que les successeurs de Kant qui se sont attaqués à la chose en soi sont pris dans la contradiction énoncée par Jacobi (*David Hume*, 1787) : « Sans admettre la chose en soi on ne peut pas entrer dans le système kantien, si on l'admet on en sort. »

Dans la lignée du phénoménisme il nous faut mentionner l'épistémologue anglais Hodgson (1832-1912) : il s'efforce d'étudier le contenu de conscience en dehors des conditions subjectives de son appréhension en excluant toute réalité dont on n'ait pas conscience, donc toute forme de « chose en soi ». De même veut-il exclure de sa construction philosophique le concept de cause de sa construction philosophique le concept de cause en renouant avec la tradition de l'empirisme de Hume. En effet, l'affirmation que seuls existent les phénomènes peut s'entendre en plusieurs sens tout comme l'antikanisme possède plusieurs sens. Dans une tradition à la fois humaniste et positiviste, le phénoménisme représente une affirmation de ce que l'on appellerait la spécificité scientifique.

Si l'on admet que sont synonymes phénoménisme et phénoménalisme on considérera qu'A. Comte est l'un des premiers représentants du phénoménisme. Un esprit positif, rappelons-le, par opposition à un esprit métaphysique ne se pose pas les questions stériles du « pourquoi », de la cause, qui renvoient à une structure latente des choses, thèse dont l'initiateur a été le platonisme. Il étudie comment les phénomènes naissent et se déroulent, rassemble des faits et reste prêt à s'y soumettre. Fourier a formulé les régularités quantitatives des phénomènes thermiques sans se préoccuper de la nature de la chaleur. Cuvier a élaboré les lois de la structure des organismes sans poser d'hypothèses au sujet de la nature de la vie, et Newton a décrit les phénomènes du mouvement et de l'attraction sans spéculation sur l'essence du corps et du mouvement. L'esprit positiviste est purement phénoméniste dans la mesure où il essaie d'inclure chaque phénomène observé dans l'ensemble des autres qu'il veut soumettre à la régularité des lois.

Cette position phénoméniste ou phénoménaliste a au moins quatre conséquences contradictoires : ou bien on

dit qu'il n'y a que des phénomènes et les concepts scientifiques sont là pour nous en donner la connaissance et la compréhension, ou bien nous n'avons accès qu'aux phénomènes mais il y a autre chose. Dans le premier cas ou bien la construction à partir des phénomènes est une construction objective ou au contraire elle se perd dans les méandres du conventionnalisme. Dans le second cas d'autres formes de connaissance peuvent ou bien renforcer ou assurer nos connaissances — nous retrouvons alors les fonctions ambiguës de la chose en soi — ou bien elles coupent la science à jamais de ses ambitions d'accès au réel. C'est le cas de la doctrine phénoméniste défendue par le grand historien des sciences P. Duhem (1861-1916). D'après celui-ci les hypothèses se vérifient les unes les autres et non par référence aux faits premiers et bruts, et il existe une multiplicité de systèmes théoriques possibles et contradictoires. Ainsi Ostiander, théologien du XVI^e s., défenseur de Copernic en affirmant que sa théorie est plus commode d'un point de vue calculatoire et plus simple, a-t-il raison, car rien ne nous permet de trancher entre Copernic et Ptolémée.

Le phénoménisme débouche suivant la logique de sa position sur le constat de l'impossibilité d'asseoir de façon assurée une théorie scientifique. L'exemple le plus fameux est certainement celui de E. Le Roy (1870-1954) qui défend l'idée que les lois scientifiques sont essentiellement normatives : la loi de la chute des corps ne fait rien d'autre que de définir la chute libre.

Les doctrines modernes de la constitution (Carnap, Goodman, Russell) héritent par le biais positiviste du problème du phénoménisme ou phénoménalisme. Carnap a tenté dans sa doctrine de reconstituer l'univers complet des phénomènes, des choses, d'autrui et des institutions. Goodman se restreint aux phénomènes physiques. Il oppose deux grands systèmes de construction : les physicalistes qui prennent pour unité de base les éléments physiques et les phénoménalistes qui prennent pour base les éléments phénoménaux tels que les *qualia*, les présentations... On ne peut choisir entre les deux positions, aucun des systèmes ne pouvant réclamer une priorité du point de vue de l'épistémologie ou de l'indubitabilité des données. Ce ne sont pas des positions exclusives l'une de l'autre mais des expérimentations philosophiques à pratiquer. Le problème soulevé par ces doctrines de la constitution tient essentiellement au rôle que l'on est en droit de faire jouer à l'expérience « directe » ou du moins qui nous met en relation plus ou moins primitive, non construite, avec le monde. C'est encore une façon de remettre en connexion les pôles de la subjectivité et ceux de l'objet dont on veut établir la connaissance. Ce qui caractérise le phénoménisme « logique » est l'extrême technicité avec laquelle il présente la difficulté philosophique à résoudre. Goodman tente de pratiquer une position phénoménaliste : il s'agit de construire les phénomènes à partir de phénomènes élémentaires en évitant le subjectivisme solipsiste — affirmant que nous sommes seuls à exister. Les éléments du système ne doivent pas être des états subjectifs

représentatifs d'un objet mais des éléments neutres en fonction desquels on construira aussi bien les objets que les sujets.

La problématique du phénoménisme ancrée dans la tradition du positivisme puis du positivisme logique met bien en question le rapport sur lequel la philosophie travaille pour se constituer : rapport qu'elle installe au cœur de la pratique scientifique entre la perception et les concepts scientifiques. L'opposition du phénoménisme et de son symétrique le physicalisme recouvre à l'évidence celle des objets naturels ou perceptifs et des objets scientifiques. Mais elle représente aussi celle du subjectif et de l'objectif. On a pu voir aussi (J. Vuillemin) celle de deux types d'abstraction, « celle qui fait usage d'une opération contrainte de suivre les indications "naturelles" inscrites dans les éléments, et l'abstraction arbitraire applicable à volonté aux éléments définis ». Mais il faut y voir aussi les formes quasi anthropologiques par lesquelles la subjectivité philosophique refuse de céder ses droits à l'intérieur de la pratique scientifique.

► CARNAP R., *Der logische Aufbau der Welt*, Berlin, Weltkreis, 1928. — DUHEM P., *Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée*, Paris, Hermann, 1908. — GOODMAN N., *The Structure of Appearance*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1951. — KANT E., *Critique de la raison pure* (1781), trad. fr., Paris, PUF, 1950. — LE ROY E., *L'exigence idéaliste et le fait de l'évolution*, Paris, 1927. — RENOUVIER C., *Essais de critique générale*, Paris, 1844-1864. — VERNEAUX R., *Renouvier disciple et critique de Kant*, Paris, 1945. — VUILLEMIN J., *Physique et métaphysique kantienne*, Paris, PUF, 1955.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Carnap ; Cercle de Vienne ; Conventionnalisme ; Criticisme ; Positivismes.

PHÉNOMÉNOLOGIE

Le concept de phénoménologie est d'abord un concept méthodologique qui, dans certaines sciences (physique, biologie), renvoie à une description préalable du processus étudié, menée généralement au niveau macroscopique et précédant les tentatives d'explication ultérieures. Ce terme a pu avoir une valeur idéologique dans le grand débat lié à l'énergétisme dans la seconde moitié du XIX^e s. Kirchhoff ou Mach l'emploient pour caractériser un point de vue purement descriptif qui refuse d'introduire dans l'analyse physique aucune entité explicative (et rejette donc notamment le privilège de l'explication mécaniste), et se contentent de rendre compte des phénomènes tels qu'ils sont donnés. Mach appelle ainsi de ses vœux le développement d'une « phénoménologie physique universelle, embrassant tous les domaines », réquisit épistémologique qui s'accompagne d'une certaine forme de monisme méthodologique, tous les phénomènes se voyant dès lors traités de façon relativement homogène, descriptivement, indépendamment de leur

identité métaphysique supposée, et particulièrement du fait de savoir si, du point de vue métaphysique, ils sont corps ou esprit (cf. *L'analyse des sensations*, chap. I). En dehors de toute considération métaphysique, Boltzmann s'opposera vigoureusement à ce point de vue sur le plan épistémologique, en mettant en évidence les limites de la prétention à une description « pure » en physique, et la nécessité d'y recevoir des concepts abstraits qui y sont de toute façon à l'œuvre.

C'est pourtant sur le fond de cet usage épistémologique contemporain qu'il faut comprendre l'introduction progressive d'abord par Brentano (cours sur la psychologie descriptive de 1888/1889) et Dilthey, puis par Husserl, du concept de phénoménologie dans la philosophie moderne. Ce terme n'était certes pas sans passé philosophique : inventé par Lambert (1764) et repris par Kant, il désignait, dans le contexte du leibnizianisme tardif, une théorie de l'apparence, destinée à la délimiter et à en réduire les effets sur notre accès à la vérité, par sa rationalisation. Chez Hegel, dans un usage très particulier du terme, il renvoie à la nécessité pour le vrai de se phénoménaliser, de traverser le processus d'un apparaître selon les différentes figures de la conscience (qui n'est pas nécessairement ni d'abord individuelle). Mais lorsqu'il s'impose, à partir de Brentano, chez Husserl, c'est avec un sens bien différent, et où il faut d'abord reconnaître la marque de l'usage épistémologique.

Lorsque Husserl thématise, dans la préface du corps même des *Recherches logiques* (1901, après le premier tome paru en 1900 sous le titre de *Prolégomènes à la logique pure*), le projet spécifique d'une phénoménologie, en rupture avec la théorie de la connaissance de son temps, il y a d'une attitude philosophique essentiellement descriptive, déterminée par l'exigence de l'absence de présuppositions, et de renoncement à toute stratégie explicative qui nous conduirait à extrapoler au-delà du donné. D'une certaine façon, c'est une définition universelle de la phénoménologie, au-delà de toute la richesse de variantes qui seront les siennes par la suite, qui est avancée : recevoir le donné tel qu'il est donné. Ce que Husserl résume dans la fameuse formule-slogan du « retour aux choses elles-mêmes ». Évidemment, tout le problème est de s'entendre sur ce que peuvent signifier lesdites « choses ». Métaphysiquement, la phénoménologie se caractérise certainement par la plus grande réévaluation de l'apparaître dont la tradition philosophique ait été le théâtre, et éventuellement contre elle. Autant de paraître, autant d'être, selon une formule parfois utilisée par Husserl (*Méditations cartésiennes*, § 46), mais aussi par Heidegger (*Être et temps*, § 7). Cela non pas au sens où comme chez Kant l'être se tiendrait derrière l'apparaître comme son référent obligé et en lui-même inaccessible (la chose en soi), mais au sens où il n'est d'être qu'attesté dans la sphère de l'apparaître elle-même : ce qui est, c'est ce qui se montre. Faut-il pour autant faire de la phénoménologie (surtout compte tenu de ses racines chez Brentano, lecteur de Comte et de l'empirisme anglais) une forme de positivisme ? Tout l'effort

de Husserl sera d'ouvrir la sphère de l'apparaître au-delà des bornes qu'y avaient mises le positivisme et le naturalisme de son temps. Dès les *Recherches logiques*, il affirme la possibilité pour les objets abstraits et les formes d'objectivités supérieures produites par la mathématique formelle d'être donnés, et de faire l'objet d'une forme d'expérience, qu'il nomme « intuition catégoriale » (VI^e Recherche logique).

Cet élargissement de la sphère de l'apparaître, qui y fait tomber ce qui jusque-là en était exclu par le positivisme ambiant, est le geste fondateur de la phénoménologie. L'analyse portera désormais sur les divers modes d'apparaître des objets, caractérisés, suivant une détermination déjà introduite par Brentano, par l'intentionnalité : il n'est pas de conscience (ou d'apparaître, car le sens de ce mot « conscience » demeure vague dans les *Recherches*) qui ne soit orientée vers son objet, orientation selon laquelle l'objet apparaît. Il y va de la conquête d'un domaine nouveau, qui, pour Husserl, justifie une méthode, voire une discipline philosophique inédite. Dans les *Recherches logiques*, une certaine ambiguïté subsiste quant à la nature de cette sphère d'apparaître : quelle que soit la détermination brentanienne de départ de la phénoménologie comme « psychologie descriptive », bientôt remise en question (dès 1903), l'ensemble des analyses des *Recherches* (dès 1903), l'ensemble des analyses des *Recherches* sont installées dans une certaine forme de neutralité descriptive. Que décrit-on exactement, lorsqu'on décrit « ce qui apparaît » ? On ne sait pas bien : ce sont des processus d'apparaître pris dans leur neutralité même, dont aucune détermination n'a ici vraiment d'importance si ce n'est celles qui peuvent précisément être saisies par la description. Cette indétermination, dans ce qu'elle peut comporter de vulnérabilité par rapport à une certaine forme de naturalisme embarrassera pourtant Husserl de façon croissante, jusqu'à ce qu'il décide (entre 1905 et 1907) de la résoudre par un véritable tournant dans sa pensée. Sortant alors de la « neutralité métaphysique », il se convertit à l'idéalisme transcendantal, comme on le voit dans les *Idees directrices pour une phénoménologie* (1913). Ce qui était jusque-là mis au compte d'une certaine neutralité d'apparaître est maintenant attribué au rôle constitutif, fondateur et prestataire de sens d'une conscience transcendantale, et c'est la subjectivité (violemment critiquée dans les *Recherches logiques*, V, § 8, au nom précisément de la neutralité descriptive) qui fait sa réapparition au cœur de la phénoménologie, dont on peut dire qu'elle va désormais tourner autour d'elle — leur histoire sera largement commune au XX^e s. Mais l'institution d'une subjectivité transcendantale (sous-traitée à l'existence factuelle et empiriquement déterminable) permet évidemment d'apporter une solution au problème du naturalisme, en ne faisant plus dépendre le plan d'apparaître de rien qui puisse tomber sous le coup des savoirs empiriques constitués (biologie, psychologie, sociologie).

Si l'on suit Husserl sur la voie de la phénoménologie transcendantale, on peut dire qu'ainsi il a, pour la première fois dans l'histoire de la pensée, réussi à

autonomiser pleinement l'apparaître, à en faire une sphère propre d'analyse et de description, indépendante de toute factuelité réelle, mais où se décide précisément le sens d'apparaître de ladite factuelité aussi. « Rien qui n'apparaisse » devient ici : « rien qui n'apparaisse pour la conscience transcendantale et qui ne soit constitué par elle », la constitution renvoyant aux procédures par lesquelles le sens de ce qui apparaît est délimité et prescrit par la conscience. L'analyse phénoménologique, se déployant sous régime de réduction (c'est-à-dire sur la base de cette opération qui consiste à suspendre notre intérêt naturel pour l'effectivité de ce qui nous entoure pour ne plus considérer que le sens selon lequel ces choses — et éventuellement leur effectivité même — nous apparaissent), donne alors l'image d'un véritable déni — conscient et méthodique — d'empiricité. C'est à ce titre qu'elle soulèvera bien des critiques, peu des élèves de Husserl du reste acceptant la « réduction » — sans pour autant retomber dans l'empirisme.

La phénoménologie a eu, au cours du XX^e s., un développement contrasté, assorti généralement de vigoureuses critiques de son concept même, hérité du maître : à ce titre, on relèvera bien sûr la percée de Heidegger dans *Être et temps* (1927) en direction d'une « ontologie phénoménologique », qui réinscrit l'apparaître du phénomène dans l'horizon temporel qui est celui de l'existence humaine, son adaptation existentielle par Sartre, et sa critique, d'inspiration religieuse, mais qui demeure dans sa méthode assez largement phénoménologique, par Levinas (*Totalité et infini*, 1961). La pensée heideggerienne est le théâtre d'une critique de la science moderne, conçue comme technoscience, en tant qu'elle prétend à un projet de domination du monde, qui, selon Heidegger, n'exprime rien d'autre que l'accomplissement de la métaphysique occidentale, en tant que celle-ci, depuis les Temps modernes (Descartes), s'est proposée de réduire ce qui est à un objet, donné à la conscience et maîtrisable par elle. Mouvement dont participeraient Husserl lui-même et le sens qu'il a imprimé à la phénoménologie, dernière donne de la métaphysique occidentale.

Quels que soient le sens et la valeur qu'il faut accorder à cette critique, il faut remarquer deux choses. Premièrement, il est indiscutable qu'un théoricisme de principe traverse toute la pensée de Husserl, cela, quoi qu'on ait pu en dire, jusqu'à la dernière période de sa vie. Deuxièmement, cet engagement théorique de sa pensée s'accompagne d'un lien authentique avec la science et l'histoire des sciences de son temps. Lien dont on peut dire qu'il ne caractérisera pas le développement ultérieur de la phénoménologie (quel que soit l'intérêt très réel d'un Merleau-Ponty pour la psychologie et la biologie de son temps, et à plus forte raison pour l'explosion des sciences humaines, ce qui relèverait toutefois d'une tout autre problématique). Il ne faut évidemment jamais oublier que la phénoménologie est née sous la plume d'un mathématicien, et que cette rencontre, loin d'être incidente, a eu un rôle moteur dans la constitution du champ de cette discipline

philosophique. L'invention de la phénoménologie est d'abord à rapporter à la lutte d'un savant austro-allemand contre le psychologisme (la prétention à fonder les vérités scientifiques, particulièrement logiques, sur des faits ayant trait à la nature de l'esprit humain), à l'instar de celle de Frege, contrebalancée par la nécessité de dire pourtant quelque chose de la façon que ces vérités ont de se manifester, et par l'intuition que leur indépendance même, en tant que vérités, par rapport à leur mode de manifestation, a un impact sur la forme du champ de l'apparaître, sur la façon dont les choses se manifestent en général. En d'autres termes : si les vérités mathématiques doivent faire partie de notre monde (de ce qui nous apparaît comme un monde), alors cela crée une contrainte sur la forme d'apparaître de ce monde. Telle est l'intuition de départ de la phénoménologie, indissociable donc de son ancrage logico-mathématique.

On peut évidemment s'inquiéter de la persistance ici du présupposé d'un monde commun, dans lequel idéalisés mathématiques, centaures fictifs et gazelles bien réelles courraient de concert. N'y a-t-il pas là encore une illusion qui est celle de l'absence de solution de continuité entre le monde de l'expérience et celui de la science, unis dans une même évidence phénoménologique (qui fonderait peut-être subrepticement le second aux frais du premier, dans l'ignorance du reste de leur richesse et de leur hétérogénéité respective) ? Après l'empirisme et les philosophies transcendantales classiques, n'y a-t-il pas là le maintien, voire l'accomplissement d'un préjugé : celui d'une raison commune, inscrite dans l'ordre même des phénomènes, comme telle soustraite à l'histoire ou aux réserves de l'anthropologie, ou qui, plus subtilement, deviendrait, comme chez le dernier Husserl, la raison même de celles-ci – y récupérant alors en définitive son unité. N'est-ce pas d'ailleurs cette unité perdue que Husserl essaie à toutes forces de retrouver dans son dernier livre (*La crise des sciences européennes*), où, prenant acte de la crise des fondements introduite notamment dans la physique par la relativité et les *quanta*, il propose de reconduire la science, dans ses formations historiques supérieures marquées par la prédominance de l'élément symbolique (le formalisme mathématique), à ses intuitions originaires, puisées dans la géométrie sensible du « monde de la vie », qui est celui de la quotidienneté ? Il ne faudrait pourtant pas se hâter de formuler un jugement définitif et sous-estimer la sensibilité de la phénoménologie husserlienne aux ruptures de grammaire, sensibilité qui précisément constitue cette conscience de crise propre à *La crise des sciences européennes* et qui en fait, à plus d'un titre, un texte tragique.

Dès les *Recherches logiques*, l'ontologie husserlienne était marquée par la disjonction radicale de deux *a priori* : synthétique-matériel (*grossa modo* celui de la perception) et analytique-formel (celui des disciplines mathématiques) que rien – sauf peut-être à recourir à une subjectivité transcendantale – ne paraissait pouvoir réconcilier. De ce point de vue, l'engagement formaliste (dès 1900 dans des conférences à la Société

mathématique de Göttingen, puis dans *Logique formelle et logique transcendantale* en 1929) de Husserl en philosophie des mathématiques, plutôt que l'ambition dénoncée par Cavailles (récupérer l'ensemble des objets dans un plan de constitution absolue), pourrait bien traduire un sens aigu des limites de l'intuition au sens simple et traditionnel du terme et de l'autonomie du symbolique.

► BACHELARD S., *La logique de Husserl*, Paris, PUF « Épiméthée », 1957. – BENOIST J., *Phénoménologie, sémantique, ontologie : Husserl et la tradition logique autrichienne*, Paris, PUF « Épiméthée », 1997. – CAVAILLES J., *Sur la logique et la théorie de la science*, Paris, 1947 (repr. dans *Œuvres complètes de philosophie des sciences*, Paris, Hermann, 1994, p. 473-560). – COURTINE J.-F. dir., *Phénoménologie et logique*, Paris, PENS, 1996. – IMBERT C., *Phénoménologies et langues formelles*, Paris, PUF « Épiméthée », 1992.

Jocelyn BENOIST

→ Donné ; Heidegger et la question de la technique ; Husserl ; Idéalisme ; Intentionnalité ; Transcendantal.

PHLOGISTIQUE

Introduit par Georg-Ernst Stahl (1660-1734), le phlogistique (du grec *Phlogiston* = brûlé) est le principe responsable de la combustion, dans le cadre de la théorie des quatre éléments. Tous les corps combustibles – qu'ils soient minéraux, végétaux ou animaux – contiennent nécessairement du phlogistique. Tous les métaux contiennent du phlogistique. Quand on les chauffe pour former ce qu'on appelle une « chaux » métallique, le phlogistique s'échappe. Mais en réintroduisant du phlogistique en chauffant la chaux on retrouve le métal. Le phlogistique démontre donc parfaitement la réversibilité des deux opérations qu'on appelle aujourd'hui oxydation et réduction. Même Lavoisier reconnaîtra la puissance de cette découverte. Dans les règnes végétal et animal, point de réversibilité mais le phlogistique circule d'un règne à l'autre en formant un cycle. Stahl explique le fait qu'il n'y a pas de combustion sans air par la capacité de l'air à absorber le phlogistique dégagé des combustibles. Le phlogistique absorbé par l'air est ensuite assimilé par les plantes et passe par ingestion dans les animaux. Il est donc un principe toujours combiné.

Le phlogistique triomphe dans la chimie française au milieu du XVIII^e s., en particulier dans l'*Encyclopédie* et dans les cours de Guillaume-François Rouelle au Jardin du Roy. Rouelle prête aux principes deux fonctions : constituants des mixtes ils sont aussi instruments des réactions. Le phlogistique est le principe igné considéré comme constituant, c'est pourquoi il ne peut jamais être isolé. Dans son *Dictionnaire de chimie* (1766), Pierre-Joseph Macquer souligne que le phlogistique peut-être identifié et ses propriétés connues par les effets visibles que produit sa présence ou son absence dans une infinité d'opérations chimiques. Cette réalité essentiellement opératoire du phlogistique

été bien aperçue par Kant : il cite Stahl dans la préface de la seconde édition de *Critique de la raison pure*, avec le plan incliné de Galilée et l'expérience de Torricelli comme l'un des moments où la raison a appris qu'elle devait obliger la nature à répondre à ses questions. De son côté, Meyerson a souligné que la force explicative de la théorie de Stahl repose sur un principe de conservation du phlogistique.

Le phlogistique entre dans la constitution des combustibles, des métaux, des acides, et des huiles. Si grande est la variété des propriétés qu'il confère – combustibilité, odeur, couleur, volatilité, pesanteur, opacité – que le souci majeur de l'article de Macquer est de prouver que le phlogistique reste toujours identique à lui-même, quelle que soit la nature du corps inflammable qui a fourni le phlogistique.

Le phlogistique est attaqué une première fois par Buffon dans un supplément au tome I de son *Histoire naturelle*. S'efforçant de déduire de la mécanique newtonienne une conception de la lumière, de la chaleur, et du feu, Buffon déclare que « le fameux phlogistique des chymistes (être de leur méthode plus que de la nature) n'est pas un principe simple et identique, comme ils le présentent », et suggère que c'est une combinaison d'air et de feu. Macquer rétorque dans la deuxième édition de son *Dictionnaire* (1778) qu'un vrai chimiste ne peut douter que le phlogistique est un principe identique à lui-même, bien qu'il n'ait aucune certitude de la simplicité absolue d'aucun des principes. Pour surmonter l'hypothèse de Buffon sur la nécessité de l'air comme intermédiaire avec le feu, Macquer utilise les vues de Lavoisier : si la combustion est une combinaison avec l'air qui libère la matière du feu, air et feu s'excluent mutuellement.

Lavoisier n'était pourtant pas près à sauver le phlogistique. Il s'est pris à douter à cause de l'augmentation de poids des métaux calcinés. Ce phénomène, connu depuis longtemps et diversement interprété depuis le XVIII^e s., constitue une anomalie dans la mesure où la calcination libérant le phlogistique contenu dans les métaux devrait plutôt se traduire par une diminution de poids. Dans une « Dissertation sur le phlogistique » (1772) Guyton de Morveau l'explique par la « volatilité essentielle » du phlogistique. Quoique les particules individuelles qui constituent le phlogistique soient soumises à l'attraction universelle, l'agrégat qu'il forme est plus léger que l'air où s'effectue la pesée. Lavoisier avance une autre hypothèse, après avoir calciné de l'étain sous des cloches fermées et pesé chaque élément avant et après la réaction : puisque le poids total est conservé, l'augmentation de poids a dû se faire au détriment de l'air contenu sous la cloche. La calcination serait donc une combinaison avec l'air, une addition et non une soustraction d'un corps. Lavoisier ne nie pas encore que le phlogistique joue un rôle et son explication est considérée comme complémentaire plus que rivale de l'explication stahlienne.

La théorie du phlogistique se montre plus efficace que jamais dans les années 1770 pour interpréter les découvertes de nouveaux gaz. Par réduction du mercure

per se (oxyde de mercure) à l'aide d'un miroir ardent, Joseph Priestley a isolé et identifié un gaz (notre oxygène) qu'il appelle « air déphlogistiqué » pensant que s'il entretient si bien la combustion c'est parce qu'il contient moins de phlogistique que l'air atmosphérique et il l'appelle « air phlogistiqué » notre azote. Priestley conclut donc que l'insalubrité de l'air est proportionnelle à la quantité de phlogistique qu'il contient. Après avoir refait l'expérience de Priestley, Lavoisier présente son hypothèse sur la combustion comme une alternative à la théorie du phlogistique qui remet en question l'existence d'un air élémentaire (« Sur la combustion en général », 1777). Loin de contester le pouvoir explicatif du phlogistique, Lavoisier lui reproche d'expliquer trop bien tous les phénomènes accompagnant la combustion parce que tout repose sur un cercle vicieux « les corps combustibles contiennent la matière du feu parce qu'ils brûlent, et [...] ils brûlent parce qu'ils contiennent la matière du feu ».

De fait, l'attaque de Lavoisier provoque un regain de la théorie du phlogistique. En 1787, Richard Kirwan publie un *Essay on Phlogiston* dans lequel il assimile le phlogistique à « l'air inflammable » (hydrogène). Acceptant l'explication lavoisienne de la combustion sans la composition de l'air ni la simplicité des métaux, cet essai était susceptible de reformer un consensus. Mais en 1785, après avoir établi par des expériences solennelles la composition de l'eau, Lavoisier se sent suffisamment en confiance pour attaquer non plus le rôle du phlogistique mais son existence même. « C'est un véritable protée qui change de forme à chaque instant », un être imaginaire. De fait, le phlogistique n'est pas mort en 1785. Il garde quelques partisans en France et un défenseur acharné en la personne de Joseph Priestley.

► METZGER H., *Newton, Stahl, Boerhave et la doctrine chimique*, Paris, 1930, rééd., Paris, Blanchard, 1974. – MEYERSON É., *De l'Explication dans les sciences* (1921), rééd., Paris, Fayard, 1995. – RAPPAPORT R., « Rouelle, Stahl : The Phlogistic Revolution in France », *Chymia*, 7, 1961, 73-102.

Bernadette BENSUADE-VINCENT

→ Chaleur ; Élément ; Gaz ; Lavoisier ; Matière ; Stahl.

PHYSICALISME

Le physicalisme répond à la question de l'objectivité de la connaissance : si « le monde dans lequel nous vivons est un monde des données sensorielles » (Wittgenstein), comment garantir la validité des lois et des théories scientifiques, reliées à l'expérience par des observations et protocoles subjectifs ? Selon le physicalisme, la langue de la physique est langue universelle de la science et, par conséquent, toute connaissance peut être ramenée aux énoncés sur les objets physiques.

L'avènement de cette doctrine dans le Cercle de Vienne à partir de 1931, sous l'influence de Neurath,

marque le tournant physicaliste des Viennois et l'abandon de la position initiale exprimée dans la *Construction logique du monde* de Carnap (1929) à partir de vécus élémentaires (« base autopsychique » ou « solipsiste »). Or, Carnap lui-même a dans cet ouvrage envisagé une construction à partir de la base physique, constituée soit de particules élémentaires (électrons), soit de points spatio-temporels du continuum quadridimensionnel espace-temps, soit de points d'univers, éléments des lignes d'univers. On peut alors réduire tous les objets relevant de l'esprit (*geistige Gegenstände*) aux objets psychiques et ceux-ci aux objets physiques. « On peut désigner la forme de ce système comme "matérialiste" puisque la construction d'un système de constitution de cette forme est très proche du point de vue du matérialisme - (§ 59). Malgré d'indéniables avantages de la base physicaliste (l'unicité des lois qui régissent tous les phénomènes), Carnap choisit la base autopsychique pour reconstruire le monde pour des raisons de proximité épistémique.

Cependant, c'est Neurath qui prépara le terrain pour le physicalisme par sa critique de la *Construction* de Carnap et élaborera une véritable conception physicaliste du langage de la science. Contre l'*Aufbau*, Neurath invoque d'abord l'impossibilité de séparer les modes « purs » de la pensée des modes « impurs ». Il rappelle également la multivocité et la sous-détermination des énoncés théoriques par rapport à l'observation : c'est alors l'idéologie liée aux conditions historiques et aux intérêts des classes sociales qui décide de leur choix et de leur interprétation (ici, Neurath a adapté un argument de Duhem dont les althussériens ont par la suite fait large usage). Ensuite, Neurath met en question l'existence et l'unicité d'une base ultime constituée d'expériences vécues élémentaires. Il en vient enfin à la difficulté principale de l'*Aufbau*, à savoir l'existence de deux langues séparées par un abîme : d'une part une langue de monologue, langue privée, phénoménale, d'autre part une langue intersubjective, publique, physicaliste. Les expériences vécues ressortent au langage privé et ne sauraient donc être communiquées ; seuls les énoncés portant sur des structures peuvent l'être. C'est pourtant à partir de vécus élémentaires que Carnap construit le monde. Neurath voit dans la démarche de Carnap la rupture de l'unité du monde : d'un côté le monde vécu, préthéorique (celui qu'Avenarius appelle le monde naturel et Husserl le monde de la vie), de l'autre le monde de la science édifié à partir d'un système de constitution au sens de Carnap.

En 1931, dans la *Sociologie empirique*, dans plusieurs articles et également dans un exposé du Cercle, Neurath plaide en faveur du physicalisme. Lorsque Carnap publie son article « La langue physicaliste comme langue universelle de la science » (1931-1932), Neurath aussi bien que Wittgenstein, et non sans raison, revendiquent la priorité.

Pour Neurath, l'univers de la science prolonge le monde de l'expérience quotidienne, des actes et des objets familiers ; il englobe aussi bien la langue avec

son mode de parler habituel que le milieu social, les traditions et coutumes, l'histoire. C'est de ce monde, de la manière de parler quotidienne, qu'il faut partir pour arriver aux langages des sciences, à la langue de la science unitaire. Toute notre expérience est imprégnée du langage. Le langage physicaliste, destiné à devenir le « jargon » universel de la science, sera donc construit à partir de la langue quotidienne, « triviale » selon l'expression de Neurath. Celle-ci est truffée d'impuretés, de « conglomérats » qu'aucune analyse logique ne saurait ramener aux termes primitifs. La langue quotidienne recourt parfois à des termes suspects voire métaphysiques, mais c'est elle qui contient « les matériaux de base de toutes les sciences ». Tous les hommes parlent et comprennent la langue triviale et « presque tout le monde, y compris les kantians et les phénoménologues ont une partie de cette langue en commun avec nous et d'autres gens simples » (*Ges. phil. u. methodol. Schriften*, p. 1008).

La langue des sciences est le prolongement de cette langue triviale, enrichie et purifiée de ses ingrédients métaphysiques. Prolongement, mais non rupture : « Nous autres empiristes logiques voulons montrer aux gens que ce que font les physiciens et les astronomes n'est pas autre chose que ce que font tous les jours Hansel et Gretel dans la cuisine et dans le jardin ; c'est seulement transposé à large échelle » (p. 1007).

Contrairement au Carnap de la *Construction logique du monde*, Neurath ne cherche pas une base pour reconstruire le monde : il veut unifier la science par le langage. Son physicalisme doit conduire à la science unitaire. Il ne cherche pas non plus à déterminer la nature des éléments ; il suffit qu'ils puissent être décrits en termes spatiotemporels.

De son côté, Wittgenstein amorce son tournant physicaliste en 1929 dans les entretiens avec Schlick et certains autres membres du Cercle de Vienne : « J'ai cru auparavant qu'il y avait le langage courant, celui que nous parlons habituellement, et une langue primaire qui exprime ce que nous connaissons véritablement, à savoir les phénomènes. [...] je n'adhère plus à cette conception. Je pense que nous avons essentiellement une langue, la langue usuelle. Car nous n'avons pas besoin d'inventer d'abord un nouveau langage ni de construire un symbolisme. Car le langage courant est déjà la langue, pourvu que nous le libérons des obscurités qui se cachent en lui » (*Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, A. Soulez dir., p. 239-240).

Ces trois versions différentes du physicalisme répondent à des préoccupations qui ne sont pas les mêmes. Pour Carnap le problème principal consiste dans la possibilité de traduire les langages partiels - principalement le langage phénoménaliste - dans une langue universelle et intersubjective. Pour lui, la science unitaire exige une seule espèce d'objets et une langue universelle, celle dans laquelle peuvent être traduits les énoncés de toutes les sciences. Seule la langue de la physique remplit ces conditions. La langue des énoncés protoculaires qui enregistrent les données immédiates ne doit pas être comprise comme une langue privée ;

elle peut être utilisée comme langue intersubjective à condition d'abandonner le mode contentuel de parler (*inhaltliche Redeweise*) au profit du mode formel.

De son côté, Wittgenstein ne postule pas une seule espèce d'objets. De plus, il reconnaît le clivage profond entre la description des données sensorielles et celle des objets physiques, puisque les deux exigent des vérifications différentes sans que cela implique la reconnaissance de deux espèces de choses. Il ne s'intéresse pas à la conformité des énoncés au langage de la physique ; les problèmes philosophiques ne peuvent être résolus que par l'élucidation de la grammaire du langage ordinaire.

Le physicalisme neurathien est un conglomérat de thèses que son auteur ne sépare pas toujours nettement. Il convient de distinguer au moins deux sens du physicalisme : un sens méthodologique et un sens ontologique. Neurath penche nettement pour le premier. Pour lui, le physicalisme n'est pas une doctrine qui explique la nature ultime des objets, car ce serait faire de la métaphysique. Il est une règle qui dit que tous les objets et processus qui se déroulent dans la nature, y compris les sociétés humaines et les processus psychiques, doivent être décrits en termes spatiotemporels. Dans ce sens, la thèse du physicalisme a joué et continue de jouer de nos jours un rôle analogue à celui qu'avait joué la thèse mécaniste entre les XVII^e et XIX^e s.

La doctrine physicaliste prête à des malentendus. Rappelons qu'elle ne prône pas la réductibilité de toutes les sciences à la physique. Le physicalisme soutient la réductibilité des objets des sciences aux objets ou processus situés dans l'espace ou dans le temps, plus exactement encore, la réductibilité de la langue de toutes les sciences à la langue énonçant les relations spatiotemporelles, modelée sur celle de la physique. Seuls « les termes de toutes les sciences (biologie, psychologie, etc.) se laissent réduire à ceux de la physique » (p. 754) ; en revanche, chaque science contient un stock de lois et d'énoncés qui lui sont propres. Il ne saurait donc être question d'identifier les lois qui régissent le règne vivant et encore moins celles qui décrivent le comportement des groupes et des sociétés des êtres vivants aux lois de la physique. Il faut seulement traiter les sociétés humaines comme on traite des amas d'étoiles, à savoir comme certaines structures d'ordre spatiotemporel.

Grâce à l'unité de la terminologie et des concepts, la langue physicaliste permet de relier tous les énoncés et utiliser des énoncés de plusieurs disciplines, même éloignées entre elles, pour prévoir des phénomènes complexes. Neurath évoque à titre d'exemple un incendie de forêt : dans la prévision de son évolution entrent aussi bien des énoncés de géographie que de météorologie et de botanique ; de plus, si l'on veut prévoir le comportement d'une tribu exotique face à l'incendie, il est nécessaire de recourir aux énoncés de la sociologie et de l'ethnologie. Or, dans les pronostics, tous ces énoncés doivent pouvoir se combiner, tous doivent donc utiliser le même langage et une

terminologie unitaire. La visée ultime du physicalisme est son accomplissement dans la science unitaire.

Au cœur du physicalisme se trouve le problème de la description des événements psychiques en termes physicalistes. Cela vaut d'abord pour les termes perceptifs. Un énoncé comme « je vois le bleu » peut être rangé dans trois catégories : c'est un énoncé sur le réel si à certaines modifications de l'état cérébral correspondent des modifications spatiotemporelles en dehors de l'homme ; c'est un énoncé hallucinatoire si les modifications observées interviennent uniquement dans le corps ; enfin, c'est un mensonge si les modifications constatées affectent uniquement le centre du langage dans le cerveau. Peut-on alors dire « je vois le même rouge que mon ami » ? Cette question ne vise pas, dit Neurath, la comparaison des deux états perceptifs, mais uniquement l'usage du terme « rouge ». « C'est la structure du système des expressions de mon ami qui m'apprend comment il combine le symbole "rouge" avec d'autres symboles. La science ne peut pas faire plus » (p. 415). Cependant, Neurath ne devrait-il pas plutôt comparer deux états physiques si l'on veut rester fidèle au physicalisme ? Ne voit-on pas là pointer un conflit latent entre deux manières de traiter la question épineuse des vécus immédiats et des contenus de la conscience, d'une part par la physique, d'autre part par la grammaire ? Quoi qu'il en soit, conformément à la thèse physicaliste, la terminologie psychologique qui parle de la conscience doit être remplacée par la description des processus neurophysiologiques et d'événements corporels observables comme les gestes et les paroles. Avec l'âme et d'autres accessoires de la vieille métaphysique, Neurath congédie également la conscience. Tous les termes perceptifs doivent subir une transformation analogue à celle qui avait autrefois abouti à la création des termes géométriques : de même que les énoncés sur les perceptions visuelles et tactiles portant sur un certain ordre furent remplacés par des énoncés contenant uniquement des termes géométriques comme « cube » ou « sphère », de même les énoncés contenant des termes perceptifs (« clair », « dur », « bleu », etc.) doivent être remplacés par des énoncés sur certaines oscillations périodiques ou sur d'autres phénomènes physiques. Rien n'empêche cependant de continuer de s'en servir dans le langage courant et même d'utiliser les mots anciens dans un sens nouveau, physicaliste, une fois la langue scientifique purifiée.

Le physicalisme est l'héritier du matérialisme : il est la « forme moderne du matérialisme » (p. 466). Il s'en sépare par l'effort qui vise l'élimination des résidus métaphysiques du matérialisme, par le recours à la physique qui seule peut nous apprendre ce qu'est la matière, et par le tournant linguistique accompli par le Cercle de Vienne, le refus de sortir du langage, qui doit à son tour être compris dans un sens physicaliste. Tout d'abord, les termes d'esprit et de matière sont inadéquats, métaphysiques. « Non seulement l'esprit n'est qu'un produit de la matière, mais on ne peut même plus formuler de manière sensée les expressions

“esprit” ou “processus spirituel” ni parler d’esprit ; à leur place entrent, sur un plan fondamental, des formulations dans lesquelles entrent *uniquement* des relations spatiotemporelles qui reposent sur des énoncés de contrôle (*Kontrollaussagen*). La question “esprit” ou “matière” est résolue par la disparition de la doctrine de l’esprit : seule reste la doctrine de la “matière”, à savoir la physique. Ce qui est donné comme science du réel ne saurait être autre chose que la physique » (p. 466).

La physique au sens large devient une discipline englobante, une transdiscipline dont la terminologie prétend à l’universalité. Il n’est pas un des moindres paradoxes qu’au même moment où des physiciens mettent en doute la possibilité d’un langage unitaire pour la physique elle-même, au moment où se creuse un fossé entre la macrophysique et la microphysique, où l’incompréhension réciproque s’installe au cœur de cette discipline, Neurath fait le pari sur le langage de la physique comme langage unitaire de toutes les sciences : « Il est essentiel que les concepts de la science unitaire partagent chaque fois la destinée des concepts fondamentaux de la physique, aussi bien dans les cas où l’on fait appel aux dernières subtilités que là où la description reste dans l’à peu près » (p. 537).

► CARNAP R., « Die physikalische Sprache als Universalssprache der Wissenschaft », *Erkenntnis*, 2, 1932, 432-465.
 — NEURATH O., *Gesammelte philosophische und methodologische Schriften*, 1-2, éd. R. Haller & H. Rutte, Vienne, 1981.
 — SOULEZ A. dir., *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*. Carnap-Hahn-Neurath-Schlick-Wittgenstein, Paris, PUF, 1985.

Jan SEBESTIK

→ Carnap ; Cercle de Vienne ; Conventionalisme ; Épistémologie ; Monisme ; Neurath ; Réductionnisme ; Smart ; Vérification ; Wittgenstein et le positivisme logique.

PIAGET Jean, 1896-1980

Jean Piaget, né à Neuchâtel en 1896, est mort à Genève en 1980. Ses premiers travaux datent de 1911 et portent sur les mollusques alpins. Jeune, il pense consacrer sa vie à la philosophie, mais tient à l’envisager sous l’angle biologique en ayant recours à la psychologie. À Paris, il a la chance d’avoir pour maîtres Léon Brunschvicg et André Lalande ; il travaille avec Alfred Binet. Après avoir enseigné la philosophie à Neuchâtel en 1925 et dès 1929 à Genève l’histoire de la pensée scientifique, puis la psychologie expérimentale, il envisage d’aborder des problèmes d’épistémologie par les approches historico-critique et psychogénétique. De 1952 à 1963, il enseigne à Paris et poursuit ses activités à Genève où il fonde, en 1956, le Centre international d’épistémologie génétique.

Cet itinéraire hors du commun révèle la spécificité des travaux de Piaget : constituer, en se référant à des recherches sur le développement de l’intelligence chez l’enfant, l’épistémologie comme science dégagée d’une tutelle philosophique. Il convient surtout de

rejeter l’apriorisme et l’empirisme. La connaissance est un processus et non un état ; son évolution ne présente pas de commencement absolu ; il s’agit de découvrir des stades, des équilibres, des dépassements. Ainsi l’intelligence, selon Piaget, est la résultante d’adaptations successives ; de là, les grandes étapes parcourues par l’enfant en développement : stade sensorimoteur, stade des opérations concrètes et stade des opérations formelles. En fait, l’épistémologie de Piaget est voisine de la découverte de Gonseth, voire de Bachelard.

● *La construction du réel chez l’enfant*, Neuchâtel/Paris, Delachaux & Niestlé, 1937. — *La genèse du nombre chez l’enfant*, Neuchâtel/Paris, Delachaux & Niestlé, 1941. — *Le développement des quantités chez l’enfant*. *Conversation et atomisme*, Neuchâtel/Paris, Delachaux & Niestlé, 1941. — *Classes, relations et nombres. Essai sur les groupements de la logistique et sur la réversibilité de la pensée*, Paris, Vrin, 1942. — *Traité de logique. Essai de logistique opératoire*, Paris, A. Colin, 1949. — *Introduction à l’épistémologie génétique*, Paris, PUF, 1950. — *Les mécanismes perceptifs. Modèles probabilistes, analyse génétique, relations avec l’intelligence*, Paris, PUF, 1961. — *Biologie et connaissance*, Paris, Gallimard, 1967. — *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard, 1967. — *Mémoire et intelligence*, Paris, PUF, 1968.

Éric ÉMERY

→ Continuité ; Rationalisme ; Système.

PLANCK Max, 1858-1947

Physicien allemand. Max Planck est né à Kiel le 23 avril 1858 et meurt à Göttingen le 4 octobre 1947. En établissant l’expression théorique de la loi de rayonnement du corps noir, Max Planck jette, en décembre 1900, les fondements de la mécanique quantique.

Max Planck est formé aux mathématiques et à la physique expérimentale à l’université de Munich. En quatrième année d’université, Planck se rend à Berlin où enseigne Helmholtz et Kirchhoff. Déçu par l’enseignement des deux savants, il se lance seul dans l’étude de la thermodynamique et lit avidement les ouvrages de Clausius. Dans sa thèse de doctorat, soutenue en 1879 à l’université de Munich, Planck défend l’idée que dans tout processus naturel la somme des entropies va en augmentant. Malgré le peu d’écho rencontré par sa thèse, Max Planck poursuit opiniâtrement ses travaux sur les changements d’état physique et les mélanges de gaz. Il obtient alors beaucoup de résultats prometteurs dont il s’apercevra qu’ils avaient déjà été démontrés sous une forme plus générale par le physicien américain J.W. Gibbs. En 1885 il est nommé professeur adjoint à l’université de Kiel, il travaille sur la dissociation des gaz et les propriétés des solutions diluées. En 1889, il succède à Kirchhoff à l’université de Berlin où il enseignera la physique théorique jusqu’à sa retraite, en 1927. Les fertiles années berlinoises sont marquées par une vive controverse avec Ostwald, défenseur de l’énergétisme à propos de l’irréversibilité des échanges de chaleur.

C’est en 1896 que Planck commence à s’intéresser au problème du rayonnement du corps noir. Le caractère absolu de la distribution spectrale d’énergie — elle ne dépend que de la température — séduit Planck pour qui la recherche de l’absolu constitue un des buts de la science. De nombreux théoriciens butent sur l’établissement d’une loi théorique à même de rendre compte des observations expérimentales.

Planck, en décembre 1900, grâce à une hypothèse révolutionnaire et audacieuse, découvre une expression mathématique qui décrit la loi de rayonnement du corps noir à toutes les fréquences : il suppose que l’énergie rayonnée par le corps noir se répartit en « paquets » d’énergie discrète, ce qu’on appellera plus tard les quanta. Dans la distribution spectrale d’énergie trouvée par Planck apparaît une constante qu’il nommera le quantum élémentaire d’action. Malgré tous ses efforts Planck ne parvient pas à rapprocher sa nouvelle constante de la physique classique : malgré ses réticences il ouvre la voie à une nouvelle science, la physique quantique. Pour ces travaux, il obtient le prix Nobel de physique en 1918.

Planck s’intéresse ensuite à la théorie de la relativité formulée par Einstein en 1905. Encore une fois c’est l’absolu qui attire Planck : « Il est d’une souveraine importance que le monde extérieur soit quelque chose d’indépendant de l’homme, quelque chose d’absolu. » Théoricien, Planck partage avec Einstein le goût des théories élégantes et synthétiques qui laissent l’homme à l’écart de la réalité physique du monde : *Weltanschauung* et *Wissenschaft* sont deux domaines de l’esprit tout à fait séparés.

● *Vorlesungen über Thermodynamik*, Leipzig, Veit & Comp., 1897. — *Der Physik im Kampf um die Weltanschauung*, Leipzig, 1935. — *The new Science*, New York, Meridian Books, 1959. — *Initiations à la physique*, Paris, 1993. — *Wissenschaftliche Selbstbiographie* (1948), trad. fr. A. George, *Autobiographie scientifique*, Paris, Albin Michel, 1960.

► HARTMANN H., *Max Planck als Mensch und Denker*, 1953.
 HEILBRON J.L., *Planck : 1858-1947 : une conscience déchirée*, Paris, Belin, 1988. — HERMANN A., *Max Planck in Selbstzeugnissen und Bilddokumenten*, Hambourg, Rowolt, 1973.

Matthieu GOUNELLE

→ Constantes physiques ; Corps noir ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Quantique.

PLASMA GERMINATIF

La notion de plasma germinatif a été définie par August Weismann (1834-1914) dans le cadre d’une nouvelle théorie de l’hérédité qu’il proposa à partir de 1883. Cette « théorie de la continuité du plasma germinatif » fut développée dans le cadre d’une réflexion générale sur l’évolution où Weismann, refusant toute transmission héréditaire des caractères acquis, fondait ce que Georges John Romanes (1848-1894) appela le « néodarwinisme ». Une

telle conception de l’hérédité allait restructurer la recherche biologique en séparant la question de la transmission des caractères de celle de leur développement dans l’ontogenèse. La distinction qu’elle instituait, au cœur du vivant, entre l’organisme et une substance porteuse des caractères héréditaires est à l’origine de la moderne distinction entre génotype et phénotype. Pour comprendre l’originalité et l’heuristique de cette idée nous allons suivre sa genèse dans les travaux de Weismann, passant d’une conception de l’hérédité comme continuation de la croissance à celle d’une transmission de déterminants.

Antécédents

Avant le début des années 1880, pour Weismann, comme pour l’ensemble des biologistes qui travaillaient dans une perspective darwinienne, l’hérédité ne pouvait se comprendre que comme une continuation des parents dans leurs descendants. Pour les unicellulaires, la transmission des caractères de l’espèce ne semblait pas poser de problèmes insurmontables. Qu’une cellule conserve son type en se divisant après avoir augmenté de volume par assimilation de matière semblait compréhensible dans la mesure où la continuité d’une même substance était assurée. Au contraire, pour un pluricellulaire tout le problème était de comprendre comment les cellules reproductrices pouvaient déterminer le développement de l’enfant avec une telle précision que celui-ci ressemblerait à ses parents jusque dans certaines de leurs particularités individuelles. Les questions de l’hérédité et de l’ontogenèse étaient donc confondues. Weismann caractérisait cette conception générale que l’on trouve depuis Darwin jusqu’à Haeckel comme celle d’une « hérédité-excroissance » : la reproduction est essentiellement une continuation externe de la croissance des parents (Haeckel, 1876 ; Churchill, 1968) : « Haeckel a correctement désigné la reproduction comme un surplus de la croissance individuelle, et de façon concordante il se réfère au phénomène de l’hérédité comme à ceux de la croissance » (Weismann, 1876).

Cependant une telle conception posait un problème délicat : elle rendait possible et même nécessaire la transmission héréditaire des caractères acquis. En effet, toute variation héréditaire ne pouvait être qu’une variation d’abord acquise par un des organismes parents qui serait transmise à sa descendance. Dès lors, la théorie de la sélection naturelle était en difficulté. Pourquoi ne pas retourner, comme le faisait Haeckel, à une conception lamarckienne pour laquelle les variations seraient d’emblée adaptatives (Haeckel, 1868). Les causes externes qui provoquent les variations organiques dirigent directement le cours de l’évolution, et la sélection n’a qu’un rôle secondaire. Si, inversement, on cherchait une causalité interne des variations héréditaires, celle-ci, indépendante des circonstances, devrait alors produire une évolution des espèces déterminée de façon analogue à l’ontogenèse individuelle, et l’on aurait une orthogenèse évolutive comme celle que

défendait alors Karl von Nägeli (1817-1891). Weismann voyait là une forme de résurgence des grands principes généraux et idéalistes des romantiques de la « Philosophie de la Nature ». Au contraire, dans une perspective réductionniste radicale telle qu'elle se développait alors en Allemagne sous l'inspiration de Theodor Schwann (1810-1882), il fallait montrer que tous les phénomènes biologiques pouvaient s'expliquer en termes mécanicistes et avec l'aide de la seule sélection naturelle.

Durée de vie et lignées germinatives

Après des recherches sur les mécanismes de la variation où il acceptait la transmission héréditaire de modifications acquises sous l'effet de causes externes, Weismann rechercha une situation limite où un caractère adaptatif ne pourrait en aucun cas être le résultat direct de variations acquises. C'est ce qu'il trouva dans le cas de la mort de vieillesse. Pour lui, la durée de vie était un caractère spécial, adapté dans chaque espèce pour sa meilleure reproduction. Or, un tel caractère ne pouvait être le résultat de variations directement acquises : elles ne pourraient être transmises, et de toute façon, ne représenteraient en aucun cas un avantage individuel. Si l'on peut concevoir quelque utilité à la limitation de la vie, ce ne peut être qu'au niveau populationnel (la génétique des populations propose, depuis la fin des années 1940, une explication toute différente, cf. T.B. Kirkwood & T. Cremer, 1982). Partant de cette spéculation théorique générale, Weismann cherchait un mécanisme qui pourrait déterminer la mort de l'individu et qui, en même temps, transmettrait cette détermination aux générations suivantes. En 1881, sa première hypothèse était de distinguer deux types de lignées cellulaires. D'une part, les lignées somatiques qui formeraient l'organisme et n'auraient qu'un pouvoir de division limité, ce qui finirait par provoquer sa mort. Et d'autre part, une lignée immortelle de cellules reproductrices, la lignée germinative, que l'on retrouverait dans les organes de la reproduction et qui conserverait un pouvoir de division indéfini au long des générations. Elle servirait à constituer l'œuf, et lors de l'embryogenèse, elle pourrait donner par division, d'une part, les lignées cellulaires somatiques déterminant la durée de vie du nouvel organisme, et d'autre part, les cellules reproductrices nécessaires à sa reproduction. Un tel mécanisme avait le mérite d'expliquer la transmission de l'ensemble des caractères héréditaires. Ils seraient concrètement réalisés par la différenciation successive des cellules somatiques au cours de l'ontogenèse : la succession des divisions depuis la séparation avec la lignée germinative produirait la perte de potentialités cellulaires déterminées. Contrairement aux théories de l'hérédité précédente, si les enfants ressemblent aux parents, c'est essentiellement parce qu'ils sont les uns et les autres les produits d'une même cause qui s'est maintenue constante entre les générations, la lignée germinative. Les lignées somatiques ne sont pas impliquées dans la reproduction. Les

variations qu'elles subissent ne peuvent donc être transmises à la descendance. Seules comptent, pour l'évolution, les variations de la lignée germinative qui porte l'hérédité dans l'espèce. « Le corps, le soma, produit à ce point de vue, dans une certaine mesure, l'effet d'un appendice accessoire des véritables porteurs de la vie, les cellules de reproduction » (Weismann, *La vie et la mort*, 1883, p. 97).

Les variations de la lignée germinative, indépendantes des interactions entre l'organisme et son environnement, déterminent des changements des descendants qui sont tout à fait quelconques en ce qui concerne leurs valeurs adaptatives. La sélection est la seule cause de l'adaptation et de l'évolution. C'est le néodarwinisme.

Durant les mêmes années (1881 et 1882), Weismann, qui allait bientôt perdre la vue, réalisa une importante monographie sur les hydrozoaires au laboratoire de zoologie marine de Naples. Il cherchait surtout à mettre en évidence un isolement précoce de la lignée germinative, ce qui en fait n'a rien d'évident (Berrill & Liu, 1948). L'idée d'une continuité de la lignée germinative n'était pas en soi très originale. Elle avait déjà été avancée par d'autres chercheurs (Jaeger, 1878 ; Nussbaum, 1880). Mais ces théories, essentiellement fondées sur des considérations cytologiques, se trouvèrent facilement mises en difficulté par l'absence d'observation, dans la plupart des espèces animales ou végétales, d'une séparation de la lignée germinative lors des premières segmentations de l'œuf. De plus, on pouvait montrer que des végétaux comme le bégonia étaient capables de reproduire une plante entière à partir de pratiquement n'importe laquelle de ses parties. Dès 1885, Weismann ne se priva pas d'attaquer ces théories qui avaient pourtant de grandes affinités avec la sienne. En effet, pour lui, la séparation entre lignées germinatives et somatiques était un principe théorique fondé à partir de considérations évolutionnistes. Par son abstraction, il pouvait s'adapter à tous les progrès de la cytologie qui furent pourtant spectaculaires à cette époque.

Le plasma germinatif

Ainsi, dès 1883, Weismann proposait de définir en général le « plasma germinatif » comme une substance (il employait alors aussi les termes de « tissu », ou de « molécule ») contenue dans les cellules germinatives et capable de déterminer la différenciation des cellules somatiques. « Je propose de l'appeler théorie de la "Continuité du Plasma Germinatif" puisqu'elle repose sur cette idée que l'hérédité se produit parce qu'un tissu d'une constitution chimique et surtout moléculaire déterminée se transmet d'une génération à l'autre. Ce tissu, je l'ai appelé "plasma germinatif", je lui ai attribué une structure très délicate et très complexe qui explique sa faculté de se développer en organisme complexe, et j'ai essayé d'expliquer l'hérédité en disant qu'à chaque ontogenèse, une partie du plasma germinatif spécifique que contient la cellule

mère n'est pas employée à la construction de l'organisme de l'enfant, mais demeure en réserve, non modifiée, pour la formation des cellules germinatives de la génération suivante » (Weismann, 1885, p. 165-166).

Par une série de déplacements, le plasma germinatif fut d'abord restreint aux noyaux des cellules reproductrices, puis plus précisément, aux filaments colorés que Wilhelm Waldeyer (1836-1912) allait bientôt appeler « chromosomes ». Weismann reconnaissait l'importance des recherches d'Édouard van Beneden (1846-1812), sur la fécondation. Les contributions du mâle et de la femelle sont équivalentes et tiennent à des composants nucléaires bien définis. De toutes ces recherches : « [...] il découle au moins un résultat certain, et ce résultat, c'est l'existence d'une substance héréditaire, d'un véhicule matériel des tendances héréditaires, et le fait que cette substance est contenue dans le noyau de la cellule germinative, et dans cette partie du filament nucléaire qui, à certains moments, revêt la forme d'anses ou de baguettes courtes » (Weismann, 1887, p. 267).

La continuité du plasma germinatif est donc une continuité des brins chromosomiques qui seraient susceptibles de croître et de se diviser longitudinalement en conservant leurs propriétés. Pour expliquer les différences entre types cellulaires, il suffit de considérer que les propriétés du cytoplasme sont commandées par un plasma germinatif propre à chaque cellule et que Weismann nommait « idioplasma » (il empruntait ce terme à Karl von Nägeli, 1884). Lors de la division cellulaire, l'idioplasma de la cellule mère détermine la nature des idioplasma de ses cellules filles. Ainsi s'explique la différenciation cellulaire et, par là, l'ensemble des caractères de l'individu. Le plasma germinatif de l'espèce correspond à l'idioplasma de l'œuf fécondé. Un exemplaire complet est reproduit et conservé dans les lignées cellulaires qui donneront les cellules reproductrices. Dans le cas du bégonia, il suffit d'admettre que chacune de ses cellules possède un exemplaire complet du plasma germinatif de l'espèce.

À la suite de la lecture de la *Pangenèse intracellulaire* de Hugo De Vries en 1889, qui s'inspirait beaucoup de ses travaux, Weismann présenta une théorie remaniée et complétée d'une complexité vraiment extraordinaire : le plasma germinatif serait formé de « biophores » capables de croissance et de reproduction par division. Chaque type de biophore déterminerait un des caractères indépendants que l'on pouvait trouver différemment combinés lors des croisements. Un ensemble donné de ces biophores formerait le « déterminant » qui commande l'ensemble des caractères d'une cellule. Mais puisque pour un pluricellulaire il faut autant de déterminants que de types cellulaires différenciés, ces déterminants devaient être associés dans le plasma germinatif en une structure que Weismann appelait l'« ide ». Or, si l'on admettait que chaque individu possédait toute une variété d'ides provenant de ses ancêtres et qu'il redistribuait lors de la reproduction sexuelle, il fallait aussi admettre que ces ides étaient associés dans une structure d'un niveau de

complexité plus élevé, l'« idante », qui correspondrait probablement aux chromosomes que l'on observe. Weismann développa encore cette théorie pour faire face à diverses critiques et aux nouveaux faits apportés par les nombreuses découvertes de la cytologie de la fin du XIX^e s. En 1902, dans son dernier grand ouvrage, il reprit l'ensemble de ses travaux et compliqua encore sa théorie en introduisant une « sélection germinale », qui opérerait dans le plasma germinatif lui-même, par une lutte pour l'existence entre les unités héréditaires (biophores ou déterminants).

Par l'idée de plasma germinatif, Weismann a institué une coupure radicale au cœur du vivant, une séparation entre le soma et le germe, entre les caractères acquis et les caractères héréditaires, qui a dès lors structuré toute la recherche en biologie. Elle permettait de conduire une étude de l'hérédité (transmission de déterminants) indépendamment de celle du développement (causalité cellulaire de l'expression de ces déterminants). « L'étude des faits de l'hérédité n'a pas à attendre que la physiologie de la cellule soit définitive » (Weismann, *La signification de la reproduction sexuelle...*, 1885, p. 342). C'est cette étude qui, au début du XX^e s., allait devenir la génétique.

- BERRILL N.J. & LIU C.K., « Germplasm, Weismann, and Hydrozoa », *Quart. Rev. Biol.*, 23, 1948, p. 124-132. — CHURCHILL F.B., « August Weismann and a Break from Tradition », *Journal of History of Biology*, 1, 1968, p. 91-112. — DE VRIES H., *Intracelluläre Pangenese* (1889), trad. fr. de la partie théorique in *La découverte des lois de l'hérédité*, Paris, Press Pocket, 1990. — HAECKEL E., *Die Perigenese des Plastidiales, oder die Wellenzugung der Lebensheiligen ; ein Versuch zur mechanischen Erklärung der elementaren Entwicklungs Vorgänge*, Berlin, 1876 (trad. fr. J. Soury, in *Essais de psychologie cellulaire*, Paris, Baillière, 1880) ; *Natürliche Schöpfungsgeschichte*, Berlin, 1868 (trad. fr. C. Letourneau, *Histoire de la création des êtres organisés d'après les lois naturelles*, Paris, Reinwald, 1874). — JAEGER G., « Über Vcrerbung », *Kosmos*, Leipzig, vol. 2, 1877, p. 306-317 ; « Zur Pangenese », *Kosmos*, vol. 4, 1879, p. 377-385. — KIRKWOOD T.B. & CREMER T., « Cytogerontology Since 1881 : A reappraisal of August Weismann and a Review of Modern Progress », *Hum. Genet.*, 60, p. 101-121. — NUSSBAUM M., « Die Differenzierung des Geschlechtes im Thierreich », *Archiv für mikroskopische Anatomie*, t. 18, 1880. — ROMANES G.J., « Mr. Spencer on Natural Selection », *The Contemporary Review*, 6 avril, 1893, p. 499-517. — WALDEYER W., « Über karyokinese und ihre Beziehung zu den Befruchtungsvorgängen », *Archiv für Mikroskopische Anatomie*, t. 32, 1888. — WEISMANN A., *Studien über Descendenztheorie IV*, Leipzig, Engelmann, 1876 (trad. angl. R. Meldona, *Studies in the Theory of Descent*, Londres, 1882) ; *Essais sur l'hérédité et la Sélection Naturelle*, Paris, Reinwald, 1892 (trad. fr. de *La Durée de la vie*, 1881 ; *La vie et la mort*, 1883 ; *La continuité du plasma germinatif*, 1885 ; *La signification de la reproduction sexuelle pour la théorie de la sélection naturelle*, 1885 ; *Du nombre des globules polaires et de leur signification au point de vue de l'hérédité*, 1887) ; « De l'Hérédité » (1883), in *La découverte des lois de l'hérédité*, Paris, Press Pocket, 1990.

Charles LENAY

→ De Vries ; Gène ; Génération spontanée ; Haeckel ; Schwann ; Sélection ; Vivant (Théorie du).

PLATON, ~ 428-348

Platon est né à Athènes, aux alentours de 428 avant J.-C., d'une famille appartenant à la fine fleur de l'aristocratie. Tout prédestinait le jeune homme à embrasser une brillante carrière politique, car la vertu d'un homme bien né, convenablement éduqué, était d'exceller dans la vie publique, en particulier à Athènes où les institutions démocratiques favorisaient la participation active à la vie politique.

Cependant Platon n'avait guère de sympathie pour la démocratie athénienne qui encourageait l'expression d'opinions ignorantes et laissait libre cours à la démagogie. Il a été lui-même fasciné par la puissance du *logos* — terme qui signifie à la fois parole et raison — ce *logos* dont les sophistes prétendaient enseigner la maîtrise aux jeunes gens pour leur permettre de s'illustrer dans la vie publique. Il aurait composé des tragédies qu'il aurait ensuite détruites ; dès ses premiers dialogues il manifeste à la fois une grande maîtrise littéraire du verbe et une redoutable habileté dans la conduite du raisonnement. Mais l'orientation de sa philosophie vient aussi de la conscience qu'il acquit des dangers d'un usage non rigoureux de la parole, en particulier dès qu'il subit l'influence de Socrate.

C'est probablement vers 409 avant J.-C. que Platon rencontra Socrate. Il fut, comme d'autres jeunes gens de son milieu, attiré par cet homme étrange, aux allures un peu rustres, qui feignait de tout ignorer (sauf son ignorance même), et passait son temps à interroger chacun sur des questions essentielles d'ordre éthique telles que : « qu'est-ce que la vertu ? », « qu'est-ce que la justice ? », « qu'est-ce que la piété ? », etc. Or la force de ses interrogations était de mettre en évidence l'ignorance de ses interlocuteurs sur ces questions où chacun pourtant se juge savant. Platon avait ainsi devant lui, non un maître de rhétorique, mais un maître de vertu, pour lequel il n'y a de vertu que fondée en raison.

Socrate fut condamné à mort en 399 avant J.-C., après avoir été accusé de ne pas croire aux dieux de la cité et de corrompre la jeunesse, comme s'il était un sophiste ; car on reprochait aux sophistes d'avoir enseigné à relativiser toute certitude en matière morale ou religieuse, et d'avoir contribué ainsi à la défaite d'Athènes. Socrate fut en effet condamné à l'occasion d'un retour au pouvoir des démocrates, qui avaient été momentanément chassés par la tyrannie des Trente à la botte de Sparte, victorieuse d'Athènes en 404 avant J.-C. (fin de la guerre du Péloponnèse). Mais l'échec de la tyrannie sanglante des Trente, où Platon comptait des proches et des amis, comme la condamnation injuste de Socrate, ont détourné Platon de la vie politique.

Pendant les années qui suivirent la mort de Socrate, Platon aurait entrepris des voyages hors d'Athènes, en Égypte, dans le sud de l'Italie et en Sicile où il aurait rencontré des Pythagoriciens. Les Pythagoriciens mettaient l'accent sur les mathématiques dans la découverte de l'ordre du cosmos (en astronomie, en

musique...), voire dans l'acquisition d'une discipline éthique de l'âme. De retour à Athènes, en 387 avant J.-C., Platon entreprit de fonder (dans les jardins consacrés au héros légendaire Académus) une école, à l'image peut-être des cercles pythagoriciens qu'il avait visités : l'« Académie ». On y enseigna toute sorte de disciplines scientifiques, principalement les mathématiques, et on s'efforça d'y pratiquer la philosophie, dont la méthode est la « dialectique » (de *dia-legein* signifiant « dialoguer »). Toute l'œuvre écrite de Platon — commencée dès avant la fondation de l'Académie — consiste d'ailleurs essentiellement en dialogues (dont Socrate est souvent le conducteur).

L'intérêt pour le Pythagorisme et les mathématiques a produit une rupture dans l'œuvre de Platon (fort bien signalée par G. Vlastos) : les dialogues de jeunesse sont surtout consacrés à des questions éthiques, et portent la marque du maître, Socrate ; leur tour est généralement aporétique. Les dialogues de la maturité (*Phédon*, *République*, *Phèdre*...) sont au contraire l'occasion pour Platon de construire une véritable philosophie de la connaissance et de la nature autant qu'une philosophie morale.

Platon n'abandonna pas pour autant son intérêt pour la politique. Par suite de ses propres désillusions de jeune homme, et face au déclin général des cités grecques au début du IV^e s., Platon réagit en philosophe idéaliste : il n'y aura de fin aux maux de la politique que lorsque les gouvernants deviendront philosophes ou les philosophes gouvernants. D'où son projet de Cité idéale, présenté dans la *République*, revu et corrigé à la fin de sa vie dans les *Lois*, selon lequel la justice et l'harmonie de la cité dépendent essentiellement d'une saine éducation des citoyens contrôlée et dirigée par les gouvernants, eux-mêmes issus d'une élite formée à la philosophie.

Selon le récit autobiographique de la *Lettre VII*, Platon a rencontré Denys, tyran de Syracuse, en 388 avant J.-C., et s'est lié d'amitié avec son beau-frère Dion. Denys, sans doute par méfiance et jalousie, aurait renvoyé brutalement Platon à Athènes (selon Diogène Laërce, il aurait même été vendu comme esclave à Égine, et finalement libéré par un riche Cyrénéen qui l'aurait reconnu). Dion l'invita à nouveau à Syracuse, après la mort de Denys, en 367 avant J.-C., pour qu'il exerçât une influence bienfaisante sur le fils du tyran défunt, le jeune Denys II, et en fit peut-être un roi-philosophe. Mais Denys II ne supportait guère la tutelle de Dion, qu'il bannit de Syracuse, tout en retenant Platon, qui finit, non sans mal, par rejoindre Athènes. Il retourna cependant à Syracuse (en 361) sur les instances de Dion, qui pensait que Denys avait dorénavant les meilleures dispositions pour la philosophie. Mais ce dernier voyage tourna également court. Il n'y aura pas eu, du vivant de Platon, la réconciliation espérée entre la politique et la philosophie.

La fin de la vie et de la carrière du philosophe fut consacrée à l'approfondissement des mathématiques, ainsi que de l'astronomie et de la musique (ou harmonie) en tant qu'elles étaient des disciplines

mathématiques. Un des problèmes de Platon et de ses disciples fut de maîtriser en particulier les irrationnels, dont l'irruption bouleversait l'arithmo-géométrie des Pythagoriciens, puisque le monde était pour eux composé matériellement de points, de lignes, de surfaces, de volumes. Cette arithmo-géométrie avait déjà été mise à mal par les arguments de Zénon révélant l'impossibilité de penser le continu en termes discrets (Achille ne rattrapera jamais la tortue si j'envisage son mouvement en le divisant indéfiniment en moitiés plus petites). Les travaux de l'Académie (comme en témoignent par exemple le *Théétète*, le *Parménide*, le *Philèbe*, le *Timée*...) ont consisté à intégrer les irrationnels (et le continu) dans le cadre de la rationalité mathématique : d'où son intérêt pour la commensurabilité géométrique de grandeurs arithmétiquement incommensurables, pour les médiétés (les moyennes de séries de proportions continues), etc. Cet intérêt pour les mathématiques participe d'une quête de vérité, susceptible de rendre intelligible l'ordre du monde, caché aux sens : Platon tente ainsi de donner des clefs mathématiques pour la compréhension de la structure du cosmos dans le *Timée*.

Mathématique n'est pas philosophie cependant. Platon, qui a retenu de l'enseignement de Socrate ce souci du fondement rationnel de tout discours, s'est enquis aussi des fondements logiques et ontologiques de la vérité mathématique elle-même — dès le *Phédon* et la *République* ; il y revient au moins dans le *Philèbe* — enquête qui le conduit jusqu'au principe divin de l'Être et de la sagesse : le Bien ou l'Un.

Platon mourut en 348 avant J.-C. Le rayonnement de ses dialogues et de son enseignement était déjà considérable. L'Académie, dont les travaux s'éloignèrent rapidement de la doctrine du fondateur, ferma seulement en 529 après J.-C., sur l'ordre de l'empereur Justinien.

• Les dialogues socratiques (t. I et II), *Protagoras*, *Gorgias*, *Ménon* (t. III, 1, 2), trad. A. Croiset, Paris, Les Belles Lettres, 1920-1923. — *Ménon*, trad. M. Canto-Sperber, Paris, Garnier-Flammarion, 1991. — *Apologie de Socrate*, *Criton*, *Phédon*, trad. B. & R. Piètre, Paris, Livre de poche, 1992. — *Le Banquet*, trad. B. & R. Piètre, Paris, Nathan, 1983. — *Phèdre*, trad. L. Brisson, Paris, Garnier-Flammarion, 1989. — *La République*, trad. M. Trédé & P. Demont, Paris, Gallimard « Folio », 1993. — *Parménide* trad. L. Brisson, Paris, Garnier-Flammarion, 1994. — *Théétète*, trad. N. Cordero, Paris, Garnier-Flammarion, 1993. — *Sophiste*, trad. N. Cordero, Paris, Garnier-Flammarion, 1993. — *Timée*, trad. L. Brisson, Paris, Garnier-Flammarion, 1992. — *Philèbe*, trad. A. Diès, Paris, Les Belles Lettres, 1941. — *Les Lois*, trad. Des Places & A. Diès, Paris, Les Belles Lettres, 1951-1956. — *Lettres*, trad. L. Brisson, Paris, Garnier-Flammarion, 1987.

► CHATELET F., *Platon*, Paris, Gallimard, 1965. — DIOGÈNE LAËRCE, *Vie et Doctrines des philosophes illustres*, livre III, trad. et comm. L. Brisson, in *Aufstieg und Niedergang der Römischen Welt II*, 36. — DIXSAUT M., *Le Naturel philosophe*, Paris, Les Belles Lettres, 1985. — JOLY H., *Le renversement platonicien*, Paris, Vrin, 1974. — VLASTOS G., *Platonic Studies*, Princeton Univ. Press, 1981 ; *Socrates, Ironist and moral philosopher*, Cambridge, 1991 (trad. C. Dalimier, *Socrate, Ironie et*

philosophie morale, Paris, Aubier, 1994) ; *Studies in Greek Philosophy*, vol. II : *Socrates, Plato and their tradition*, Princeton Univ. Press, 1995.

Bernard PIETTRE

→ Dialectique ; Nature (Système de la) ; Phénomène ; Platonisme ; Principe anthropique ; Pythagorisme.

PLATONISME

Le platonisme désigne une tradition de pensée qui a marqué de son empreinte la civilisation occidentale et dont le trait caractéristique est un idéalisme résolu qui trouve dans la philosophie de Platon, et chez ses commentateurs, une source constante d'inspiration.

Philosophie de Platon et platonisme

L'idéalisme de Platon réside dans l'affirmation de l'existence de Formes (ou Idées) immuables, visibles à la seule intelligence, et distinctes de ce que nos sens nous donnent à connaître de façon confuse et mouvante. Le monde sensible participe cependant du monde supérieur des Formes, comme l'image d'un être participe de son modèle. Cette participation donne aux choses de ce monde le peu de stabilité qui leur permet d'être nommées et connues. Platon concilie ainsi l'immuabilité de l'Être parméniénien et la mobilité du devenir héraclitéen, offrant la possibilité d'accéder à une science relative au premier, et de constituer un début de science du second.

Les Idées platoniciennes ne sont pas des concepts forgés par l'esprit, tirés par abstraction du sensible, mais des réalités essentielles. La beauté, par exemple, n'est pas un terme dont l'unité de sens serait arbitraire ou conventionnelle (comme le suggérerait Protagoras pour qui vérités et valeurs sont relatives aux opinions humaines). L'impression de beauté nous est donnée par l'objet lui-même qui nous ravit et nous enthousiasme, comme si cet objet manifestait quelque chose d'une Beauté réelle, qui transcende les opinions variables et contingentes des individus. Le transport amoureux, si bien décrit par exemple dans le *Phèdre*, est occasionné par la vue d'une image de la Beauté en soi.

Cette réalité effective des Idées est également illustrée par les mathématiques. Les concepts mathématiques de l'unité, du deux, de l'impair, du pair, du carré, du cercle, de l'égalité, etc. — et leurs définitions respectives —, ne sont formulables que dans la mesure où ils renvoient à des êtres et à des rapports idéaux existants. Si, par exemple, l'unité résultait seulement d'une opération humaine — d'une somme ou d'une division — toute unité serait toujours susceptible d'être considérée aussi comme multiplicité ($1 = 2/2 = 1/2 + 1/2$, etc.). Le terme d'unité perdrait tout sens objectif. Aucun nombre, ni aucun être n'aurait d'unité véritable (*Phédon* 96^e, *Rép.* 525a). De même, si on considère qu'un carré n'est qu'une construction empirique opérée

par notre esprit, alors on ne comprend pas pourquoi la diagonale serait toujours et nécessairement incommensurable – arithmétiquement – avec les côtés du carré, quelle que soit la façon dont nous nous représentons ce carré ou le dessinons. L'intelligence seule saisit – au-delà de vaines mesures empiriques – le rapport géométrique éternel et nécessaire entre la diagonale et les côtés d'un carré, eux-mêmes éternels.

Le philosophe doit même prendre appui sur les mathématiques pour s'élever à la vision des essences éternelles, et, au-delà d'elles à l'Idée du Bien dont elles dépendent. Platon stimula à l'Académie la recherche mathématique, l'astronomie et l'harmonie mathématiques (l'astronome Eudoxe, les mathématiciens Théodore et Théétète fréquentèrent l'Académie). Il dédaigna la mécanique (contrairement au mathématicien pythagoricien Archytas) et, de façon générale, les mathématiques empiriques. La cosmologie de Platon, développée dans le *Timée*, vise moins à décrire mathématiquement les mouvements des astres, par exemple, qu'à rendre compte de leur régularité circulaire, même quand elle n'est pas apparente, selon des rapports mathématiques semblables à ceux qui régissent les harmonies en musique.

Les mathématiques auraient pris une importance croissante dans l'enseignement oral de Platon ; aux Idées se seraient ajoutées, voire substituées, les Idées-Nombres, elles-mêmes suspendues à l'Idée de l'Un. En cela Platon aurait repris des thèses pythagoriciennes : la « Monade », jointe à la « Dyade » indéfinie, est principe des nombres, qui eux-mêmes sont principes d'ordre et d'harmonie dans le monde (cf. *Philèbe*). Car ce sont autant des relations idéales que des entités idéales qui ordonnent le monde (cf. *Sophiste*).

La philosophie de Platon est vite devenue l'objet de commentaires quasi exégétiques dans l'Académie, après la mort du maître. Les problèmes rencontrés dans les textes de Platon – surtout dans le *Timée*, puis dans le *Parménide* – sont devenus par eux-mêmes des objets d'interrogation philosophique.

L'Académie, sous la direction de Speusippe puis de Xénocrate, est restée cantonnée dans la poursuite des débats qui ont marqué la fin de la carrière de Platon, autour du rapport entre les Idées et les Nombres. Ensuite la Nouvelle Académie, au III^e s. avant J.-C., avec Arcésilas et Carnéade, s'est orientée vers des positions sceptiques, en insistant sur le caractère aporétique des dialogues platoniciens. Enfin la philosophie de l'Académie s'est mêlée de stoïcisme et d'aristotélisme ; et d'éclectique elle a fini par redevenir soucieuse d'une science qui, puisant à la source divine de l'être, fût susceptible de guider l'action, et ainsi de rivaliser avec les écoles stoïcienne et épicurienne, alors en vogue, voire avec le christianisme naissant. C'est la période du moyen platonisme (à laquelle appartient Plutarque, du I^{er} s. apr. J.-C.). Mais c'est le néoplatonisme qui, à partir de Plotin, au III^e s., puis avec Porphyre, Jamblique, Proclus, a donné une vitalité durable au platonisme.

Néoplatonisme et platonisme médiéval et moderne

Le néoplatonisme réinterprète la philosophie de Platon dans le sens d'une théologie négative : la transcendence du principe anhypothétique du Bien de la *République*, confondu avec l'Un du *Parménide*, est telle qu'elle le situe au-delà de la distinction entre l'intellect et l'intelligible (de la dualité sujet-objet), au-delà de ce qui est saisissable et dicible par le *logos*. Le Dieu (l'Un-Bien) surpasse l'intellect démiurgique du *Timée*, qui ordonne et anime le monde en le conformant au modèle des Formes intelligibles. De même que l'Intelligence et l'Intelligible précèdent de la richesse de l'Un, de même l'âme du monde visible procède à son tour de la vie éternelle des Formes et de l'Intelligence. Depuis la matière, qui est multiplicité informe, en passant par l'âme du monde, jusqu'à l'Intelligence et aux Formes qui l'organisent, le monde est comme suspendu à la puissance et à la bonté de l'Un.

Les Pères de l'Église – au premier chef saint Augustin – ont nourri de néoplatonisme leurs spéculations théologiques. Ils n'ont pas manqué de reconnaître dans l'Un, source ineffable et inépuisable de la vérité de la connaissance et de la réalité de l'être, le Dieu révélé. De même que pour les néoplatoniciens le salut de l'âme consiste dans un effort pour rejoindre le principe divin, loin de la dispersion dans le monde sensible, de même il n'est de salut des âmes, pour le chrétien, que par un élan, l'élan de l'amour – non celui l'éros platonicien mais celui l'agapè évangélique – qui élève et conduit jusqu'à l'arche de cet amour : Dieu. Cet élan permet de s'arracher du corps et du sensible, souillé par le péché, pour s'élever vers la perfection intelligible du monde céleste (les saints, les anges et toute la hiérarchie des puissances intermédiaires entre Dieu et les hommes), mieux vers les Idées (de la Justice, de la Beauté... et de tous les êtres créés) contenues dans l'intellect divin.

À la fin du Moyen Âge, le platonisme connaît un regain de faveur, face à l'influence de l'aristotélisme et d'Averroès, et face à celle de l'islam (cf. Pléthon, de Byzance, fin XIV^e début XV^e) ; Maître Eckhart (XIII^e s.) et Nicolas de Cues (XV^e s.) redonnent vie à la théologie négative néoplatonicienne. En Italie, Marsile Ficin (XV^e s.) traduit en latin, et commente en chrétien, les œuvres de Platon et Plotin.

La philosophie de Platon n'a pas eu seulement une portée théologique ; elle a suscité des discussions logiques et ontologiques essentielles.

Le « réalisme » platonicien a été discuté au Moyen Âge, à travers la fameuse querelle des Universaux. Aristote disait que l'Universel ne saurait être substance : les substances concrètes sont des individus, les espèces et les genres peuvent être dits de plusieurs individus, mais non être eux-mêmes des substances en acte (par exemple, la blancheur se dit d'individus blancs, mais n'existe pas elle-même comme individu). C'est dans sa présentation des *Catégories* d'Aristote, que le néoplatonicien Porphyre a ouvert un débat qui n'a pas cessé au Moyen Âge : quel statut donner aux

Universaux ? Une existence réelle – comme le suggère Platon – ou une existence mentale ? Roscelin au XI^e s. a tiré Aristote vers un nominalisme radical – étranger au philosophe stagirite : les universaux n'existeraient qu'en tant que noms (*flatus vocis*), seul existe (*in re*) la chose individuelle concrète, nommable et prédicable. Saint Anselme, en combattant le nominalisme de Roscelin – et en défendant par ailleurs la thèse que l'idée même de l'essence de Dieu implique nécessairement celle de son existence –, est un éminent représentant du platonisme. Inversement, Guillaume d'Ockham, qui reprend et enrichit, au XIV^e s., les thèses nominalistes de Roscelin, et qui reconnaît à chaque être créé une réalité unique, de par la contingence de l'acte créateur divin, est une figure de proue du combat contre le platonisme.

Néoplatonisme et platonisme ont continué d'inspirer la philosophie occidentale dans sa tradition la plus spiritualiste, aux XVII^e et XVIII^e s., et jusque dans l'idéalisme allemand. La théorie malebranchiste de la science comme vision des Idées en Dieu lui-même, et la théorie immatérialiste de Berkeley, qui invite à s'élever directement à la cause permanente de l'existence du monde – Dieu – en faisant l'économie du concept de matière, doivent beaucoup à la conception néoplatonicienne de la matière (concept emprunté à Aristote) comme mal et non-être qui fait obstacle à l'action bienfaisante et lumineuse de Dieu. À cet égard, en posant la matière comme un obstacle résistant à la liberté de l'activité de l'esprit, obstacle dont l'esprit triomphe au cœur des mouvements de la Nature, Hegel est un héritier du néoplatonisme. La redécouverte d'un dialogue comme le *Phédon*, aux XVII^e et XVIII^e s., a donné des arguments aux défenseurs de l'immortalité de l'âme (Leibniz, Mendelssohn...), que Kant réfute dans la *Critique de la Raison pure*. Mais c'est dans le domaine épistémologique que l'influence de Platon est restée profonde.

Le platonisme dans la science moderne et contemporaine

L'épistémologie des grands savants de la modernité est à bien des égards platonicienne. Certes ils réhabilitent l'expérience que dédaignait Platon ; mais les mathématiques, délaissées par la physique d'Aristote, dévoilent bien la structure cachée du monde. L'expérience doit être interrogée à partir d'hypothèses géométriques fécondes. Telle est la voie tracée par Galilée, dont on connaît la célèbre formule : « Dieu a écrit le livre de l'univers dans le langage des mathématiques. »

C'est également nourri d'ésotérisme mathématique néopythagoricien et néoplatonicien que Kepler a cherché à faire correspondre sa soif d'ordre mathématique et les observations affinées de son maître Tycho Brahe sur les révolutions des planètes autour du soleil. On connaît également l'influence décisive des philosophes néoplatoniciens de Cambridge (R. Cudworth et H. Moore) sur la pensée de Newton. Le platonisme de Moore, par exemple, le conduisit à rejeter le mécanisme de Descartes, et son dualisme radical entre

matière et pensée, incapable de rendre compte du dynamisme du vivant et de la présence du divin dans la vie de l'univers. Or pour Newton l'action divine est présente, à travers l'espace et le temps infinis, jusque dans le dynamisme des corps matériels, comme l'illustre la loi de l'attraction universelle.

Enfin, convaincu de l'existence d'une harmonie divine du monde, accessible à notre intelligence par les mathématiques, Einstein est l'adepte, plus ou moins conscient, d'une métaphysique platonicienne. Dans le débat théorique sur la physique quantique qui l'a opposé à l'école de Copenhague, Einstein s'est ainsi heurté à une conception nominaliste et pragmatique de la science, sans prétention ontologique sur la nature du réel : le réel est approché, et non révélé, par la mesure mathématique.

Si le platonisme est rarement invoqué par les physiciens dans leurs débats philosophiques, il l'est fréquemment par les mathématiciens. On peut même évoquer un platonisme spontané des mathématiciens : « Les mathématiciens – dit Dieudonné – admettent que les objets mathématiques possèdent une réalité distincte de la réalité sensible (peut-être semblable à celle que Platon accordait aux Idées ?) ». Alain Connes déclare par exemple : « Pour moi, la suite des nombres premiers a une réalité plus stable que la réalité matérielle qui nous entoure. »

En affirmant un monde mathématique, extérieur à notre pensée, les mathématiciens « platoniciens » s'opposent aux constructivistes et aux intuitionnistes pour lesquels un objet mathématique n'existe que dans la mesure où on peut le construire. Mais le formalisme mathématique contemporain, développé sous l'impulsion de Hilbert et par l'axiomatique du XX^e s., auquel s'oppose l'intuitionnisme, ne constitue qu'une méthode pour faire progresser l'exploration des mathématiques, sans impliquer l'adhésion à un platonisme. On peut être formaliste et penser que les mathématiques ne sont qu'un langage formel permettant de spécifier des propriétés distinctives d'objets, et par là même de créer ces objets. C'est ainsi qu'on peut avoir des axiomatiques géométriques, aussi consistantes l'une que l'autre, mais où les mêmes objets, apparemment, auront cependant des propriétés différentes. Si le mathématicien incline au platonisme c'est que les propriétés des objets définis (par exemple, des Entiers, des Réels...) font apparaître des structures et des relations spécifiques qui résistent à la pensée, comme si elles formaient un monde qui lui préexistait.

À cet égard Frege, à l'origine du renouvellement de la logique et des fondements des mathématiques, renoue en profondeur avec Platon lorsqu'il affirme que le contenu vrai d'une pensée « n'appartient ni au monde intérieur, en tant qu'il serait ma représentation, ni au monde extérieur sensible » mais est indépendant de ma pensée. Le nombre 1 dénote un contenu de réalité indépendant, qui fait que le « 1 » ne saurait être confondu avec le signe qui le désigne (après tout il est aussi désigné par 2/2, ou 4 - 3, etc.), ni produit par l'arbitraire d'une définition. « Aucune définition n'a le

pouvoir créateur de conférer à une chose des propriétés que cette chose n'a jamais eues. » Primat de l'être de l'Idée sur l'intelligence de l'Idée.

Wittgenstein, dans la seconde partie de son œuvre, s'est efforcé en revanche de récuser ces restes de réalisme idéaliste qu'il croit trouver chez Frege et Russell, et même dans son propre ouvrage du *Tractatus*, et qui consiste à croire que les lois de la logique sont des lois idéales du monde. Wittgenstein combat cette illusion platonicienne qui est de penser que l'idéal, qui sert de paradigme, doit se trouver caché dans la réalité, alors qu'il n'est qu'une norme de conduite du langage, une règle d'un jeu de langage. Les mathématiques peuvent certes aider à décrire le monde – à le schématiser – mais le réel n'est pas comparable au modèle ; il ne saurait en être l'image, pas plus que les objets du monde sensibles ne sauraient être l'image des Formes.

Or cela, Platon lui-même, dans le *Parménide*, reconnaissait la difficulté de l'admettre. Le platonisme, en réalité, vit, depuis les origines jusqu'à nos jours, des discussions internes à la philosophie de Platon, plus que d'une doctrine figée.

► BRISSON L., « Platonisme », in CANTO-SPERBER M. dir., *Philosophie grecque*, Paris, PUF, 1997 ; *Le même et l'autre dans la structure ontologique du Timée*, Sankt Augustin, Academia Verlag Richarz, 1994. – CASSIRER E., *Individu et cosmos dans la philosophie de la Renaissance* (Leipzig, 1927), trad. P. Quillet, Paris, Minuit, 1983. – CAVEING M., *La constitution du type mathématique de l'idéalité dans la pensée grecque* (1982), Univ. de Lille III, 1997. – CHANGEUX J.-P. & CONNES A., *Matières à penser*, Paris, Odile Jacob, 1989. – CHERNISS H.F., *L'énigme de l'ancienne Académie (The Riddle of the early Academy)*, Los Angeles, 1943 (trad. fr. L. Boulakia, Paris, Vrin, 1993). – CRUBELIER M., *Les livres Mu et Nu de la Métaphysique d'Aristote*, Univ. de Lille III, 1994. – DIEUDONNÉ J., *Pour l'honneur de l'esprit humain*, Paris, Hachette, 1987, rééd., 1997. – DIXSAUT M., *Contre Platon* (Recueil d'articles), t. 1 « Le platonisme dévoilé », t. 2 « Le platonisme renversé », Paris, Vrin, 1993-1995. – EINSTEIN A., *Œuvres choisies*, t. 5, Paris, Le Seuil/CNRS, 1971. – FICIN M., *Commentaire sur le Banquet*, trad. R. Marcel, Paris, Les Belles Lettres, 1978. – FILODEMO, *Storia dei Filosofi, Platone e l'Accademia*, Naples, Bibliopolis, 1991. – FOWLER D.H., *The Mathematics of Plato's Academy*, Oxford, Clarendon Press, 1987. – FREGE G., *Écrits logiques et philosophiques*, trad. J. Fauve, Paris, Le Seuil, 1970. – GANDILLAC M. DE, « Guillaume d'Ockham », in *Histoire de l'Église jusqu'à nos jours*, t. XIII, Paris, A. Fliche & V. Martin, 1956. – GILSON E., *L'Être et l'essence*, Paris, Vrin, 1948, rééd., 1981. – GOLDSCHMIDT V., *Platonisme et pensée contemporaine*, Paris, Aubier-Montaigne, 1970. – GUEROULT M., *La patristique et la tradition philosophique dans l'histoire de la philosophie*, t. 1, Paris, Aubier, 1984. – KOYRÉ A., *Du monde clos à l'univers infini*, Paris, Gallimard, 1973. – LARGEAULT J., *Enquête sur le nominalisme*, Louvain, Nauwelaerts, 1971 ; *Principes de philosophie réaliste*, Paris, Klincksieck, 1985. – LASSERRE F., *La naissance des mathématiques à l'époque de Platon*, Fribourg/Paris, Univ. de Fribourg/Le Cerf, 1990. – MOREAU J., *Le sens du platonisme*, Paris, PUF, 1967 ; *Plotin ou la gloire de la philosophie grecque*, Paris, Vrin, 1970. – PLOTIN, *Ennéades*, texte établi et trad. E. Bréhier, Paris, Les Belles Lettres, 7 vol., 1924-1938. – PRITCHARD P., *Plato's Philosophy of Mathematics*, International Pto studies 5, Sankt Augustin, Academia Verlag, 1995. – PROCLUS, *Éléments de théologie*, trad. J. Trouillard, Paris,

Aubier, 1965. – ROBIN L., *La théorie des Idées et des Nombres de Platon, d'après Aristote*, Paris, Alcan, 1908, rééd., 1957. – VIEILLARD BARON J.-L., *Platon et l'idéalisme allemand*, Paris, Beauchesne, 1979 ; *Platonisme et l'interprétation de Platon à l'époque moderne*, Paris, Vrin, 1988. – VLASTOS G., *Plato's Universe*, Oxford, Clarendon Press, 1975. – WITTGENSTEIN L., *Grammaire philosophique*, trad. M.-A. Lescourret, Paris, Gallimard 1969 ; *Remarques philosophiques*, trad. J. Fauvé, Paris, Gallimard, 1983.

Bernard PIETRE

→ Dialectique ; Gravitation ; Héliocentrisme ; Nature (Système de la) ; Phénomène ; Réalisme.

POINCARÉ Jules Henri, 1854-1912

Mathématicien français, professeur à la Sorbonne dès 1886. Son œuvre mathématique embrasse toutes les disciplines : arithmétique, théorie des groupes, géométrie, topologie, algèbre, analyse, et lui a suggéré autant d'idées dans presque tous les champs de la physique mathématique, sa solution du problème des trois corps, sa mécanique algébrique, sa « section » requise dans la théorie du chaos. Les analogies d'une science à l'autre, souvent fulgurantes, l'intéressent plus que la construction théorique, quoiqu'on lui doive une théorie des marées et une théorie de la relativité contemporaine de celle d'Einstein (1905). Poincaré élabore une philosophie d'inspiration kantienne et empiriste, qui à la fois systématise les relations entre les disciplines scientifiques et annonce les épistémologies locales. Le langage de la science est susceptible d'être vrai lorsqu'il se contente de répéter une opération une fois qu'elle est possible (arithmétique) ou de rapporter l'expérience (physique expérimentale). Mais c'est un « langage commode » lorsqu'il s'agit des définitions et des postulats par lesquels sont mis en relation les faits scientifiques. La géométrie est conventionnelle, la mécanique et la physique mathématique partiellement, en fonction de leur place entre formalisme et expérience. La cohérence est un critère d'existence mathématique. Le conventionnalisme de Poincaré n'est pas un « nominalisme absolu » : il dépend de son inductivisme et de sa confiance au « fait brut » derrière le « fait scientifique ».

● *Œuvres*, éd. G. Darboux, Paris, Gauthier-Villars, 11 vol., 1916-1956. – *La Science et l'Hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902. – *La Valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1905. – *Science et Méthode*, Paris, Flammarion, 1908. – *Savants et Écrivains*, Paris, Flammarion, 1910. – *Les Sciences et les Humanités*, Paris, Fayard, 1911. – *Dernières Pensées*, Paris, Flammarion, 1913. – Les cours de physique mathématique de Poincaré, rédigés par ses élèves, ont été édités à Paris, aux éditions Carré, Naud, et Gauthier-Villars de 1886 à 1913. – *L'Analyse et la Recherche. Textes choisis* (par G. Ramunni), Paris, Hermann, 1991. *La Correspondance entre Henri Poincaré et Gösta Mittag-Leffler*, présentée et annotée par Ph. Nabonnand, Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser, 1999 ; *L'Opportunisme scientifique*, éd. L. Rougier, L. Rollet, Boston, Birkhäuser, 2002.

► APPELL P., *Henri Poincaré*, Paris, Plon, 1925. – BELGODEUX P. & LARDEUX D., *Colloque H. Poincaré*, éd. multigravée, Paris, Institut H. Poincaré, 1946. – BOTTAZZINI U., éd., *Poincaré : philosophe et mathématicien*, avec une bibliographie (1990-) établie avec le concours des Archives Poincaré, Paris, Belin, *Pour la science*, 2002. – DANTZIG T., *Henri Poincaré. Critic of crisis. Reflections on his Universe*, New York, Greenwood Press, 1954, rééd., 1968. – DHOMBRES J.-G. & PIER J.-P., éd., *La Philosophie des sciences de Henri Poincaré*, Colloque des 22 et 23 mai 1986, Paris, Société française d'histoire des sciences et des techniques, Diffusion Belin, 1988. – DIEUDONNÉ J., « Poincaré, Jules Henri », in *Dictionary of scientific Biography*, vol. 11, p. 51-61, New York, Scribner, 1975. – FOLINA J., *Poincaré and the Philosophy of Mathematics*, New York, London, McMillan, 1992. – GREFFE J.-L., HEINZMANN G. & LORENZ K., éd., *Henri Poincaré : Science et Philosophie*, Congrès international, Nancy (France), 1994, et Berlin, Akademie Verlag, 1996. – HEINZMANN G., *Entre intuition et analyse : Poincaré et le concept de préactivité*, Paris, Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, 1985. – LÉON E., *Henri Poincaré. Biographie, bibliographie analytique des écrits*, Paris, Gauthier-Villars, 1912. – LORENZO J. DE, *La Filosofia de la matematica de Jules Henri Poincaré*, Madrid, Editorial Tecnos, 1974. – MANFRED M., *Leiblichkeit und Konvention : Struktur einer Aporetischen Wissenschaftsgründung bei Hobbes une Poincaré*, Fribourg, K. Alber, 1992. – MOU J.-J.A., *La Philosophie des mathématiques de Henri Poincaré*, Paris, Gauthier-Villars, et Louvain, Nauwelaerts, 1966. – ROUGIER L., « La Philosophie scientifique d'Henri Poincaré », préface à *La Valeur de la science*, Genève, Cheval, 1946. – SANZO U., *Poincaré e i filosofi*, Lecce, Milella, 2000. – SCHMID A.-F., *Henri Poincaré, les sciences et la philosophie*, suivi des textes de Bertrand Russell sur la Science et l'Hypothèse et sur *Science et Méthode*, Paris, L'Harmattan, 2001. – VOLTERRA V., HADAMARD J., LANGEVIN P. & BOUTROUX P., *Henri Poincaré. L'œuvre scientifique. L'Œuvre philosophique*, Paris, Alcan, 1925. – VUILLEMIN J., préface à *La Science et l'Hypothèse*, Paris, Flammarion, 1968 ; préface à *La Valeur de la science*, Paris, Flammarion, 1970. – ZAHAR É., *Poincaré's philosophy : from conventionalism to phenomenology*, Chicago, Open Court, 2001.

Anne-Françoise SCHMID

→ Axiomatisme et formalisation ; Conjecture ; Conventionnalisme ; Crise de la physique moderne ; Espace-temps ; Fin thermique de l'univers ; Formalisme ; Induction complète ; Irréversibilité ; Marées ; Masse ; Théorie ; Topologie ; Vérification.

POPPER Karl Raimund, 1902-1994

Philosophe autrichien. Auteur de l'un des ouvrages les plus célèbres de ce siècle en matière de philosophie des sciences, la *Logique de la découverte scientifique* (1934), dont la traduction anglaise parut en 1959, il n'a cessé de réfléchir aux développements de la physique contemporaine et tout particulièrement de la mécanique quantique à laquelle il a consacré l'essentiel de ses derniers ouvrages. Mais son œuvre comporte un autre versant non moins important : une philosophie politique qui s'inscrit dans la tradition libérale anglo-saxonne. Son ouvrage *La société ouverte et ses ennemis*, publié en 1945, est resté une référence majeure.

Son œuvre a joui dès les années 1950 d'une immense notoriété à l'échelle internationale, elle a été longtemps méconnue du public français. Elle constitue aujourd'hui une référence universelle en philosophie des sciences comme en philosophie politique. Son unité s'organise autour de l'énoncé d'un critère de démarcation entre les théories qui peuvent à bon droit prétendre être dites « scientifiques » et celles qui relèvent de la « pseudo-science ». Ce critère est connu comme critère de « falsifiabilité » ou de « réfutabilité ». Une théorie scientifique se distingue en ce que de l'ensemble cohérent des propositions qui la constituent on peut déduire au moins un énoncé singulier désignant un test empirique qui, s'il était vérifié, la réfuterait. Ainsi en va-t-il de la théorie einsteinienne comme de la théorie newtonienne de la gravitation : « Si le décalage vers le rouge des lignes spectrales dû au potentiel de gravitation devait ne pas exister, alors la théorie générale de la relativité serait insoutenable. » Il n'en va pas de même du marxisme et de la psychanalyse que Popper dénonce comme des impostures épistémologiquement fallacieuses et politiquement dangereuses par leur dogmatisme. L'énoncé de ce fameux critère forme le noyau d'une philosophie de la connaissance qui s'oppose à toute forme d'empirisme : la démarche scientifique n'est nullement inductive – elle ne procède pas par observations répétées et formulation de lois. Elle est au contraire « hypothético-déductive » : c'est l'énoncé de conjectures audacieuses qui est premier, lesquelles sont ensuite soumises à l'épreuve de l'expérimentation. Cette logique de la découverte se présente ainsi comme une méthodologie. Plus généralement, ce n'est point sa « vérification » empirique qui permet de dire d'une théorie qu'elle est scientifique. Tant qu'elle n'a pas été réfutée une théorie scientifique n'est jamais qu'une hypothèse corroborée.

Popper s'opposait ainsi au courant majeur de la philosophie – l'empirisme ou positivisme logique – qui prenait son essor avec les activités du Cercle de Vienne au moment où il écrivait son premier ouvrage. Il n'admettait pas que la scientificité d'une théorie pût être établie par examen de la signification de ses énoncés. À ses yeux, la philosophie ne doit pas se focaliser sur l'analyse du langage, sauf à dégénérer en scolastique. Popper n'a par la suite jamais fait aucune concession au courant « analytique » de la philosophie – dite du « langage ordinaire » – qui s'est déployée en Angleterre, puis aux États-Unis, par référence aux *Investigations philosophiques* de Wittgenstein et à l'œuvre d'Austin.

Alors que les tenants du positivisme logique se sont donné pour tâche d'« éliminer » la métaphysique de la science pour bâtir une « conception scientifique du monde », Popper défend l'idée que les vues métaphysiques sont consubstantielles à la pensée scientifique. Elles guident la formulation des grandes hypothèses destinées à être soumises aux tests expérimentaux. Il caractérise ainsi sa position philosophique comme rationaliste, réaliste et critique.

À partir du noyau de ces thèses ainsi coordonnées, Karl Popper a bâti, au fil des décennies, l'un des plus amples systèmes philosophiques de ce siècle. Il vise à couvrir tous les champs du savoir et de l'action, des sciences de la nature aux sciences politiques en passant par la psychologie, la linguistique et la théorie de l'art. La philosophie doit être, à ses yeux, « tableau du monde ».

Ses dernières œuvres ont pour premier objectif de fonder la méthodologie de la démarcation sur des données empruntées aux sciences biologiques selon deux directions : un recours au darwinisme pour rendre compte de la sélection des hypothèses qui constituent le monde relativement autonome de la connaissance objective ; un emprunt critique aux neurosciences (sir John Eccles) pour fonder biologiquement ce processus qui procède par « essais et erreurs ». Il revient corrélativement sur les bases métaphysiques de son tableau du monde en tenant compte des développements de la mécanique quantique. Pour mieux soutenir une conception déterministe de la connaissance scientifique en mouvement, il l'adosse à une « métaphysique indéterministe » : l'univers est irrésolu.

● *The poverty of historicism*, in *Economica*, 11, n° 42-43, et 12, n° 46, et Londres, Routledge & Kegan Paul, 1957 (trad. fr. Rousseau, *Misère de l'historicisme*, Paris, Plon, 1956 ; rééd., Paris, Press Pocket, 1988). – *The logic of scientific discovery*, éd. originale, Vienne, J. Springer Verlag, 1934 ; version angl. augm., trad. Popper, Julius & Lan Freed, Londres, Hutchinson & Co, 1959 (trad. fr. Thyssen-Rutten & Devaux, préf. J. Monod, *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1973). – *Objective knowledge : An Evolutionary Approach*, Oxford, Clarendon Press, 1972 (trad. fr., des 3 premiers chap., sur les 9, et 2 appendices originaux, C. Bastyns, *La connaissance objective*, Bruxelles, Complexe, 1978). – *The open society and its enemies*, vol. 1 : *The spell of Plato* ; vol. II : *The high tide of prophecy : Hegel and Marx and the aftermath*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1945 ; rééd. augm., 1966 (trad. fr. abrégée J. Bernard & P. Monod, *La société ouverte et ses ennemis*, vol. 1 : *L'ascendant de Platon* ; vol. II : *Hegel et Marx*, Paris, Le Seuil, 1979). – *Unended Quest. An Intellectual Autobiography*, in SCHILPP P.A. éd., *The philosophy of K.R. Popper*, La Salle (Ill.), Open Court « The library of living philosophers », 1974 ; éd. originale, Londres, Fontana/Collins, 1976 (trad. fr. R. Bouveresse & M. Bouin-Naudin, *La quête inachevée, autobiographie intellectuelle*, Paris, Calmann-Lévy, 1981 ; rééd., Paris, Press Pocket, 1989). – *The open universe*, vol. 2 de *The postscripts of the logic of scientific discovery*, Londres, Hutchinson & Co, 1982 (trad. fr. R. Bouveresse, *L'univers irrésolu, plaidoyer pour l'indéterminisme*, Paris, Hermann, 1984). – *Conjectures and refutations. The growth of scientific knowledge*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1963 (trad. fr. M.I. & M.B. de Launay, *Conjectures et réfutations. La croissance du savoir scientifique*, Paris, Payot, 1985). – *The postscripts of the logic of scientific discovery*, I : *Realism and the Aim of Science*, éd. et notes W. Bartley, Londres, Hutchinson & Co, 1983 (trad. fr. A. Boyer & D. Andler, *Le réalisme et la science. Postscriptum à la logique de la découverte scientifique*, I, Paris, Hermann, 1990). – *A world of propensities*, Bristol, Thoemmes Press, 1990 (trad. fr. et prés. A. Boyer, *Un univers de propensions : deux études sur la causalité et l'évolution*, Paris, L'Éclat, 1992). – *The postscripts to the logic of scientific discovery*, III, *Quantum theory and the schism in physics*, éd. et notes W.W. Bartley,

Londres, Hutchinson & Co, 1982 (trad. fr. E. Mololo Dissak, *La théorie quantique et le schisme en physique. Post-scriptum à La Logique de la découverte scientifique* [III], Paris, Hermann, 1996). – POPPER K., ADORNO T.W., DAHRENDORF R., HABERMAS J., ALBERT H. & PILOT H., *Der Positivismusstreit in der deutschen Soziologie*, Darmstadt/Neuwied, Hermann Luchterhand Verlag, 1969 (trad. fr., *De Vienne à Francfort, la querelle allemande des sciences sociales*, Bruxelles, Complexe, 1979).

► BAUDOIN J., *Karl Popper*, Paris, PUF, 3^e éd., 1995. – BOUVERESSE R., *Karl Popper*, Paris, Vrin, 1978. – BOYER A., *Popper : une épistémologie laïque*, Paris, Presses de l'École normale supérieure, 1978. – LECOURT D., *L'ordre et les jeux*, Paris, Grasset, 1981. – MAGEE B., *Popper*, Glasgow, Fontana/Collins, 1973. – MALHERBE J.F., *La philosophie de Karl Popper et le positivisme logique*, Paris, PUF, 1976.

Dominique LECOURT

→ Cercle de Vienne ; Conjecture ; Corroboration ; Découverte ; Épistémologie ; Expérience ; Expérience cruciale ; Fait ; Induction ; Méthode ; Rationalisme ; Rationalité ; Réfutabilité ; Reproductibilité ; Test ; Théorie ; Validation.

POSITIVISME

Le « positivisme » apparaît en France comme une doctrine philosophique constituée en système dans les soixante leçons du *Cours de philosophie positive* professées et publiées par Auguste Comte (1798-1857) de 1830 à 1842. La logique d'ensemble de ce système s'organise autour de la notion d'« esprit positif » que Comte reçoit de Saint-Simon (1760-1825). La caractérisation la plus ramassée se trouve dans le Discours préliminaire qu'il a placé en tête de son *Traité philosophique d'Astronomie populaire* publié en 1844 et que l'on connaît comme *Discours sur l'esprit positif*.

Le mot « positif » désigne d'abord, écrit-il, le réel par opposition au chimérique. Cette opposition renvoie à une thèse fondamentale longuement argumentée dans le *Cours* : l'esprit humain aux prises avec les phénomènes a manifesté au cours de l'histoire qu'il pouvait s'y prendre de deux façons différentes pour les interroger. La première consiste à chercher leurs causes. Elle a donné lieu à deux types de questions également chimériques : questions « théologiques » – lorsqu'on cherche des puissances surnaturelles personnifiées comme « responsables » de ce qui est observé ; questions « métaphysiques », lorsqu'on impute les phénomènes à des « entités abstraites ». La seconde manière d'interroger les phénomènes consiste à « écarter comme nécessairement vaine toute recherche quelconque des causes proprement dites, soit premières, soit finales, pour se borner à étudier les relations invariables qui constituent les lois effectives de tous les phénomènes observables ». L'esprit se contente alors de « l'appréciation systématique de ce qui est ». Comte ne se lassera pas de répéter à ses divers auditeurs que l'esprit, pour devenir positif, doit se détourner de la question du « pourquoi » ? pour se limiter au « comment » des phénomènes ; qu'il doit

cesser d'espérer ou de prétendre rendre compte de leur mode de production et de leur nature intime. Sous cette condition, en se détournant du chimérique, l'esprit se donne alors le pouvoir de la prévision rationnelle, principal caractère de la vraie science ». Et cette prévision peut se traduire dans la pratique par une « prévoyance » elle-même rationnelle, donnant lieu à des « applications ». D'où le fait que « positif » puisse aussi être entendu comme « utile » par opposition à « oiseux » ; et de là qu'il enveloppe l'opposition de la certitude à l'indécision, comme celle du précis au vague.

L'esprit positif s'est d'abord manifesté à propos des phénomènes « les plus simples », objets de la mathématique et de l'astronomie ; puis en a difficilement conquis d'autres plus complexes, physico-chimiques et, plus récemment, biologiques. La philosophie positive se donne pour tâche de prendre acte de cette marche progressive et de l'achever en étendant le règne de l'esprit positif aux phénomènes les plus complexes qui sont les phénomènes sociaux.

Le positivisme d'Auguste Comte n'est pas un empirisme. Il n'explique nullement en effet la genèse de la connaissance à partir des données des sens ; ce qui est premier, c'est la « spéculation » sur les causes, laquelle seule pouvait « stimuler suffisamment le premier essor contemplatif ». Pour connaître, il faut observer ; mais pour observer, il faut être mû par « une théorie quelconque ». Le positivisme établit en conséquence une hiérarchie des sciences logiquement et chronologiquement ordonnées selon le degré de complexité de leurs objets. Comte distingue six grands domaines d'objets : mathématiques, astronomiques, physiques, chimiques, biologiques, sociologiques. Cette hiérarchie lui permet de dénoncer tout matérialisme comme tentation réductionniste d'expliquer le supérieur par l'inférieur.

Mais le point de vue de Comte ne se présente nullement comme descriptif. En témoigne le sens du mot « positif » sur lequel il fait particulièrement porter l'accent – son opposition à « négatif » – en ce que « la vraie philosophie moderne est destinée, par sa nature, non à détruire mais à organiser ».

Le *Cours de philosophie positive* s'annonce ainsi comme une œuvre de combat, comme l'instrument d'une « opération philosophique » visant à mettre fin à « l'anarchie intellectuelle, morale et politique » qui s'est installée en Europe du fait de la prééminence persistante, depuis la Révolution française, d'une philosophie négative, c'est-à-dire destructive, incapable de promouvoir un état stable de l'organisation sociale.

Le positivisme de Comte ne trouve sa profonde cohérence que dans une philosophie de l'histoire, laquelle offre cette particularité d'annoncer la fin de l'histoire. L'accession de la sociologie au rang de science positive est supposée marquer le terme d'un processus amorcé dans la Grèce antique. Et cette fin doit permettre de conférer à l'ensemble des connaissances positives l'unité qui leur manquait. L'opération d'Auguste Comte porte donc en elle-même le projet de refondre l'ensemble des sciences existantes, en les

subordonnant aux leçons de la dernière venue – la science supérieure – la sociologie.

Ce qui se réalise à la fin était virtuellement présent dès l'origine. Ainsi, dès l'origine se manifeste la propension de l'esprit humain à la généralité de ses explications : ce « besoin élémentaire qu'éprouve toujours notre intelligence d'étendre et de lier, autant que possible, ses connaissances réelles ». Or, cette propension qui se déploie dans l'état théologique s'est emparée des premiers résultats obtenus par l'esprit positif en mathématiques pour procéder à des « systématisations chimiques ». On le voit encore au XVIII^e s. avec « la grande construction cartésienne » qui « érigeait la géométrie et la mécanique en fondements directs de la science universelle ». Mais le fait que Descartes (1596-1650) ait exclu de son champ les « études morales et sociales » suffirait à prouver « le défaut radical de véritable universalité propre à un tel point de vue », cependant que la tentative de l'étendre aux spéculations biologiques y a retardé l'avènement de l'esprit positif. D'où le fait qu'en ces domaines, le point de vue théologique et métaphysique ait pu persister pendant deux siècles.

Des mathématiques, le titre philosophique essentiel tient à ce que « la véritable logique scientifique y a nécessairement trouvé son essor primordial » ; mais du fait de l'extrême simplicité des phénomènes géométriques et même mécaniques, le point de vue des mathématiques reste « abstraitement universel ». Or, les mathématiciens ont commis l'erreur de vouloir « gouverner des recherches » qu'ils pouvaient seulement « seconder ». Il est urgent, selon Comte, de mettre un terme à « la vicieuse prépondérance des géomètres » qui va jusqu'à vouloir traiter des phénomènes sociaux par une « branche spéciale de l'analyse, le prétendu calcul des chances, que la raison publique flétrira bientôt comme une honteuse aberration scientifique ».

Non seulement l'avènement de la sociologie comme science positive s'en est trouvé retardé, mais, même « depuis le développement d'ailleurs si récent de la mécanique céleste, les astronomes proprement dits, tels que les Bradley, les Mayer, les Lacaille, les Herschel, les Delambre, les Olbers... ont souvent souffert de l'irrationnelle présomption des géomètres ».

Comte dénonce l'empire de cette « utopie métaphysique » et annonce son déclin « sous l'essor d'une éducation convenablement rationnelle de la classe spéculative », laquelle veillera à ce que « la suprématie normale de l'esprit mathématique soit « renfermée entre les limites philosophiques du vrai domaine mathématique ». Mais cette éducation, il faudra l'imposer contre la « domination spéculative oppressive des géomètres » dans les académies. On mettra fin ainsi à « la tendance du point de vue le plus simple et le plus incomplet à prévaloir constamment sur le plus complexe et le plus étendu ». « L'éducation individuelle, écrit Comte, doit essentiellement reproduire celle de l'espèce, au moins dans chacune de ses grandes phases successives. » Chacun devra donc reprendre, dans l'ordre hiérarchique, « l'étude des

diverses branches essentielles de la philosophie naturelle ».

Dans ces conditions, l'apprentissage des mathématiques aura le premier rang ; il constituera « la base normale de toute saine éducation logique », puisque l'élève y trouvera « une immense accumulation de moyens logiques tout préparés pour les besoins ultérieurs de déduction et de coordination des divers cas scientifiques ». Et, en mathématiques, la géométrie conservera la préséance. N'a-t-elle pas constitué « le berceau de la positivité rationnelle » ? Mais « un berceau ne saurait être un trône ». À faire du berceau un trône, à prendre le degré initial pour le degré final, on en est arrivé à cette situation paradoxale qu'« il n'y a pas d'enseignement scientifique aussi peu rationnel, d'ordinaire, que l'enseignement mathématique, d'après la faible importance qu'on y attache à l'esprit général de la science ».

Les mathématiques, remises à leur juste place, devront ensuite céder le pas à une « autre phase générale », celle des études astronomiques qui permettent l'essor distinct et direct de l'esprit d'observation. « C'est là que dans l'avenir comme dans le passé la raison humaine doit constamment trouver le premier sentiment philosophique des lois naturelles », mais aussi celui de « la théorie générale des hypothèses vraies scientifiques ». Aucune autre science ne pouvait, selon Comte, « manifester avec une aussi familière évidence, cette prévision rationnelle qui constitue, à tous égards, le principal caractère permanent de nos théories positives ».

Puis à la phase astronomique de l'éducation, succédera la phase physico-chimique, qui trouve dans la précédente à la fois « son type logique et sa base scientifique, afin de compléter l'étude abstraite du monde extérieur ». Avec les études physico-chimiques, on découvrira « un nouveau mode essentiel de l'art d'observer », en passant de l'observation proprement dite à l'expérimentation. C'est en physique que la « saine philosophie » placera le règne essentiel de la méthode expérimentale.

En passant de la nature inerte à la nature vivante, la nature du sujet exige que l'on renverse la démarche antérieure : d'analytique, elle devra se faire synthétique. La méthode d'observation sera ici comparative.

Mais l'ensemble de ce « cursus » se trouve finalisé par « l'étude de l'humanité » envers laquelle toutes les autres études apparaissent comme d'« indispensables préambules ». Un autre procédé fondamental s'y révèle : le « mode historique » constituant l'investigation non par simple comparaison, mais par filiation graduelle. Avec l'avènement de la sociologie, l'esprit positif parviendra à son « état définitif » : tous les absolus auront enfin été chassés de la pensée humaine. Dès lors, l'opposition entre philosophie naturelle et philosophie morale qui a marqué l'histoire de l'Occident depuis Platon et Aristote va perdre sa raison d'être. Placé sous la « présidence » de la sociologie, l'éducation scientifique contribuera à l'établissement

de la solidarité entre les hommes, elle assurera parmi eux la « prépondérance normale de la morale ».

Ce système comportait comme sa promesse l'élaboration non seulement d'une politique positive mais d'une religion positive – annoncée dans la 46^e leçon du *Cours* comme la première « religion démontrée ». La fondation en 1849 de l'Église universelle de la religion de l'humanité, le ralliement d'Auguste Comte au Second Empire puis la publication en septembre 1852 du *Catéchisme positiviste*, suivi en 1855 de l'*Appel aux Conservateurs* provoquent une scission parmi ses disciples. Il meurt en 1857.

Dès 1852, le philosophe Émile Littré (1801-1881) prend ses distances, lui qui s'était fait le propagandiste de la philosophie positive et qui en 1849 dans le *National* avait pris le risque au lendemain de la révolution de caractériser le positivisme comme « le socialisme explicite, déterminé, systématique ». En 1863, dans un livre intitulé *Auguste Comte et la philosophie positive*, Littré périodise la carrière intellectuelle du fondateur pour n'en retenir que la partie du système qui correspond aux renouvellements apportés par lui en philosophie et histoire des sciences. S'il en retient également la philosophie de l'histoire et « les découvertes sociologiques », il les coupe elles-mêmes de leur finalité politique ; et propose de les compléter par une économie politique et une psychologie positives, ce qui eût horrifié Auguste Comte.

En France, la III^e République a hérité de ce positivisme-là. Un positivisme amputé qui s'affirme politiquement républicain et anticlérical, et retient de Comte l'idée que la réforme sociale doit s'appuyer sur une réforme intellectuelle organisée autour de la méthode des sciences, laquelle récuse tout dogme théologique ou métaphysique.

Plus précisément, en philosophie des sciences, on ne se lassera pas de commenter les propositions majeures des deux premières leçons du *Cours* : il faut renoncer à chercher les causes des phénomènes, soumettre l'imagination à l'observation pour formuler des lois qui traduisent les relations régulières de similitude ou de succession entre les faits, de façon à prévoir ce qui sera en fonction de ce qui est. Toute hypothèse scientifique, afin d'être réellement valable, doit exclusivement porter sur ces lois qui apparaissent comme des « faits généraux », et jamais sur leur mode de production.

S'il faut inscrire l'œuvre du physicien philosophe Ernst Mach (1838-1916) dans l'histoire du positivisme, ce n'est point qu'il se soit réclamé de Comte, mais surtout parce que le Cercle de Vienne, promoteur du positivisme logique, en a fait l'une de ses références majeures. Au point de prendre d'abord le nom de Société Ernst Mach. Comme l'a montré Leszek Kolakowski, un certain style rattache en vérité Mach au courant de la philosophie positiviste : « Une attitude normative qui régit les modes d'emploi de termes tels que "savoir", "science", "connaissance" [...] ; la formulation de normes qui permettent d'établir une distinction entre l'objet d'une question possible et ce

qu'on ne peut pas raisonnablement poser cette question. » La formule comtienne qui limite toute connaissance positive à la description du comment des phénomènes convient à Mach. Dans *La mécanique*, tirant les leçons antimécanistes de la crise ouverte dans la physique par la formulation du second principe de la thermodynamique, Mach écrit : « Nous devons limiter notre science physique à l'expression des faits observables, sans construire d'hypothèses derrière ces faits, où plus rien n'existe qui puisse être conçu ou prouvé. » De même, Mach tient la prévision rationnelle pour caractéristique de la science, même s'il l'impute à un besoin ou désir de complétude assez étranger à la pensée de Comte. « Ce désir de complétude (*Vervollständigungstrieb*), écrit-il dans *l'Analyse des sensations*, ne surgit pas à l'occasion d'un seul fait observé ; il n'est pas non plus produit intentionnellement ; nous le trouvons au préalable en nous, sans que nous y soyons pour quelque chose. » Cette thèse, qui se donne pour étayée par des recherches originales en psychophysologie, se prolonge par celle – proprement machienne – de la science comme « économie de la pensée ». « Lorsque la chose est possible, écrit-il, des caractères communs à plusieurs phénomènes sont mis en relief une fois pour toutes. Pour des sciences qui ont atteint un plus haut degré de développement, les règles de reconstruction d'un grand nombre de faits peuvent être comprises dans une expression unique. » Il prend alors l'exemple des lois de la réfraction de la lumière. « La tendance à l'économie est ici évidente. Dans la nature, il n'existe pas de loi de la réfraction, mais rien que de multiples cas de ce phénomène. La loi de la réfraction est une méthode de reconstruction concise, résumée, faite à notre usage et en outre uniquement relative au côté géométrique du phénomène. » Mach tire cette conclusion générale : « La science elle-même peut donc être considérée comme un problème de minimum, qui consiste à exposer les faits aussi parfaitement que possible avec la moindre dépense intellectuelle. » La pensée de Mach doit cependant une part essentielle de son destin à un autre de ses aspects, celui qui a retenu l'attention de certains membres du Cercle de Vienne qui furent ses admirateurs, aussi bien que d'adversaires philosophiques (Husserl au début des *Recherches logiques*) ou politiques (Lénine dans *Matérialisme et empiriocriticisme*).

Cet aspect de son œuvre a consisté à donner un contenu « positif » à sa critique de l'opposition métaphysique de l'esprit et de la matière. « Il n'y a dans la nature aucune chose invariable. Une chose est une abstraction », énonce Mach dans les pages finales de *La mécanique*. Et il poursuit : « Un nom est un symbole pour un complexe d'éléments dont on ne considère pas la variation. Nous désignons le complexe entier par un mot, par un symbole unique, lorsque nous avons besoin de rappeler en une fois toutes les impressions qui le composent [...]. Les sensations ne sont pas des "symboles des choses" » – contrairement à ce que prétendait Hermann von Helmholtz (1821-1894).

« La "chose" est au contraire un symbole mental

pour un complexe de sensations d'une stabilité relative. » De là, en physique, son refus d'admettre l'existence des atomes, lequel le rangera aux côtés du chimiste « énergétiste » Wilhelm Ostwald (1853-1932). Mais la même notion « d'élément », et la référence qu'il avait d'abord faite à l'immatérialisme de l'évêque G. Berkeley (1685-1753), suscita la polémique de Lénine contre A. Bogdanov et les « disciples russes de Mach » qui pensaient pouvoir combiner marxisme et machisme. La même notion lui valut d'être taxé de psychologisme par le philosophe allemand Edmund Husserl (1859-1938), ainsi que par Ernst Cassirer (1874-1945). C'est elle au contraire qui retient l'attention de Ludwig Wittgenstein (1889-1951) sans doute lorsqu'il rédigea le *Tractatus logico-philosophicus*, et assurément Rudolf Carnap (1891-1970) quand il entreprit son *Aufbau* et prôna le physicalisme.

Ce qu'on appelle le « Manifeste » du Cercle de Vienne paraît sous le titre de *La conception scientifique du monde* en 1929, l'année même où Sigmund Freud publie *Malaise dans la civilisation* ; deux appréciations presque antithétiques de la situation. À l'optimisme progressiste et militant du premier texte répond le scepticisme inquiet du second. Et c'est ce dernier qui rétrospectivement nous paraît comporter le jugement le plus adéquat sur son temps. Issu de réflexions amorcées dès 1922, la « brochure jaune » nous semble souffrir d'un véritable décalage historique.

On a fait à juste titre remarquer que, à peine paru sur la scène publique, le Cercle qui se présentait comme un mouvement philosophique organisé à visée sociale dut se disperser. Ce groupe de scientifiques et de philosophes marginaux n'avait pas réussi à vaincre la résistance de l'Université malgré la nomination de l'un des leurs, Moritz Schlick, en 1922, à la chaire de « philosophie des sciences inductives » créée pour Ernst Mach auquel avait succédé Ludwig Boltzmann (1844-1906). Socio-démocrates pour la plupart, liés à la municipalité réformatrice dirigée depuis 1923 par K. Seitz, comportant plusieurs Juifs (O. Neurath, E. Zilsel, H. Hahn) parmi ses membres les plus importants, ils furent très vite la cible de militants antiprogressistes et antisémites. On les accusa de « judaïser la science ». Le « Cercle » fut officiellement interdit par les nazis en 1938.

On aurait pu croire qu'un tel mouvement, si profondément marqué par la conjoncture proprement viennoise, était ainsi voué à ne point laisser de traces dès lors qu'à Vienne même il commençait à se désintégrer dès 1930. Il n'en alla pas ainsi. Et il ne suffit pas d'évoquer l'exil de la plupart de ses membres importants aux États-Unis pour expliquer le profond impact qu'il a continué à avoir, jusqu'à aujourd'hui, sur le mode occidental de penser. Lorsque Herbert Feigl, en 1931, y publie avec son ami Blumberg un article (« Logical positivism, a new movement in European philosophy »), il suscite d'emblée un puissant intérêt. Carnap se trouve cependant alors à Prague.

Cet impact, cet écho, le Cercle le doit moins sans doute au contenu de sa doctrine – l'empirisme ou

positivisme logique – qui a d'ailleurs subi de multiples remaniements techniques au fil des années, que précisément au décalage historique que je signalais. Son optimisme rationaliste s'accordait à merveille avec l'Amérique d'après le krach de 1929. Il le doit aussi à la conception nouvelle de la philosophie qu'il propose, laquelle instaure un rapport déterminé entre la science et le langage. La philosophie connaît un « tournant » qui la fait accéder enfin à la modernité : philosophie des sciences, elle devient elle-même scientifique. Mais pour ce faire elle se transforme en tribunal du langage qu'elle juge « au nom de » la science.

L'acte d'accusation vise, à vrai dire, au premier chef non le langage mais « la métaphysique ». Carnap la définit comme « la soi-disant connaissance de l'essence qui transcende le domaine de la science inductive empiriquement fondée ». Sous cette caractérisation générale, c'est à la tradition philosophique allemande qu'il songe, de Hegel à Heidegger auquel il réserve ses flèches.

Quelle charge retient-on contre elle ? D'avoir enfreint la légalité logique qui préside à la formation des propositions « douées de sens » et vérifiables. Les énoncés de la « métaphysique » apparaissent comme des « pseudo-propositions » portant sur de « pseudo-objets » et donnant lieu à de « pseudo-problèmes ». Dans une proposition du type « La rose est rouge », le langage fonctionne à juste titre sur le mode « matériel » ; la proposition désigne une réalité extérieure observable. Mais une proposition du type « La rose est une chose », qui se présente comme relevant du même mode matériel, n'en a que l'apparence ; « chose » n'est pas un observable au même titre que « rouge ». Dans une telle proposition, le langage fonctionne sur le mode formel. La proposition ne porte en réalité que sur une règle syntaxique déterminant l'usage du mot « rose ». Il convient donc de « réduire » la proposition « la rose est une chose » à celle-ci : « Le mot rose est le symbole d'une chose. » La question métaphysique « qu'est-ce qu'une chose ? » repose ainsi sur une confusion des deux usages et donne lieu à une série de « pseudo » ou « simili » propositions. Ces « pseudo-propositions » freinent le progrès des connaissances scientifiques, comme on l'a vu avec la notion newtonienne de « masse » en physique. Dans l'ordre des « sciences de l'esprit », elles justifient des ferveurs politiquement périlleuses par exemple en invoquant « l'âme d'un peuple » sur le mode matériel. Le verdict est simple : il faut « éliminer la métaphysique » du champ de la connaissance humaine.

La perspective positive de cette élimination c'est de réaliser « l'unité de la science ». Ce mouvement d'unification – celui de la « science unifiée » – concerne au premier chef les « sciences de la nature », et tout spécialement les sciences biologiques appelées à se débarrasser de leurs chimères « vitalistes » (Driesch), lesquelles ne sont qu'autant de survivances en elle du mode métaphysique de penser. C'est la physique qui sert ici de référence et de modèle non dans ses œuvres vives contemporaines, mais parce qu'elle est la

« science du réel », laquelle met en œuvre un ensemble coordonné de propositions douées de sens et susceptibles d'être vérifiées par les données de l'observation. Carnap forge le mot de « physicalisme » pour qualifier cette prise de position.

N'est « scientifique » dans les sciences de la nature qu'une proposition logiquement douée de sens et vérifiable ; n'est vérifiable que ce qui est observable.

Mais au-delà des sciences de la nature, il s'agit d'aligner sur le même modèle ces sciences que l'on appelait alors dans le monde germanique les « sciences de l'esprit » (*Geisteswissenschaft*) et dont Dilthey ou Rickert avaient prétendu qu'elles relevaient d'un autre mode de connaissance (la « compréhension ») que les premières (l'« explication »). L'ambition du Cercle de Vienne était de combler cet abîme que les institutions universitaires avaient consacré au bénéfice des secondes. Question stratégique sur cette voie : celle de la psychologie. Le Cercle s'en prend vigoureusement à la tradition « introspective », et prend parti en faveur du « behaviorisme » naissant, lequel répond à la conception « physicaliste » de la science. De là également les positions prises par Neurath en sociologie et en économie politique...

Le Cercle de Vienne se flatte ainsi de pouvoir réaliser l'unité de la science. Elle s'effectuera sur la base d'une unification du langage des diverses disciplines comme ensemble d'énoncés logiquement mis à l'épreuve et « correspondant » à des observations sensibles. Un tel langage apparaît comme une « langue parfaite » parce qu'il est intégralement doué de sens et parce que toute équivoque en a été chassée. Contrairement donc à ce qu'avaient pensé les philosophes soumis aux préjugés théologiques, ladite langue parfaite n'était point une langue originaire oubliée (hébreu ou sanskrit), elle se trouvait devant nous. Ce langage pouvait également être tenu pour un « langage universel » susceptible d'abolir les frontières nationales et d'assurer la concorde entre les peuples par une communication sans parasite. Carnap en sa jeunesse se passionnait pour l'*esperanto*. Trois questions distinctes qui hantaient les penseurs depuis des siècles se trouvaient ainsi résolues d'un seul coup.

Si le sens politique de cette solution dans l'Europe des années 1930 apparaissait clairement antinationaliste, progressiste et pacifiste, ses bases philosophiques allaient lui permettre de jouer par la suite un tout autre rôle aux États-Unis et dans le monde contemporain au prix d'une certaine dérive de son sens.

La portée immédiate de cette dérive apparaît clairement à propos des « sciences de l'esprit ». On a fait souvent remarquer que, malgré les efforts de Neurath, cette partie du programme du Cercle était restée étrangement... programmatique et qu'elle se résumait à une série d'annonces. Mais c'est paradoxalement peut-être à cette vacuité qu'on peut imputer une part essentielle de son succès. Aux États-Unis, l'empirisme logique rencontre non les « sciences de l'esprit » allemandes, mais des « sciences sociales » en train de se constituer comme techniques sociales d'adaptation. Les philosophes vont

trouver en cette rencontre leur vocation professionnelle : fournir le cadre du langage commun qui permettra à ces techniques de bénéficier d'un transfert d'autorité scientifique en provenance des sciences de la nature. La finalité politique de ce transfert n'est pas moins claire. Par un formalisme adéquat il s'agit de participer au contrôle de la planification de l'action et à la rationalisation des décisions, leur apporter une garantie d'efficacité (*efficiency*).

Cette démarche laisse dans l'ombre une question qui était restée ouverte à Vienne. La vie des êtres humains en société suppose qu'ils se réfèrent à des règles, des normes et des valeurs dont la « prise » sur les individus ne saurait être identifiée au simple constat d'une vérité de fait. Une science des comportements, fondée sur l'observation, ne peut rendre compte de l'éthique (le partage du juste et de l'injuste) à laquelle ils se réfèrent. Sur la question de l'éthique, le positivisme logique reste court, malgré les tentatives d'élaborer une logique déontique.

Mais, sans le dire explicitement, l'empirisme logique a contribué à installer « la science », supposée d'efficacité, en lieu et place d'autorité absolue, en concurrence avec Dieu, ou la Nature qui jusqu'alors avaient rempli cet office. Neurath et ses amis avaient raison : cette opération n'allait pas sans l'instauration de nouvelles « formes de vie », lesquelles se trouveront de plus en plus uniformisées. Ainsi s'est constitué le « scientisme » américain. Il ne saurait être confondu avec celui qu'avait secrété la pensée laïque et anticléricale de la III^e République en France dans la tradition inaugurée par Émile Littré. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, ce scientisme a conquis la plus grande part du monde occidental. Les succès technologiques, militaires et civils, ne suffisent pas à expliquer la rapidité et la facilité de cette conquête qui s'est effectuée, silencieusement, par l'entremise des sciences sociales et humaines.

Faisons un dernier retour à notre début. 1929, c'est aussi la date de la publication par Martin Heidegger de *Qu'est-ce que la métaphysique ?*, le texte même auquel s'en prendra Carnap en 1931 dans son article intitulé « Le dépassement de la métaphysique par l'analyse logique du langage ». Heidegger met lui aussi en question le mode dominant de philosopher en Allemagne, les « théories de la connaissance » de style kantien comme les « conceptions du monde » d'ascendance romantique. Le « dépassement » de la métaphysique s'y effectue au prix d'un pas en deçà du mode représentatif de concevoir les rapports de la pensée à l'être, et du mode ontologique de résoudre la question de l'être.

Nul n'ignore aujourd'hui ce qu'il a pu y avoir politiquement de périlleux dans cette sortie. En ce sens, on peut dire que Carnap ne s'était pas trompé de cible, même si son attaque paraît aujourd'hui en porte à faux.

La question qui se pose à nous peut se résumer ainsi : pouvons-nous inventer une Europe qui ne soit ni celle des nationalismes et des racismes ni celle qui, faisant retour de son exil, a contribué au triomphe d'un mode de pensée qui menace d'unification (on dit aujourd'hui

« globalisation ») l'ensemble des cultures de la planète ?

Si la métaphysique est la cible des empiristes logiques, c'est parce qu'elle contrevient subrepticement, insidieusement, aux règles de la « syntaxe logique du langage de la science » ; lesquelles règles, dûment explicitées, permettraient de construire l'ensemble de toutes les propositions « douées de sens », avant que le critère de l'observation ne permette de délimiter celles des propositions qui ont valeur cognitive.

Un point mérite d'être relevé, plus qu'on ne l'a fait jusqu'ici, dans ce procès fait à la « métaphysique ». La violence de l'attaque ne tient pas tant à ce qu'elle viole les règles logiques de la formation des énoncés vérifiables. Mais à ce que ses énoncés, comme ceux de la poésie, peuvent avoir une valeur « émotive ». Carnap écrit : à ce titre, ils ont une fonction « expressive ». Ils expriment le « sentiment de la vie », du cosmique, de l'infini, de l'éternité, de l'au-delà.

Qu'on le veuille ou non, le programme d'unification de la science par un langage strictement désignant se donne pour tâche non seulement d'éliminer la part de l'imaginaire qui fait corps avec la recherche scientifique, et la réduire à un calcul sur les faits observés dans les sciences de la nature. Mais, dès lors que ce programme s'étend aussi aux sciences humaines (psychologie) et sociales (sociologie, économie...), il vise à bâtir la vie en société en l'expurgant également de toute dimension affective. Ce programme est bien celui d'une « rationalisation intégrale de l'existence », laquelle peut au demeurant s'accorder avec la reconnaissance d'élan affectifs, mais alors seulement, au titre privé de convictions intérieures individuelles non verbalisables...

Ne touchons-nous pas ici du doigt l'un des motifs les plus profonds du nouveau « malaise dans la civilisation » qui s'étend à toute la planète ?

Le « second » Wittgenstein, celui qui écrira les *Investigations philosophiques*, a fait très tôt remarquer le point le plus fragile du programme du Cercle : avoir posé au principe de sa démarche... un cercle. La « nouvelle logique », branche des mathématiques issue des travaux de Bertrand Russell (1872-1970), Gottlob Frege (1848-1925) et Ludwig Wittgenstein lui-même sur les paradoxes affectant la théorie des ensembles, apparaît, en tant que science, susceptible de garantir le caractère scientifique de tout discours...

De ce cercle, il n'y avait que deux moyens de sortir. On pouvait chercher par tous les moyens à fonder la validité de cette logique en nature. Ce qui explique l'intérêt stratégique porté par Carnap à la psychologie et la voie très tôt indiquée par Herbert Feigl visant à lui trouver une base neurologique. Les actuelles « sciences cognitives » peuvent ainsi être tenues pour une part comme les héritières du programme viennois de la « science unifiée ». On pouvait aussi s'engager sur une voie « conventionnaliste » – celle du sociologue et économiste Otto Neurath ; on y trouve une part de l'ascendance de l'actuelle sociologie des sciences.

Reste une autre solution : refuser le cercle. Mais alors il faut quitter Vienne, pour reconnaître la présence effective de l'imaginaire dans la pensée scientifique, et nous interroger sur ses liens avec le langage. Ce que fit Gaston Bachelard quelques années plus tard. Admettre qu'à ce titre les « jeux de langage » façonnent notre mode de nous rapporter à notre monde. Ce que fit Wittgenstein à la même époque. Redécouvrir que la philosophie est bel et bien cette activité d'argumentation qui permet, au besoin en tordant les mots et en usant de métaphores, de conférer un sens pour le tout de la vie humaine à cette inventivité qui caractérise la pensée scientifique. Telle est notre tâche.

► ARBOUSSE-BASTIDE P., *La Doctrine de l'éducation universelle dans la philosophie d'A. Comte*, Paris, PUF, 2 t., 1957. — CARNAP R., *Der logische Aufbau der Welt*, Berlin, Weltkreis, 1928. — COMTE A., *Œuvres*, Paris, Anthropos, 12 vol., 1968. — DESCARTES R., *Œuvres*, Paris, Vrin, 1964-1974 (rééd. de l'éd. Adam & Tannery des *Œuvres de Descartes*, 12 vol., 1897-1913). — GOUGHIER H., *La Jeunesse d'A. Comte et la formation du positivisme*, Paris, Vrin, 3 t., 1933, 1936, 1941. — GRILLE D., *Lenins Rivale : Bogdanov und seine Philosophie*, Abhandlungen des Bundesinstituts für estwissenschaftliche und internationale Studien, vol. XII, Cologne, 1966. — JANIK A. et TOULMIN S., *Wittgenstein's Vienna*, New York, 1973 (trad. fr. *Wittgenstein, Vienne et la modernité*, Paris, PUF, 1978). — KOLAKOWSKI L., *La philosophie positiviste* (1966), trad. fr., Paris, Denoël, 1976. — LECOURT D., *L'ordre et les jeux*, Paris, Grasset, 1981 ; *La philosophie des sciences*, 2001, 3^e rééd., Paris, PUF/Que sais-je ?, 2005. — LÉNINE, *Œuvres complètes*, Moscou, Inst. Marx-Engels-Lénine. — LITTRÉ E., *Auguste Comte et la philosophie positive*, 1863. — MACH E., *La mécanique* (1883), Paris, Hermann, 1904. — MACHÉREY P., *La philosophie et les sciences*, Paris, PUF, 1989. — NEURATH O., HAHN H. & CARNAP R., « *Wissenschaftliche Weltauffassung* », in NEURATH O., *Empiricism and Sociology*, Dordrecht, « The Vienna Circle Collection », vol. 1, 1973. — OSTWALD W., *L'énergie*, trad. fr., Paris, Alcan, 4^e éd. 1913. — SOULEZ A. dir., *Manifeste du cercle de Vienne et autres écrits*, Paris, PUF, 1985. — WITTGENSTEIN L., *Tractatus logico-philosophicus* (1921, préf. Russell), Londres, 1922 (trad. fr. Klossowski, Paris, Gallimard, 1961 ; nouv. trad. Granger, Paris, Gallimard, 1993).

Dominique LECOURT

→ Carnap ; Cercle de Vienne ; Comte ; Crise de la physique moderne ; Découverte ; Épistémologie ; Expérience ; Fait ; Induction ; Loi de la nature ; Nécessité ; Phénoménisme ; Réductionnisme ; Scientisme ; Wittgenstein et le positivisme logique.

POSITIVISME LOGIQUE → Cercle de Vienne ; Wittgenstein et le positivisme logique

PRAGMATISME

Le pragmatisme est une tendance philosophique qui dépasse les limites du mouvement qui en fut la première expression, et se découvre constamment sous des formes nouvelles. Pour en bien comprendre la nature, et éviter les malentendus et simplifications souvent possibles à son sujet, il importe de revenir dans un

premier temps à ses origines historiques. Le pragmatisme est en effet l'un des premiers courants — après le transcendantalisme d'Emerson et Thoreau — qui trouve ses origines aux États-Unis et soit enraciné dans la culture américaine, bien qu'évidemment il ne soit pas resté à l'écart de l'influence européenne. C'est cette origine spécifique qui a longtemps fait mépriser le pragmatisme — pensée de la pratique — parce que représentant, comme disait Russell par exemple, « l'esprit du commerce » en philosophie. Par ailleurs, la montée en puissance de la pensée analytique en Amérique à partir des années 1930 a, semble-t-il, accompagné et accentué le déclin du pragmatisme, bien qu'elle en ait également intégré certains éléments, grâce en particulier aux contacts établis entre les derniers rejetons du pragmatisme (C.I. Lewis, Ch. Morris) et les premiers émigrants de l'empirisme logique (Carnap, Neurath). Il n'est alors pas étonnant que la mise en cause américaine, depuis les années 1950-1960, du modèle néopositiviste (par des penseurs comme Quine, puis Putnam et Rorty), se soit associée à un renouveau du pragmatisme, sous une version transformée, et peut-être parfois trop unifiée.

Les sources du pragmatisme

On a parfois tendance à réunir sous la bannière du pragmatisme des pensées assez différentes. Le pragmatisme et son nom même furent inventés par Charles Sanders Peirce (1839-1914) qui les présenta ainsi dans *What Pragmatism is* : « La théorie selon laquelle une conception, c'est-à-dire la portée rationnelle d'un mot ou d'une expression, réside uniquement dans les effets concevables qu'elle est susceptible d'avoir sur la conduite de la vie. Si bien que, dans la mesure où il n'est manifestement rien qui, pouvant avoir un effet direct sur la conduite, pourrait ne pas résulter de l'expérience, on trouvera dans la possibilité de définir avec exactitude l'intégralité du phénomène expérimental concevable, susceptible d'être impliqué par l'affirmation ou la négation d'un concept, une définition complète de ce concept, sans qu'il y ait absolument rien de plus en lui. » La référence grecque, le recours kantien à la pratique, les concepts émersoniens de « conduite de la vie » et d'« expérience », se combinent, dans cette définition du pragmatisme, à une référence constante aux méthodes de la science moderne. La définition se fonde en effet sur un expérimentalisme évolutionniste : la pensée rationnelle ne se définit qu'à partir des effets observables de l'expérience, et en fonction des processus d'adaptation des organismes vivants. Peirce fut en effet influencé par Darwin et la pensée évolutionniste. Mais l'idée centrale du pragmatisme, la définition de la pensée par ses effets sensibles, est exprimée par sa fameuse maxime, énoncée dans « Comment rendre nos idées claires » : « Considérer quels sont les effets pratiques que nous pensons pouvoir être produits par l'objet de notre conception. La conception de tous ces effets est la conception complète de l'objet. »

Ce qui définit le contenu d'une croyance — concept central chez Peirce — ce sont ses effets, pas ses qualités propres. Il faut remarquer que Peirce s'est d'emblée prémuni contre la banalisation de sa théorie en simple « primat de la pratique », tendance qu'il crut, à tort, à déceler chez James. Dans « Ce que veut dire le pragmatisme », William James (1842-1910) présentait ainsi sa doctrine : « Toute la fonction de la philosophie devrait être de découvrir quelle différence précise cela fera pour vous et pour moi, à des instants précis de notre vie, si telle formule verbale ou telle autre est la vraie. » En réalité la philosophie de James, pour être réellement comprise, doit être conçue plutôt comme un empirisme radical que dans le cadre du pragmatisme. Peirce, pour bien distinguer sa doctrine, préféra ensuite lui donner le nom de pragmatisme, « suffisamment laid pour ne pas être kidnappé », et en préciser les contours et les objectifs : critique de la métaphysique traditionnelle et de la psychologie, fidélité à la science, et surtout réalisme. Reste à savoir quel contenu donner à ce terme, qui sera ensuite largement repris dans les discussions contemporaines des héritiers du pragmatisme.

Peirce opère en effet une redéfinition radicale de la vérité en la concevant dans son rapport à l'enquête, la recherche. La vérité n'est ni une donnée ni une condition *a priori* de la connaissance, elle est un résultat. Mais une telle position met en cause la définition de la vérité comme correspondance à la réalité, sans pour autant qu'une simple cohérence apparaisse comme critère satisfaisant. C'est dans le pragmatisme américain qu'apparaît sous une première forme la pluralité des positions sur la vérité qui vont se développer, au XX^e s., chez des penseurs américains comme Quine, Goodman, Davidson et Rorty. Peirce propose, contre la vérité-copie, un réalisme scientifique qui annonce le réalisme de Popper et le réalisme interne de Putnam : le vrai est ce vers quoi tend la connaissance, il est donc supposé, par la démarche du scientifique, qui le contraint en quelque sorte à adopter une métaphysique réaliste. Ici se situe le point de divergence entre James et Peirce.

James en effet adopte un pluralisme fondé sur son « empirisme radical », et rejette ainsi toute métaphysique de la vérité, sans pour autant, contrairement à ce qu'il ont affirmé ses critiques, définir le vrai par ce qui est avantageux ou commode. « Pour le pragmatiste pluraliste, la vérité prend naissance, et grandit, à l'intérieur même des données de l'expérience finie. » C'est en particulier John Dewey (1859-1952), principal maître à penser de Rorty, qui a suscité une telle interprétation : pour Dewey, le pragmatisme doit permettre de déplacer la notion de vérité vers celle d'« acceptabilité garantie », la garantie étant apportée par les procédures de l'enquête et les méthodes de la communauté scientifique. Comme le montre à l'époque le débat entre Russell et Dewey, la question est bien celle de l'empirisme et de ses conséquences. Qu'on ne puisse compter que sur l'expérience ne signifie pas qu'il faille adopter une vision relativiste, et Putnam s'emploie depuis quelques années à clarifier ce point à propos de

James, qui n'a jamais voulu dire que « tout ce qui sert des intérêts pratiques est vrai ».

On voit la pertinence contemporaine de ces thèmes : Putnam essaie de rompre, par son interprétation du pragmatisme, l'alternative du réalisme métaphysique et de l'antiréalisme relativiste. Un tel dilemme résulte aussi de l'intégration du pragmatisme à l'empirisme logique ; on aborde ici la question de l'héritage du pragmatisme dans la pensée américaine.

Le pragmatisme et l'empirisme logique

L'immigration en Amérique, à partir des années 1930, des figures marquantes de l'empirisme viennois (Carnap, Reichenbach, Hempel) constitue paradoxalement une date importante dans l'histoire du pragmatisme. À cette époque la philosophie dominante et officielle est celle de Dewey, et elle fut rapidement supplantée dans le milieu philosophique américain par le néopositivisme. On peut hésiter entre deux thèses, une première selon laquelle l'empirisme logique aurait supplanté un pragmatisme moribond et banalisé, une autre selon laquelle le mouvement viennois aurait pu instaurer sa domination grâce à certaines affinités avec la théorie dominante dans sa terre d'accueil. La position de Quine (né en 1908) représente parfaitement cette hésitation.

Quine fut le principal artisan de l'implantation américaine des membres du Cercle de Vienne, et a toujours affirmé, contre la tradition du pragmatisme, celle de l'empirisme de Hume, de Carnap et de Neurath. Par ailleurs, comme l'a rappelé Putnam après Quine, le pragmatisme, au moins dans sa version tardive, est porteur d'une épistémologie peu élaborée et assez confuse, s'étant progressivement détourné, avec Dewey, des questions cognitives vers le domaine social et politique. Pourtant, il existe des références au pragmatisme chez Quine, notamment dans le texte capital qui marquera (au même moment, à un an près, que la disparition du dernier représentant du pragmatisme, Dewey) le début de la contestation interne du positivisme logique : « Les deux dogmes de l'empirisme ». Quine, en récusant les fondements de la doctrine carnapienne, la distinction entre énoncés analytiques et synthétiques et la réductionnisme, a recours à une argumentation holiste inspirée de Duhem, mais qui a des sources, de son propre aveu, dans une forme de pragmatisme : une expérience (négative ou positive) n'a pas d'incidence directe et déterminée sur la théorie, car « la science affronte l'expérience comme un corps organisé ». Il y a ainsi « sous-détermination des théories par l'expérience », et le choix des modifications à apporter à une théorie en cas d'expérience négative est affaire de commodité. De même pour le choix d'une ontologie (et sur ce point, Quine conteste d'ailleurs radicalement les thèses métaphysiques de Peirce) : le « mythe des objets physiques » permet d'« injecter une structure maniable dans l'expérience ». Quine revendique ainsi, à la fin des « deux dogmes », un pragmatisme plus conséquent que celui d'un C.I. Lewis, et veut

concilier pragmatisme et empirisme : « Tout homme reçoit un héritage scientifique et un flux continu de stimulation sensorielle ; et les considérations qui le guident pour ajuster son héritage scientifique à ses incitations sensorielles sont pragmatiques, lorsqu'elles sont rationnelles. » On constate qu'il s'agit ici d'une forme assez minimale de pragmatisme, qu'on appellera, en épistémologie où elle se banalisera à partir des années 1950, instrumentalisme : on en retrouve des traces dans les différentes positions de Kuhn, Feyerabend et Lakatos.

L'héritage du pragmatisme se superpose alors à celui de Duhem. On le retrouve, sous des formes différentes, dans des épistémologies constructivistes comme celles de Van Fraassen ou de Cartwright. Sur ce point les versions épistémologiques et contemporaines du pragmatisme s'éloignent visiblement du réalisme qu'on a classiquement attribué à Peirce. Mais un tel renoncement n'est pas sans conséquences. En relâchant le lien entre théorie et expérience Quine et les postquiniens ont dû renoncer au réalisme pur et dur, dit « externe ». Mais Quine y parvenait par une radicalisation de l'empirisme (en ce sens, il est plus proche de James qu'il ne le reconnaît) ; tandis que les postquiniens, de Davidson à Rorty, vont vouloir abandonner, avec le réalisme, l'empirisme même.

Le pragmatisme aujourd'hui

Davidson propose ainsi, dans « De l'idée véritable de schème conceptuel » d'abandonner « le troisième dogme », le dualisme du schème et du contenu qui selon lui conduit fatalement au relativisme : de manière fort conséquente, il reconnaît que ce serait la fin de l'empirisme. Les postquiniens vont suivre, de manières très diverses, ce renoncement à l'empirisme : Goodman adopte un pluralisme ontologique et rejette la notion de vérité unique au profit des « versions du monde », Davidson accuse l'empirisme et la dualité schème/expérience d'être à la source du relativisme, Putnam adopte un « réalisme interne », puis un « réalisme à visage humain », qui, comme le « robuste réalisme » de Quine, demeure immanent à la science.

Le pragmatisme, revendiqué à divers degrés par tous les acteurs du débat actuel sur le réalisme, a permis de rationaliser et d'unifier les différentes critiques de l'empirisme logique, sans pour autant être réellement à leur source. Il ne faut pas en effet surévaluer ce que Rorty appelle les « conséquences du pragmatisme ». Rorty considère en effet que tout le débat philosophique américain contemporain est le résultat du pragmatisme, ce dernier étant la philosophie adaptée aux mutations de ce siècle après la décomposition de la philosophie analytique. Par ailleurs, les implications éthiques et politiques du pragmatisme lui permettent, outre d'évacuer le reproche de relativisme, d'avoir une plus grande pertinence par rapport à la culture américaine, voire occidentale, que l'empirisme. On peut être sceptique quant au projet d'une « conversation universelle » qui serait la généralisation, revendiquée par

Rorty, d'un « libéralisme bourgeois postmoderne », issu du pragmatisme de Dewey, et quant à l'épistémologie de Rorty, qui, se résumant à un vague anti-fondationnalisme, n'a plus rien à voir avec celle du pragmatisme original et notamment de Peirce et James. De ce point de vue, on peut considérer que l'héritage épistémologique présent du pragmatisme se trouve plutôt chez des penseurs comme Hacking ou Van Fraassen que dans le relativisme de Rorty. Mais au-delà de ces critiques, on peut surtout regretter, dans le succès présent du néopragmatisme, une lecture erronée et simplifiante de l'histoire de la pensée américaine et de celle du pragmatisme même : Rorty, en réduisant le pragmatisme à un incertain recours à la pratique et à l'« expérience » – en un sens dépourvu de tout contenu précis et qui n'a plus rien à voir avec l'empirisme – méconnaît à la fois la théorie de la connaissance de Peirce, l'empirisme de James et le naturalisme de Dewey. De surcroît, comme l'a noté Cavell, en reliant toute l'histoire américaine en fonction de cette version atténuée du pragmatisme, et en faisant par exemple d'Emerson un protopragmatiste et de Wittgenstein un néopragmatiste, il refoule à la fois les origines de la philosophie américaine (avec la pensée radicale de l'expérience que l'on trouve chez Emerson et Thoreau) et la vérité de la philosophie wittgensteinienne, qui ne se réduit pas, selon Cavell, à un recours conservateur à la pratique, à « ce que nous faisons », contre la connaissance.

Ainsi s'ouvre entre Cavell, Putnam et Rorty un nouveau débat sur le pragmatisme, dont les termes détermineront sans doute notre vision de l'histoire de la philosophie américaine. Au-delà du mythe d'une philosophie universelle inventé par les logiciens et les disciples du Cercle de Vienne, et du mythe inventé par Rorty d'une pensée américaine et occidentale unifiée autour du pragmatisme, il reste à penser les héritages, différences et refoulements successifs qui ont constitué l'histoire de la philosophie américaine et en tissent les débats épistémologiques les plus contemporains.

► CAVELL S., *Une nouvelle Amérique encore inapprochable* (1989), trad. fr. S. Laugier, Combas, L'Éclat, 1991. – DAVIDSON D., « De la véritable idée de schème conceptuel », in RAJCHMAN J. & WEST C., *op. cit.* – DEWEY J., *Logic, the theory of inquiry* (1938), trad. fr. G. Deledalle, *Logique, la théorie de l'enquête*, Paris, PUF, 1993. – GOODMAN N., *Ways of Worldmaking* (1978), trad. fr. M.D. Popelard, *Manières de faire des mondes*, Nîmes, J. Chambon, 1992. – HACKING I., *Representing and intervening* (1983), trad. fr. B. Ducrest, *Conçoit et expérimente*, Paris, Christian Bourgois, 1989. – JAMES W., *Pragmatism* (1911), trad. fr. *Le pragmatisme*, Paris, Flammarion, 1968. – MEYER M. éd., *La philosophie anglo-saxonne*, Paris, PUF, 1994. – PEIRCE C.S., *Pragmatism and pragmatism* (1934), *Science and Philosophy* (1958), in *Collected Papers*, vol. 5, vol. 7, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press. – PUTNAM H., *Realism with a human face*, éd. J. Conant, 1990 (trad. fr. C. Tiercelin, Paris, Le Seuil, 1994) ; « Après l'empirisme », 1991, trad. fr. in RAJCHMAN J. & WEST, *op. cit.*, p. 83-96. – QUINE W.V., « Two dogmas of empiricism » (1951), trad. fr. « Les deux dogmes de l'empirisme », in JACOB P., *De Vienne à Cambridge*, Paris, Gallimard, 1980. – RAJCHMAN J. & WEST C., *Post-analytical philosophy* (1985), trad. fr. A. Lyotard-May-

La pensée américaine contemporaine, Paris, PUF, 1991. – RORTY R., *Consequences of pragmatism* (1982), trad. fr. J.P. Cometti, *Conséquences du pragmatisme*, Paris, Le Seuil, 1990. – RUSSELL B., *Essais philosophiques*, trad. fr. F. Clementz & J.P. Cometti, Paris, PUF, 1997.

Sandra LAUGIER

– Cercle de Vienne ; Expérience ; Induction ; Peirce ; Putnam ; Réalisme ; Vérification ; Vérité.

PRÉCAUTION

Le thème de la précaution est un thème d'introduction récente, mais rapide : la précaution est aujourd'hui reconnue comme un principe général d'action par les lois nationales, européennes et internationales. Ce succès est lié à celui du thème du développement durable, qui a apporté toute une famille de nouveaux concepts, dont celui de précaution. La viabilisation du développement et la prise en compte des générations futures passent par une stratégie d'évitement des risques non finis, extrêmes ou irréversibles, stratégie consacrée dans le thème de la précaution.

La réflexion sur la précaution dépasse aujourd'hui le cadre initial des problèmes d'environnement. Les problèmes récents des effets pathogènes de la pollution de l'air, de dissémination de produits contaminés, et de l'épizootie de la « vache folle » indiquent l'émergence de la précaution pour le domaine de la santé. La portée générale de la définition (§ 1), de la genèse (§ 2) et des pratiques (§ 3) de précaution la place parmi les principes directeurs de l'activité scientifique, au même titre que le respect de la dignité humaine et des droits de l'homme.

Définition

La précaution a reçu plusieurs définitions légales et pratiques. Ainsi, en France, suite à l'énoncé du principe de précaution au sommet de Rio, la loi Barnier du 2 février 1995 formule le principe de précaution comme le principe « selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ». Des acteurs économiques, comme un ensemble de compagnies d'assurances réuni à Oslo en 1995, reconnaissent par le principe de précaution qu'« il n'est pas possible de quantifier et de réparer tous les impacts et pertes de façon purement financière. La recherche est nécessaire pour réduire l'incertitude, mais ne peut éliminer entièrement ». La précaution est l'évitement d'irréversibilités, d'erreurs aux conséquences graves, de sentiers de développement en impasse. En absence de certitude, la possibilité d'un extrême ou une irréversibilité non souhaitable l'active de façon proportionnée. La précaution comporte trois ingrédients

nécessaires : l'incertitude, l'action diligente, les évaluations des dommages potentiels et des conséquences des dispositions à prendre. L'absence d'un de ces trois éléments conduit à des dispositions contraires au principe de précaution, comme l'apport de la certitude au consommateur, l'inaction et l'attentisme, ou un simple contrôle administratif.

Incertain. – La précaution requiert un contexte d'incertitude. Elle se différencie en cela de la prévention, au contexte fortement objectivé avec des dommages et des impacts quantifiés et maîtrisables par des procédures connues. L'incertitude ouvre l'espace public, appelle le débat. Aussi, la précaution ne vise pas à supprimer l'incertitude par une communication habile, une gestion de crise, une extension de garanties formelles. La précaution, dans ses formulations juridiques, est un affaiblissement des exigences de la preuve et non le renversement des charges de la preuve, qui demanderait d'apporter la certitude d'innocuité d'un produit. La précaution ne cherche pas la certitude à tout prix, le risque zéro, ou la restauration d'un cadre déterministe comme préalable à l'action.

Action. – La précaution est une manifestation de prudence. Seule compte l'action à la source potentielle d'impacts, et non la conscience, la disposition prudente d'esprit. La précaution veut éviter un retard de l'action sur la connaissance et appelle des décisions séquentielles au fur et à mesure qu'évoluent les connaissances. La précaution s'oppose aux moyens dilatoires, « la dénégation du risque, le refus d'entendre les paroles venant de l'extérieur, la surdité aux indices précurseurs, l'instrumentalisation des incertitudes et controverses scientifiques à des fins de paralysie de l'action publique, la transformation d'hypothèses arbitraires ou seulement partiellement fondées en dogmes dépositaires de l'honneur d'une corporation » (O. Godard, *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, 1997, p. 32).

Évaluations. – La précaution ne peut s'appuyer sur une simple et complète traduction des risques en termes financiers. Dans ce contexte d'incertitude et d'incomplétude, les évaluations économiques des scénarios possibles sont d'autant plus nécessaires pour introduire les arbitrages qui éviteront la dérive vers l'irréversible. Il est, par exemple, difficile de se déterminer sur les « effets » du réchauffement climatique et d'avoir un raisonnement fiable qui parte de ces « effets ». Mais les « causes » sont accessibles par des actions qui peuvent être évaluées à travers les scénarios possibles.

Genèse

Il est commun de tracer une histoire de la prudence en omettant la place de la réflexion scientifique. Or, il nous semble qu'au contraire les notions de prudence et de précaution ont été profondément remaniées par

l'existence et le développement des sciences. Le scrupule et la précaution devant l'erreur soupçonnée sont constitutives de la rigueur scientifique (F. Rostand, *Souci d'exactitude et scrupules des mathématiciens*, Paris, 1960). Musil plaiderait pour l'extension de cette exigence scrupuleuse à la société. N'est-ce pas ce que réalise la précaution ?

La précaution dans l'histoire de la prudence en économie. – Le thème de la précaution est discuté à deux moments dans l'histoire de la prudence économique, lors d'une polémique entre Comte et Mill, et lors de la fixation du cadre de la décision dans l'incertain par Keynes. Mill s'aperçoit des conséquences irréversibles qu'entraînent les conceptions de Comte pour la nature. Comte recommandait « d'extirper toutes les plantes et animaux inutiles à l'homme », alors que, répliquait Mill, « ce qui est une fois accompli, en matière d'extirpation des espèces, ne peut jamais se réparer » (J.S. Mill, *Auguste Comte et le positivisme*, trad. Clemenceau, 1890, p. 182). Cependant, Mill ne peut formuler de précaution. À cela, deux raisons : il conçoit l'action uniquement sur une base de certitude, et défend une souveraineté sourcilieuse des individus à travers une conception pénale de la responsabilité. À ce premier rendez-vous manqué entre l'économie et la précaution, succède un deuxième. « Dans le long terme, nous sommes tous morts », la célèbre formule de Keynes indique qu'alors la pensée économique introduit la prise en compte de l'incertitude qui avait manqué à Mill, mais au prix du sacrifice formel des horizons temporels lointains. Une rationalité économique déterministe a empêché Mill de formuler une précaution. Keynes lève l'obstacle de ce cadre déterministe, mais prône une attitude à l'opposé de la précaution et du souci des générations à venir.

Les éthiques de responsabilité. – Elles accompagnent les efforts des savants pour limiter la prolifération des armes chimiques et nucléaires, à partir du constat « qu'une guerre mondiale n'aboutit plus à la victoire ou à la défaite, mais à la ruine générale » (Max Born, *La responsabilité du savant dans le monde moderne*, Paris, 1967, p. 70). « Je crois que la seule chose qui ait un sens, c'est le renoncement général à toute violence, quelle que soit sa nature, avec un désarmement par paliers successifs » (*ibid.*, p. 45). Ces prises de position sont déterminantes par plusieurs aspects. Elles initient une prise en charge de risques extrêmes par la société internationale. Elles fournissent des modèles de négociation et de régulation globale dans lesquels va être formulé le principe de précaution. Elles ont les limites d'une éthique : certitude de principes scientifiques et moraux, appel à la conscience, discours de conseiller au souverain, régulation par des souhaits exogènes – la paix, le renoncement à la violence – de technologies déjà existantes. Tous ces points séparent les éthiques de responsabilité de la précaution.

Les contaminants. – Les problèmes de dissémination de radionucléides ont été fondateurs. L'effet stochastique du radionucléide apporte un relâchement du lien causal, qui sera entériné dans le principe de précaution. Les questions de pollution de l'air et d'effets à long terme d'une contamination chimique vont ensuite ouvrir le concept de contaminant vers la multiplicité des constituants de l'environnement. Là où l'agent infectieux n'était que schéma unique, le contaminant propose une pluralité de modèles. Diversités de la nature des éléments toxiques, des modes d'actions, des sites et des organismes attaqués, possibilité d'effets combinés : le concept de contaminant élargit de tous côtés un schéma infectieux déterministe. Cet élargissement est le socle épistémologique de la précaution. Sur cette base, le droit interne allemand énonce un principe de précaution dès 1970.

La conférence de Londres. – La seconde conférence sur la mer du Nord à Londres exprime pour la première fois le principe de précaution à une échelle globale, en 1987. Le problème de la mer du Nord, la plus intense zone de trafic et d'industries maritimes au monde, implique une multitude d'acteurs. De l'un au multiple : l'éthique de responsabilité était recommandation au souverain, la précaution est formulée pour un ensemble disparate d'usagers. La mer la plus fréquentée est aussi la mer la plus étudiée. Les études ont donné des résultats inattendus et perturbants, des concentrations importantes de contaminants découvertes là où on ne les attendait pas, des effets très importants de contaminants très faiblement concentrés. La mer du Nord ne se comporte pas comme une station marine expérimentale où chaque introduction de nouveaux déchets peut être gérée finement par les mesures des conséquences. La multitude d'acteurs, l'imprévisibilité des contaminants et la dissolution d'un rêve technique de gestion ont amené à formuler un principe général et universel de précaution.

Pratiques

Sans doute, la première idée qui vient à l'esprit est de sanctionner des imprudences aux conséquences désastreuses. Mais cela semble bien délicat à mettre en œuvre et d'une grande inefficacité : par exemple, le système des transports individuels terrestres a été totalement déstabilisé par l'introduction de la pédale d'accélérateur par le constructeur automobile Levasor. On imagine mal un système de sanction à l'encontre de cet inventeur, sanction qui d'ailleurs ne pourrait l'atteindre, celui-ci étant décédé dans un accident d'automobile peu de temps après. Le risque de très grande ampleur annihile bien souvent la responsabilité pénale. Le grand roi des Perses faisait fouetter le fleuve qui contrariait ses projets : image de l'impuissance d'une loi pénale souveraine devant le cours malheureux des événements. À travers la précaution, c'est une autre figure du pouvoir que le souverain qui sanctionne et légifère qui s'affirme. Un coup de loi n'abolit pas le

risque. La figure du souverain législateur est une figure fondamentalement ambiguë pour la réduction des risques, puisque le souverain ne cesse de répéter qu'il représente un risque majeur pour ses ennemis. La précaution est la mort du souverain, au contraire des éthiques de responsabilité qui le conseillent.

La pollution de l'air ou le réchauffement planétaire proviennent de l'usage du transport routier, de certaines pratiques agricoles et de la consommation d'énergie fossile. Un risque infini résulte de l'infinité de menues erreurs. L'erreur est commune, peu accessible par les standards et graduations d'un droit administratif, au contraire d'une situation de recherche de compromis entre une administration et quelques industriels ou quelques concepteurs qui peuvent changer leurs plans. Cette erreur commune, tout à la fois banale et fatale, appelle une réponse en termes de responsabilisation, de regain d'ingéniosité et de vigilance.

La précaution est une pédagogie de l'adaptation collective. Elle nécessite des appuis normatifs qui fournissent les outils et références à cet apprentissage. La précaution « traite de la connaissance scientifique comme d'une culture. Elle permet d'affronter l'incertitude avec rigueur, en débattant des valeurs sociales et des besoins plutôt qu'en définissant des marges de sécurité généralement inadéquates. Il s'agit de donner place aux incertitudes qui appellent le débat entre citoyens sur le type de relations humaines que nous voulons promouvoir, et sur le contenu des relations morales que nous voulons entretenir avec la nature et avec autrui » (B. Winne, in O. Godard, *op. cit.*, p. 165 et 176).

La précaution est un élargissement d'une culture de l'anticipation par rapport à une époque antérieure où celle-ci se cantonnait à une ingénierie de prévention. Cette transition de la prévention à la précaution se résume brièvement à moins de certitudes, plus de services et à de meilleures anticipations. La précaution se comprend comme une exigence de performance en temps réel. Il s'agit d'agir sans tarder, d'employer des techniques prudentes dans un cadre d'évaluation des effets et d'ajustement des actions. La précaution se fonde sur une connaissance des incertitudes, des limites des capacités humaines et de l'efficacité des moyens de prévention. Son régime d'innovation est celui de l'innovation de service : l'innovation est coproduite par le collectif concerné et le gestionnaire du risque. L'innovation est procédure d'apprentissage pour ce collectif. Les procédures sont coopératives et se fondent sur une répartition entre un risque accepté et partagé et une protection ALARA (« As Low As Reasonably Achievable »). Dans ces procédures, les seuils ne signifient pas l'absence de risque, mais la valeur différente selon le collectif d'une prise de risque négociée. La précaution est sous le risque spéculatif de la démocratie, fondée sur des circuits directs d'information et de connaissance pour permettre l'adaptation rapide aux situations nouvelles. Le droit de la précaution sera sans doute avant tout un droit de la qualité de l'information. La formation du consensus se fait sur la

nécessité de ne pas écarter la réalité du risque au prétexte qu'il est incertain et aléatoire. L'incertitude pèse énormément sur la reconnaissance du mal, ce pourquoi il faut déployer collectivement les soins les plus attentifs dans la mesure des risques et l'appréciation de l'incertitude qui les entoure.

► EWALD F., « Philosophie de la précaution », *L'année sociologique*, 1996, 46, n° 2, p. 383-412. – GODARD O. éd., *Le Principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, Paris, Maison des sciences de l'homme/INRA, 1997. – HERMITTE M.A., *Le Sang et le droit*, Paris, Le Seuil, 1996. – LASCOUMES P., « La précaution comme anticipation des risques résiduels et hybridation de la responsabilité », *L'année sociologique*, 1996, 46, n° 2, p. 359-382. – O'RIORDAN T. & CAMERON J. éd., *Interpreting the Precautionary Principle*, Londres, Earthscan, 1994.

Stéphane CALLENS

→ Comte ; Écologie ; Environnement ; Mill.

PREUVE

LOGIQUE

On est sollicité pour donner des gages de son dire et de son fait en toute sorte de circonstances, les pratiques intersubjectives procurent à la preuve et à ses grands opérateurs – l'argumentation, le témoignage, un appel à l'expérience qui revêt des formes multiples – leur premier champ d'application. La preuve est une exigence intrinsèque de la pensée réglée des sciences et du droit qui est son origine, elle a lieu également en philosophie ou en théologie. Le besoin d'authentification dont relève la preuve mérite d'être interrogé. On prouve des propositions sur des états de choses actuels, passés ou anticipés (la prophétie), on prouve l'existence et la vérité d'idéalités, on prouve des prédicats (« l'authenticité » d'une œuvre ou d'un sentiment, la sincérité, la fidélité, la sainteté). Il n'est jusqu'au concept qui n'ait besoin d'être certifié, le schème kantien et l'exemplification en général témoignent du réquisit d'une référence à l'expérience qui est peut-être la dimension élémentaire de l'intelligibilité : l'expérience fait preuve.

En prise sur les théories explicatives, la preuve a son fondement et dans la cohérence argumentative, et dans la construction intuitive, et dans la vérification. Elle en appelle au conventionnalisme, au positivisme, au réalisme épistémologiques, elle joue un rôle déterminant dans les controverses scientifiques et philosophiques. Les critères d'évaluation qui la sous-tendent et qui s'élaborent au sein des communautés épistémiques constituent son dehors. Sa portée n'est pas univoque. En citant « les jurisconsultes », Leibniz place aux côtés de la « preuve pleine » les « présomptions », les « conjectures », les « indices » (cf. *Nouveaux Essais*, IV, 16, § 5-9). Sous d'autres désignations et avec d'autres précisions, la distinction entre le certain et le probable est au cœur de la théorie de la preuve. Mais la

preuve ne se réduit pas à la seule attestation de la vérité, elle ne s'épuise pas dans les règles, les critères, les procédés d'évaluation d'un énoncé ou d'une hypothèse. Les méthodes de la preuve ont une contrepartie subjective que Leibniz, toujours dans les *Nouveaux Essais*, appelle « créance » ou « degrés de l'assentiment » : assurance, confiance, ferme créance, croyance, conjecture, doute, incertitude, défiance, dans une échelle où, écrit Leibniz, « les degrés de probabilité se peuvent diversifier à l'infini ». La « notoriété, où l'on n'a pas besoin de preuve » se situe à l'autre extrémité. Les catégories de la créance font l'objet des logiques épistémiques contemporaines.

Nous prendrons pour référence la philosophie des mathématiques de Wittgenstein. Décrite par beaucoup en raison de sa simplicité excessive, elle projette pour cette raison même une lumière forte sur plusieurs points critiques de la théorie de la preuve, et ce non seulement en mathématiques. Elle est portée par un concept, l'application, qui permet d'unifier les différents aspects de la preuve. En fait partie le versant subjectif des méthodes de la validation, auquel Wittgenstein donne tout son relief. Négligées par la tradition positiviste, la compréhension de la preuve et la conviction qui est sa seule pierre de touche conduisent toute la réflexion de Wittgenstein. La preuve a un destinataire qui doit la comprendre et en être convaincu. « Ce qui nous convainc – c'est cela la preuve. Une image qui ne nous convainc pas n'est pas la preuve, même si l'on peut montrer qu'elle exemplifie la proposition prouvée » (Wittgenstein, *Remarques sur le fondement des mathématiques*, III-41 et *passim*). La pratique atteste la conviction et la compréhension, on comprend une proposition mathématique ou une preuve « lorsqu'on sait l'appliquer » (*ibid.*, V-25). La conviction renvoie aussi à un registre actif, elle est la forme la plus ferme de « l'acte de tenir pour vrai » que Kant considère comme une « circonstance de notre entendement » : il appartient à la structure originelle de l'esprit de se prononcer sur la vérité et de juger de son poids selon la force de la preuve apportée. L'acte de tenir pour vrai démarque une sphère de l'entendement et exprime un engagement : le sujet « tient », ou ne tient pas, quelque chose « pour » vrai, il lui reconnaît le statut d'un savoir, d'une opinion ou d'une croyance. Car Kant introduit le problème de la créance et de la conviction en rapport avec la distinction entre « opiner, savoir et croire », d'après le titre de la III^e section du « Canon de la Raison pure ». L'appellation de savoir, on s'en souvient, est réservée à la connaissance fondée, et sur une « suffisance objective », la vérité du jugement, et sur une « suffisance subjective », la conviction. Dans le savoir, « la conviction de la vérité s'allie à l'intelligence des sources de la vérité ».

Plus précisément, une telle intelligence tient de la justification de la dérivation de la vérité à partir de ses sources, ce n'est qu'à cette condition qu'il y aura conviction. Savoir et justification sont conaturaux et leur conaturalité fournit un cadre théorique à la preuve : l'épistémologie de la preuve s'articule avec le concept

épistémique de savoir. On se trouve là face à des déterminations « fondamentales » au-delà desquelles on ne saurait aller et qui pourtant se révèlent être le cadre de toute élucidation de la preuve, comme il appert de la définition que Roderick Chisholm donne de la certitude : une proposition *h* est certaine pour *S* si pour *S* elle se situe « au-delà de tout doute raisonnable » (forme empruntée à la jurisprudence nord-américaine) et s'il n'y a pas une autre proposition *i* « telle qu'il soit pour *S* plus raisonnable d'accepter *i* qu'accepter *h* » (« The directly evident », in G. Pappas éd., *Justification and Knowledge*, Reidel, 1979, p. 119). Suivant une autre terminologie, *h* doit « battre » toute autre proposition « en compétition » avec elle. Chisholm renonce à définir « plus raisonnable que » (ou préférabilité épistémique), il est pourtant clair que seule une meilleure justification rend la proposition imbattable.

En effet, la théorie du savoir (il ne se résume bien entendu pas au « je sais que *h* » de l'analyse, mais cette formule réduite suffit à en faire ressortir les enjeux), depuis le *Théétète* jusqu'à Leibniz et à Kant et à la riche réflexion épistémique contemporaine, a permis de mettre au jour trois conditions, ou facteurs, du savoir. Ils sont communément désignés par condition de vérité : la proposition doit être vraie, condition d'acceptation ou de croyance : la proposition doit être acceptée, et condition de justification : la proposition doit être justifiée. Quoi qu'il en soit des précisions qu'il s'avère nécessaire d'ajouter à cette description – qu'il s'agisse de la conception « aristotélicienne » de la vérité, ou de la portée de l'acceptation subjective, ou encore de la justification : une connaissance obtenue « par accident » ou moyennant de « mauvaises raisons » est-elle un savoir véritable ? (les exemples dits de Gettier montreraient que la justification, l'acceptation et la vérité ne s'accompagnent pas en toute circonstance d'un savoir) –, il n'en reste pas moins que le savoir épistémique demande la prise en compte des trois conditions et de leurs inter-relations (elles explicitent la « conviction de la vérité » kantienne). Toutes les trois ont des figures homologues dans la preuve. L'interpénétration du savoir et de la preuve ressort immédiatement de la condition de justification, le savoir en appelle directement à la preuve. Réciproquement, le concept d'« être prouvé » réunit les trois conditions du savoir et ne se laisse comprendre que par elles. La proposition *h* sera dite prouvée pour *S* si et seulement si *S* est convaincu (condition d'acceptation) de la vérité de *h* (condition de vérité), dans la mesure où *h* lui apparaît comme justifiée (condition de justification). Sous d'autres formes, on retrouve dans la pensée de la preuve les conditions du savoir.

I. À la condition de vérité du savoir équivaut dans la preuve une condition d'objet, l'inspection d'un donné. La preuve porte sur une occurrence ou une corrélation, naturelle et matérielle tout autant qu'idéale. On prouve la réalité d'un fait ou d'un événement, la dérivation d'un conséquent de ses antécédents (logiques, mathématiques, empiriques), l'association

d'un prédicat et d'un sujet. Ce donné qu'on présuppose, il faut l'établir, moyennant l'observation directe (le témoignage) ou rapportée, l'expérimentation, la déduction ; mais aussi par présomption, induction, conjecture. Toute preuve suppose la définition de son objet, la question principale en la matière consistant à savoir si les définitions conceptuelles et formelles renvoient en ultime instance à des définitions « ostensives » des objets de la preuve. Telle était la thèse du positivisme logique ; elle sous-tend aussi le réalisme épistémologique. Et en droit, en histoire, dans les sciences humaines, on attend du témoignage un effet d'ostension.

La primauté de l'application permet à Wittgenstein de déplacer les termes du problème et le principe de sa solution dépasse le domaine des mathématiques. En se référant à la controverse entre formalistes et intuitionnistes, il remarque, à l'encontre des derniers : « Ils croient en fait que l'on prive la définition de sa signification, de son importance, en la posant comme simple règle de substitution des signes. Alors que la signification de la définition se trouve dans son application, dans son importance vivante » (*Grammaire philosophique*, p. 300, Hilbert décrit le signe mathématique lui-même en des termes assez voisins). Wittgenstein souligne « signification », il faudrait aussi mettre en relief « importance vivante ». L'ostension est interne aux pratiques *in fieri*, elle se produit comme un effet de présence coextensif à leur effectuation et à leur effectivité : par son application la définition se donne à voir à l'agent de l'application. (Il en ira de même de l'acceptation et de la compréhension de la preuve ainsi que de la proposition prouvée.) La définition n'est pas le poteau indicateur d'un réel qui ensuite se manifesterait en personne (telle aurait été selon Waismann la position de Wittgenstein vers 1930, cf. *Wittgenstein und der Wiener Kreis*, p. 246-247). Car l'ostension n'est jamais inéquivoque, « la définition ostensive peut en chaque cas être interprétée de telle ou telle manière » (*Investigations philosophiques*, 28).

II. Comme le savoir a un porteur, *S* qui sait que *h*, la preuve a aussi un destinataire, *S* qui est convaincu par la preuve de *h*. La preuve a pour finalité de faire accepter une proposition ou un corps de propositions. Mais il ne s'agit pas ici d'une acceptation sous la forme de cette « adhésion » à la proposition vraie qui est la teneur épistémique de la condition d'acceptation du savoir. L'acceptation se donne sur le mode de la preuve, autrement dit, le sujet doit lui-même constituer la preuve pour l'accepter, ou la reconstituer s'il n'en est pas l'auteur – et il doit pouvoir s'en servir. La preuve contient une condition d'effectuation. Elle ne signifie pas une construction dans l'intuition *a priori*, à la façon de Kant. L'acceptation consiste dans l'autodétermination de la preuve au sujet qui l'agence, au travers de l'acte même de prouver, plutôt qu'elle ne constitue le fait d'une monstration « intérieure ». Ce n'est pas l'intériorité mais l'effectuation qui entraîne *eo ipso* la conviction ; et c'est sous ce jour, ni relativiste ni

pragmatiste, qu'il convient d'apprécier l'application, qui va de pair avec une « approbation » individuelle et collective. « Nous disons que la preuve est une image. Mais l'image demande l'approbation que nous lui dispensons en recomptant » (*Remarques sur les fondements des mathématiques*, VII-9). L'effectuation se fait selon des règles que tout praticien de la preuve est tenu de suivre, cette approbation avérée par une pratique unanime exprime le sens de ce qui fait preuve pour une communauté épistémique. C'est ce que suggère la conclusion de Wittgenstein : « l'unanimité des approbations est la condition préalable à notre jeu de langage, on ne la constate pas en lui ». Il faudrait ajouter, en quittant le terrain de la preuve, que l'effectuation se double d'une effectivité qui non plus ne demande pas à être justifiée, et ne pourrait pas l'être. Les mathématiques se distinguent d'un jeu de signes tels les échecs parce qu'elles sont applicables (*Grammaire philosophique*, p. 298), et l'applicabilité des constructions « prend soin d'elle-même » (*ibid.*, p. 314). La détermination de son fondement n'est pas « nécessaire (et si vraiment ce n'est pas nécessaire, c'est également impossible) : il semble en fait que la forme générale de l'application de l'arithmétique soit représentée par le fait qu'on ne puisse rien dire. (Et si c'est là une représentation possible, c'est également la seule exacte) » (*ibid.*, p. 312-313).

La construction de la preuve et la pratique qui la confirme ont en commun de ressortir à ce faire transparent pour son agent. La construction mathématique est un modèle achevé d'intelligibilité parce qu'en elle le faire se voit faire, Wittgenstein se situe dans le droit fil de la doctrine fichtéenne de l'action. « Je vois à travers mon faire ce qui est fait ; je n'ai de connaissance immédiate que de mon faire, de même qu'en mathématiques on procède à la démonstration par construction et que l'on voit la vérité à travers son faire » (Fichte, *Wissenschaftslehre nova methodo*, trad. fr., p. 249). Non seulement l'intuitionnisme, mais aussi le finitisme hilbertien en appellent à cette intelligibilité intrinsèque du faire (on contrôle ce qu'on fait), de même que la demande cartésienne d'une inspection après-coup de l'ensemble de la démonstration (elle anticipe sur l'*Übersehbarkeit* de Wittgenstein, la « vue synoptique »). L'évidence du faire est une *nec plus ultra*. L'activité n'est pas un fondement et n'a pas de fondement, elle est « passage » d'un moment à l'autre dans un mouvement vers la détermination (*ibid.*, p. 87), et « le concept d'activité lui-même ne peut être expliqué ni déduit ». « Ce qui intuitionne observe son faire. Il n'y a pas d'objet en tant que tel qui soit immédiatement objet de conscience, mais seulement le faire, la liberté » (*ibid.*, p. 90). Mais s'il en est ainsi, comment évaluer les preuves où la pratique du sujet fait défaut, telles les démonstrations apagogiques et automatiques en général ? On pense par exemple à la démonstration par l'ordinateur du théorème des quatre couleurs. Tel est le problème auquel s'affronte la condition d'effectuation.

III. « Par la construction d'un signe je constrains à l'acceptation d'un signe » – la preuve est image et signe de la proposition qu'elle prouve –, « quand nous disons qu'une construction doit nous convaincre de la proposition, cela signifie qu'elle doit nous conduire à appliquer cette proposition de telle ou telle manière. Qu'elle doit nous déterminer à accepter ceci comme faisant sens, et cela non » (*Remarques...*, op. cit., III, 29). Le concept d'application rassemble construction et nécessité, la preuve est preuve parce qu'elle fait apparaître une relation interne entre le théorème conjecturé et les propositions qui l'établissent, le prédicat présumé et son sujet, l'occurrence factuelle et les causes qui l'expliquent. Le modèle d'intelligibilité de la preuve en général reste la démonstration telle que Wittgenstein la décrit : « La preuve doit montrer l'existence d'une relation interne. Car la relation interne est l'opération qui produit une structure à partir d'une autre [...]. En même temps que la preuve produit un concept, elle me convainc de quelque chose. Ce dont elle me convainc est énoncé dans ce qu'elle a prouvé » (VII-72, cf. aussi III-46/50). La preuve exhibe dans une seule évidence ses propres opérations, la règle qui les agence et la proposition prouvée.

Quoi qu'il en soit de la « force de la preuve » (la formule est de Wittgenstein) et de la déclinaison des degrés de cette force : démonstrative (directe ou apagogique), analogique, inductive, etc., et quels que soient les objets et les modalités de la preuve, la condition de justification du savoir s'y transpose sous la forme d'une condition d'étayage. Un conséquent s'étaye par ses antécédents. Le fondement de l'étayage se cherche dans l'inférence logique et mathématique, dans la logique naturelle de l'argumentation, dans les régularités causales empiriques (Schopenhauer a mis en évidence que la causalité est la modalité *princeps* du « principe de raison suffisante »). De même que la condition de justification du savoir se produit dans plusieurs plans – une rationalité cohérente est son expression la plus générale –, de même l'étayage ne concerne pas seulement la cohérence des enchaînements argumentatifs, il joue aussi sur les deux autres conditions de la preuve.

1) La condition d'étayage joue sur la condition d'objet (et médiatement sur la condition de vérité) en tant que confirmation ou infirmation de la corrélation objective sous examen, autrement dit, au regard de l'adéquation des opérateurs de la preuve et de ses objets. Il y aura ainsi (ou non) preuve de la vérité de la corrélation. De ce point de vue, l'expérimentation fonctionne comme une argumentation matérielle : les dispositifs expérimentaux de la preuve ont pour but d'étayer ou de réfuter ostensiblement une hypothèse sur des corrélations empiriques. En quelle mesure peuvent-ils y prétendre ? Un grand nombre de débats se nouent autour de cette question. Y a-t-il des expériences cruciales ? La « thèse de Duhem-Quine » le nie, tout au moins dans une première approche : tout en prétendant qu'il est toujours loisible de réaménager une théorie infirmée par des contre-exemples, Duhem n'en

admettait pas moins le principe d'une confrontation globale entre les ensembles théoriques et les corps d'observations. Par ailleurs, si l'expérimentation se révèle être artefactuelle et « chargée de théorie », est-on en droit d'affirmer qu'elle se rapporte à un donné objectif ? L'épistémologie post-positiviste y répond par la négative, ainsi que le « programme » dit « fort » de la sociologie de la science. On retrouve dans ces interrogations la question de l'ostension de l'objet de la preuve (I).

2) Sous le rapport des pratiques (condition d'effectuation et médiatement condition d'acceptation), l'étayage se manifeste comme la compréhension de la preuve. La compréhension accompagne l'approbation et l'application réglée, faire sans comprendre n'est pas une application au sens de Wittgenstein : « [...] on peut connaître exactement une preuve et la suivre pas à pas < c'est-à-dire, reproduire les étayages des conséquents par les antécédents », sans malgré tout comprendre ce qui a été prouvé » (op. cit., V-25). Il est difficile, car on se trouve dans le registre de l'agir, d'expliquer comment l'application se dédouble en compréhension. Il s'agit là de quelque chose comme un *habitus* où les pratiques se déposent et se sédimentent – un « avoir » qui est un « pouvoir », comme l'*εἶσ* aristotélicienne. Dans le processus de la connaissance et de la preuve, la compréhension est à la fois l'effet et la condition des applications ; Wittgenstein poursuit, au sujet de la proposition et de la preuve : « Quand la comprend-on alors ? – Je crois : lorsqu'on sait l'appliquer. On pourrait peut-être dire : lorsqu'on a une image claire de son application. Mais pour cela il ne suffit pas de lui associer une image claire. Il aurait été mieux de dire : quand on possède une vue synoptique de son application. Et cela aussi est mauvais, la question est seulement de ne pas s'imaginer l'application là où elle n'est pas ; de ne pas se laisser tromper par la forme verbale de la proposition. » À la différence de la plupart des propositions non mathématiques dont la forme verbale suffit à « garantir » la compréhension (*ibid.*), la compréhension mathématique requiert la connaissance des bons lieux de son application. Savoir les imaginer ne peut se faire que sur le fond d'une pratique antérieure, qui engendre ce que Wittgenstein nomme dans un autre contexte un savoir de la « pertinence » : si je sais que je peux vérifier l'égalité $7 \times 8 = 56$ avant de l'avoir fait (« alors que simplement en la voyant, je ne sais peut-être pas si je peux vérifier une intégrale ou non »), c'est que, « de toute évidence, je reconnais qu'elle est construite d'après une règle déterminée, et que je sais quelle est la connexion entre la règle et la solution du problème, je connais le type de construction de la proposition » (*Grammaire philosophique*, p. 305). Les règles s'incorporent aux pratiques, elles sont des instruments de la preuve.

Bref, « la compréhension n'est nullement un processus particulier, c'est le fait d'opérer avec une phrase » (*Wittgenstein and der Wienerkreis*, p. 146). Dans ce domaine, les questions touchent au statut épistémologique d'un *insight* qui est en même temps

reconnaissance et anticipation. Pour appliquer une règle générale à chaque étape d'une démonstration, je n'ai pas besoin d'une « intuition fraîche », il me suffit de reconnaître que cette règle peut être appliquée ici également (qu'elle est valable aussi pour ce cas) – mais « aucun acte de prévision ne peut m'éviter cette *Einsicht* ». Pourfendeur notoire de l'intuition, Wittgenstein n'en affirme pas moins que « la preuve doit être un processus intuitif (*ein anschaulicher Vorgang*). Ou bien également : la preuve est le processus intuitif » (*Remarques...*, op. cit., III-42). Car l'intuition est de l'ordre de la pratique, elle constitue une « décision » (*ibid.*, p. 307-308, comme chez Fichte activité et liberté vont ensemble) – la *Einsicht* « intéresse » Wittgenstein pour autant qu'elle est un phénomène de l'action humaine (non un phénomène mental particulier, *Remarques...*, op. cit., IV-32).

3) Enfin, la condition d'étayage se rapporte aux critères d'évaluation eux-mêmes. Elle commence par signifier le degré de validité de l'étayage, suivant les principes de cohérence syntactique et de pertinence sémantique que partagent à un certain moment les différentes disciplines, écoles de pensée, communautés épistémiques, en une plus grande ou moindre mesure. Aussi, cette cohérence et cette pertinence se traduisent-elles par des contraintes où tout le monde ne se reconnaît pas. Le problème majeur de Kant est celui des « preuves transcendantales », au premier chef la preuve de l'unité de l'expérience, laquelle requiert à son tour la preuve de l'unité d'une conscience à la fois organisatrice et témoin de l'expérience. N'en déplaise aux rhétoriques pragmatistes et malgré les théorèmes de limitation en arithmétique, l'argumentation reste astreinte à l'idéal normatif d'une (preuve de la) cohérence syntactique des arguments – en logique et en mathématique cela s'appelle « consistance », ou absence de contradictions – et d'une (preuve de la) déduction strictement interne des raisons ; en logique et mathématique cela s'appelle « complétude », les théorèmes doivent s'obtenir exclusivement à partir des propositions initiales du système. La fonction des connexions argumentatives (« parce que », « alors », « donc ») ne serait simplement pas pensable si elle ne renvoyait pas au modèle de l'inférence logique (« si... alors »).

La preuve mathématique a un effet performatif, elle « crée » en quelque sorte la proposition qu'elle prouve. C'est là une des thèses les plus contestées de l'épistémologie de Wittgenstein, elle met pourtant en évidence la portée cognitive de la démonstration qui aussi de ce point de vue s'avère le modèle de la preuve en général. Wittgenstein ne prétend pas qu'il y aurait un vide propositionnel avant la démonstration, il veut pointer que par la preuve « une connexion est faite qui n'était pas là avant » (*Remarques...*, V-9 et V-45). Seule cette connexion donne à la proposition son sens achevé : « La preuve change nos concepts. Elle fait de nouvelles connexions et crée le concept de ces connexions. (Elle n'établit pas qu'elles sont là ; elles n'existent pas jusqu'à ce qu'elle les fasse) » (*ibid.*,

III-31). L'énoncé d'une équation dont on ne connaît pas les racines a « moins de sens » que le même énoncé lorsqu'on connaît les racines de l'équation. Et dans le second cas, la teneur en sens change suivant la manière dont on a déterminé les racines. Toute équation du second degré se ramène à la forme $ax^2 + bx + c = 0$ pour laquelle il existe la formule générale de solution

$$-b - \sqrt{b^2 - 4ac}$$

Or, vérifier que l'équation

$$2a$$

$$x^2 + 2x + 1 = 0$$

a deux racines (–1 et –1) à partir de cette formule qui établit un rapport entre coefficients et racines représente un gain en sens au regard de la découverte, à la suite d'une série d'essais, que –1 est la valeur de x satisfaisant l'équation. Sous le jour de la formule générale, « racines » signifie :

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \text{ et } x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

(Alice Ambrose, « Wittgenstein on mathematical proof », *Mind*, 91, n° 362, 1982). La preuve apporte du nouveau qui transforme la compréhension de la proposition.

La constitution pleine de la proposition mathématique ne s'obtient qu'à la dernière étape de la preuve. Au contraire, la valeur de vérité de la proposition empirique est déterminée par des facteurs externes. Son énoncé exprime une même signification, que la proposition soit vraie ou fautive, alors que la proposition mathématique ne peut avoir d'autre valeur de vérité que celle qui est la sienne : la différence entre répéter une preuve et répéter une expérience réside en ce que, dans la preuve, nous devons « répéter chaque étape et le résultat » (*Remarques...*, III-55, II-39). Certes. Toutefois, la nécessité en moins, la preuve empirique charrie aussi un surcroît de sens et de vérité que seule la conclusion heureuse de l'expérience est à même d'engendrer. À l'instar de la démonstration mathématique, la preuve empirique réduit l'opacité qui affecte toute conjecture non justifiée : on saisit là au vif en quoi la preuve a partie liée avec le savoir. De ce point de vue, l'intelligibilité de la preuve est la même partout, dès lors qu'il s'agit de la justification de la connaissance.

S'il n'y a pas lieu de distinguer foncièrement entre sciences formelles et sciences empiriques, Wittgenstein est légitimé de rapprocher la preuve mathématique de l'analyse chimique (*Remarques philosophiques*, 162). La preuve procède à une analyse complète de la proposition, elle en expose la tessiture. Par exemple, le théorème 7 des *Fondements de la géométrie* de Hilbert se borne à déclarer, sans plus, que « entre deux points d'une droite, il y a une infinité de points ». Il est le résumé conceptuel du théorème 6, plus développé, que Hilbert présente comme une « généralisation » du théorème 5. La démonstration de ce dernier est complexe. Elle comprend les démonstrations de deux lemmes, qui s'étayaient de plusieurs axiomes d'appartenance et d'ordre, invoqués séparément ou appliqués de façon répétée, ainsi que du théorème 4. Et la démonstration de

ce dernier requiert le concours de deux axiomes d'ordre dont l'un à deux reprises (Hilbert, *Fondements de la géométrie*, trad. fr., p. 12-17). De la sorte, le théorème 7 aura été résolu dans tous ses éléments, le connaître signifie très exactement se représenter les théorèmes, les hypothèses auxiliaires et les axiomes participant à sa démonstration – ainsi que saisir les manières de leur intervention, à savoir, les règles de la démonstration, la fonction des axiomes et des lemmes, l'opération de généralisation, l'évidence des constructions géométriques nécessaires à la démonstration du théorème 4 et des deux lemmes du théorème 5 (dans les trois cas, Hilbert emploie le verbe « montrer »). Le théorème 7 est le composé de tout cet ensemble de propositions, c'est cela qu'exhibe sa démonstration. Une proposition complètement analysée est sa propre preuve.

La preuve est une institution, elle doit être approuvée par la communauté des praticiens de la preuve. Cette vocation de publicité est l'effet d'ensemble des trois conditions de la preuve, condition d'objet, condition d'effectuation et condition d'étayage. La fixation inéquivoque de l'état de choses assure son identité, l'objet de la preuve est reconnaissable pour tous. L'effectuation réglée de la preuve la rend reproductible, elle se laissera appliquer par tout praticien compétent. Et l'étayage se soutient d'une rationalité partagée par les membres d'une communauté épistémique. Tel quel, ce modèle ne convient pourtant qu'aux modalités « achevées » de la preuve, au premier chef la démonstration et l'expérimentation. D'autres figures témoignent d'un affaiblissement des conditions de la preuve. Dans la « pierre de touche » qui fait son apparition dans le *Gorgias* et dont Kant se sert souvent, la condition d'étayage se borne à un procédé de décision quasi automatique, de même que la condition d'effectuation s'y résume à l'application également mécanique du procédé. De ce point de vue, l'aveu – la reconnaissance d'un délit ou d'un tort – constituerait le degré zéro de la preuve. L'aveu est une preuve purement sémiotique : sans s'accompagner d'autres moyens de certification, un signe – l'énoncé « je reconnais que » ou un geste ayant même signification – suffit à autoriser l'imputation du délit ou du tort au sujet de l'énonciation (on n'aurait pas le délit d'autrui, il ne saurait y avoir dans l'aveu responsabilité sans faute). Le délit y est présupposé, tout débat sur l'identité de l'objet se trouve donc exclu par avance ; l'effectuation signifie tout simplement l'appartenance au sujet de l'acte qu'on avoue (il dérive causalement de son auteur), sans autre spécification ; et la reconnaissance fait l'économie de l'étayage argumentatif de l'imputation.

La subordination de la fonction cognitive de la preuve à d'autres finalités entraîne des entorses au modèle général, et non seulement son affaiblissement. Dans la prophétie, le fait prophétisé (condition d'objet) est par nature problématique et l'effectuation s'y donne comme une vision ou une révélation, relayée par une herméneutique métaphorique et analogique (condition d'étayage). En droit pénal, si la condition d'objet est

une conduite qualifiée comme illicite et si la condition d'étayage reste une affaire de témoignage et d'argumentation, la condition d'effectuation se traduit par une imputabilité qui peut se dissocier de l'agir effectif (cf. la responsabilité pour imprudence ou la « responsabilité sans faute »). L'infailibilité du pape est souveraine dans la preuve de la sainteté ; elle constitue une reconstruction de la condition d'effectuation et agit sur la condition d'objet, car l'infailibilité est le critère qui décide en dernière instance des « mérites » et des « miracles » posthumes, qui sont les fondements (subjectif et objectif, respectivement) de la sainteté, à la suite d'une enquête complexe menée par d'autres instances, où interviennent sous d'autres formes les trois conditions de la preuve, etc.

L'intrication du savoir et de la preuve se dédouble en plusieurs implications qui esquissent en même temps une pathologie. Elle consiste toujours dans l'affaiblissement, voire l'élimination de la « preuve » au bénéfice du « savoir » ; mais la pathologie de la preuve a aussi son fondement dans cette même communauté avec le savoir.

(Condition d'objet) → Condition de vérité. En oubliant que la condition d'objet de la preuve se superpose à la condition de vérité du savoir qui en dépend, on passe plus ou moins « par dessus » les opérateurs qui décrivent le fait (témoignage, récit, expérimentation, argumentation, etc.), en s'installant directement dans la vérité. C'est le propre du dogmatisme qui dans la preuve porte le nom d'argument d'autorité ; on remarquera au passage que la spécialisation des savoirs fait que les conduites de preuve s'appuient massivement sur l'autorité. Mais la condition de vérité du savoir sous-tend la condition d'objet, l'expérience fait preuve : « Et comme une expérience uniforme se monte à une preuve, il y a ici une preuve directe et entière, tirée de la nature du fait, contre l'existence d'un miracle ; une telle preuve ne peut être détruite et le miracle rendu croyable que par une preuve contraire supérieure » (Hume, *Enquête sur l'entendement humain*, chap. X).

(Condition d'effectuation) → Condition d'acceptation. La preuve qui passe plus ou moins par-dessus l'effectuation s'adresse directement à l'acceptation : c'est l'opération de la rhétorique de l'effet, qui tend à réduire la preuve à son action sur le sentiment et les émotions. Dans la terminologie de Kant, elle vise à persuader plutôt qu'à convaincre. En sens opposé, la condition d'affectation du savoir sous-tend la condition d'effectuation, ne serait-ce que parce que prouver présuppose l'acceptation de la possibilité du vrai. Plus profondément, une relation unit le vrai qu'on est obligé d'accepter et la conviction, par le biais de la croyance (de ce point de vue, J. Fodor ou F. Dretske répètent à leur façon Fichte et Husserl) et de son contraire, la critique et l'autocritique, au sens où Husserl les entend (*Logique formelle et logique transcendantale*, § 44-46, 58-60, 105-107). Cette relation est plus déterminante que les dérapages qu'elle ne sait pas éviter (« mé-représentation », « illusion », « idéologie »).

(Condition d'étayage) → Condition de justification. La preuve repose sur des critères publics de rationalité, il s'ensuit qu'on ne peut pas la « nommer » une fois pour toutes. À la limite il est loisible de l'ignorer, l'importance accordée à la preuve dépend des décisions des communautés épistémiques. (On connaît des philosophies opposées à toute pensée de la preuve, qui frôlerait le vulgaire.) La preuve qui passe plus ou moins par-dessus l'étayage se contente d'une cohérence pauvre (« pragmatique »), voire apparente (« sophistique »). Cependant, la justification en général sous-tend les modalités spécifiques de l'étayage, la cohérence formelle présente à elle seule une valeur de preuve (le « cohérentisme »). L'effectivité de la preuve se joue entre les exigences globales d'une rationalité qui une fois posée ne cesse plus de s'imposer, et le mode qui est le leur dans chaque conduite de preuve. Celle-ci est doublement contingente. Ses objets lui prescrivent des figures obligées avec des contraintes plus ou moins fortes, les pratiques de la preuve expriment ce qu'une communauté épistémique désigne à un certain moment comme devant faire preuve.

- BENTHAM J., *Traité des preuves judiciaires*, Paris, E. Dumont, 1838. – CARNAP R., *Testability and meaning*, in FEIGL H. & BRODBECK M., *Readings in the Philosophy of Science*, New York, Appleton-Crofts, 1953. – COHEN L.J., *The probable and the provable*, Oxford, Clarendon Press, 1977. – DRETSKE F., *Knowledge and the flow of information*, Cambridge (MA), MIT Press, 1981 ; *Explaining behaviour*, Cambridge (MA), MIT Press, 1988. – FODOR J., *Psychosemantics*, Cambridge (MA), MIT Press, 1987. – FRANKLIN A., *Experiment, right or wrong*, Boulder, Colorado Univ. Press, 1990. – GALISON P., *How experiments end*, Cambridge (MA), Harvard Univ. Press, 1987. – GLYMOUR C., *Theory and evidence*, Princeton Univ. Press, 1980. – GRANGER G.-G., *La vérification*, Paris, O. Jacob, 1992. – HARDING S. dir., *Can theories be refuted?*, Boston, Reidel, 1976. – HILBERT D., *Les fondements de la géométrie* (1899), trad. fr., Paris, Dunod, 1971. – KUHN Th., *The essential tension*, Chicago Univ. Press, 1977. – LAKATOS I., *Proofs and refutations*, Cambridge, Univ. Press, 1976 ; *Philosophical papers*, II, Cambridge Univ. Press, 1978. – LICOPPE C., *La formation de la pratique scientifique*, Paris, La Découverte, 1996. – WITTGENSTEIN L., *Remarks on the foundations of mathematics*, Oxford, Blackwell, 1978 (3^e éd. élargie) ; *Ober Gewissheit*, Oxford, Blackwell, 1969 (trad. fr., *De la certitude*, Paris, Gallimard, 1982).

Fernando GIL

→ Démonstration ; Duhem ; Expérience ; Test ; Vérification ; Vérité ; Wittgenstein.

PRINCIPE ANTHROPIQUE

Le succès « populaire » du scénario du « big bang » tient certainement à ce qu'on le présente comme un récit d'origine, lequel, de proche en proche, par l'intermédiaire de la biologie moléculaire, vient nous toucher nous autres mortels.

L'histoire des pensées qui ont mené à ce scénario commence en l'occurrence très récemment, avec la formulation par Albert Einstein de la théorie relativiste de

la gravitation en 1915, puis sa confirmation observationnelle par Arthur Eddington en 1919. Les équations einsteiniennes réouvraient, en droit, à la science le champ, depuis longtemps déserté, de la cosmologie – la science qui prend le tout de l'univers comme son objet. On a vu ainsi, au cours des années 1920, se former une profusion de modèles d'univers. Dès 1917, Einstein pensait que les lois établies en ce domaine ne peuvent pas être indépendantes de la matière sur laquelle elles s'exercent ; qu'elles sont un produit de cette matière elle-même. Or, si tel était le cas, une constante comme celle de la gravitation universelle, établie par Isaac Newton, devrait être soumise, contrairement à ce qu'il croyait, à une espèce de causalité provenant de l'ensemble des masses de matière existant dans l'univers. Or, chose remarquable, Einstein recula d'abord devant les conséquences de ses propres conclusions : cet univers n'était pas stable. La cosmologie ouvrait sur une cosmogonie. Pour assurer cette stabilité, il crut indispensable d'ajouter à ses équations un terme de « répulsion gravitationnelle » ou « constante cosmologique ». Il obtenait ainsi un système indéfini stationnaire où les effets de répulsion et d'attraction se compensaient parfaitement.

Le premier à attirer l'attention sur l'arbitraire de cette constante supposée fut l'astronome et ecclésiastique belge Georges Henri Lemaître. Puis le géophysicien russe Alexandre Friedmann montra que les équations d'Einstein pouvaient recevoir toute une classe de solutions qui ne sont pas statiques, sous l'hypothèse d'une distribution uniforme de la matière dans l'univers.

L'idée que l'univers se trouvait en expansion s'imposa sur cet arrière-fond théorique grâce à la mise en service du grand télescope du mont Wilson (2,5 m) au début des années 1920. Edwin Powell Hubble observa en 1929 ce qu'on appelle la « fuite des galaxies », et établit grâce à des études de spectroscopie que la vitesse d'éloignement de chaque galaxie était proportionnelle à la distance qui nous en sépare : il calcula un coefficient de proportionnalité, appelé « constante de Hubble ».

Cette idée qui se trouve au cœur de la théorie dit du big bang se présentait comme une idée paradoxale ; une idée qui défie le sens commun. Dans le langage ordinaire, l'image de l'expansion se trouve associée à celle d'une « sortie de soi » dans quelque milieu extérieur, selon l'étymologie. Mais comment parler d'un « extérieur », lorsqu'il s'agit de l'univers ?

Toujours est-il qu'elle se trouva confirmée en 1965 par la découverte accidentelle de ce qu'on appelle « le rayonnement du fond du ciel ». Cela se fit par hasard à cause des difficultés techniques rencontrées par deux ingénieurs de la Bell Telephone Company, aux États-Unis dans le New Jersey, pour mettre au point un radiotélescope : Arno A. Penzias et Robert W. Wilson. Il s'agissait d'un rayonnement d'une intensité radio constante très faible en provenance de toutes les directions également, et semblable à celui que l'on trouverait à l'intérieur d'une enceinte (un « corps noir ») dont

les parois seraient à la température de 272 absolu (Kelvin), soit environ -270°C .

La question consista alors à trouver la source de ce rayonnement. Or, il se trouvait que, par voie purement théorique, l'Américain d'origine russe George Anthony Gamow, le 1^{er} avril 1948 dans un article publié dans la *Physical Review*, avait émis l'idée que l'abondance des éléments dans l'univers (3/4 hydrogène et 1/4 hélium) devait être rapportée à un état très primitif de ce dernier. Cette hypothèse enveloppait un scénario de dilatation : l'univers devenant de moins en moins dense (et de moins en moins chaud). Gamow avait logiquement prédit l'existence d'un rayonnement fossile à 6 K ! On dira qu'on passait du double au simple... Mais il s'agissait de valeurs extrêmement faibles. La découverte de Penzias et Wilson « confirmait » l'hypothèse de Gamow. Tout paraissait cohérent.

De ces recherches est née l'hypothèse puis le scénario standard du « big bang ». On a pu l'adosser aux recherches en physique des particules qui se déployaient notamment au CERN aux lendemains de la guerre dans les grands accélérateurs, selon la perspective de l'unification des quatre forces (ou interactions) fondamentales de la nature – la forte qui lie avec une prodigieuse intensité les éléments constituants des noyaux atomiques, et assure leur cohésion ; la faible de très courte portée et d'intensité minime qui se manifeste dans la collision de certaines particules comme les neutrinos et dans certaines réactions ou désintégrations nucléaires ; l'électromagnétique et la gravitationnelle.

Un premier pas spectaculaire a été réalisé en unifiant les interactions faibles et électromagnétiques dans l'électrodynamique quantique en faisant apparaître les bosons W et Z. Puis les physiciens ont poursuivi sur la même voie et ont réussi l'unification des deux précédentes avec l'interaction forte. D'où le schéma de la « grande unification », qui prévoit l'existence de nouveaux bosons d'une masse énorme. Impossible de produire de pareils « monstres » dans nos accélérateurs. D'où aussi l'idée qu'eurent les physiciens des particules de retourner vers les astrophysiciens. Si le big bang correspond à une température de 1027 K, de tels bosons pouvaient exister dans ces conditions ! Une nouvelle impulsion était ainsi donnée à la recherche sur l'histoire « primitive » de l'univers.

De l'ensemble de ces recherches, on a pu tirer à ce jour une version assez précise et assez sophistiquée de la période – ultra brève – correspondante. Les trois interactions s'unifieraient au-dessus de 1027 K et se sépareraient en dessous de cette valeur. Ce qui permet d'expliquer, par des raisons assez compliquées, que dans ce cosmos minuscule et superdense, ait régné une parfaite symétrie, du moins avant 10^{-35} seconde. Et que cette symétrie ait été brisée ensuite. Ce qu'on appelle « le vide quantique » aurait été symétrique avant cet instant, puis dissymétrique ensuite. Le vide aurait donc subi une « transition de phase »...

L'interprétation qui a popularisé le « sens » de ces recherches et de ce scénario depuis la fin des années

1970 porte le nom de « principe anthropique ». Il a été énoncé par l'astrophysicien britannique de Meudon, Brandon Carter. Ce principe se présente sous deux versions, l'une dite « faible », l'autre « forte ». « L'univers, écrivait Carter, doit être tel qu'il admette la présence d'observateurs en son sein à quelque étape. » Et il ajoutait : « L'existence de n'importe quel organisme qui puisse être décrit comme un observateur ne sera possible que pour certaines combinaisons restreintes de paramètres. » De là, l'énoncé du principe en sa version faible : « Ce que nous devons nous attendre à observer doit être restreint par les conditions nécessaires à notre présence comme observateurs. »

Cette version du « principe » anthropique, prise au pied de la lettre, pose simplement que les propriétés qui sont effectivement observées sont celles que la structure et la situation particulières de l'observateur lui permettent de percevoir. Principe épistémologique général qui, dans le cas de la cosmologie, peut se traduire ainsi : ce qui nous apparaît de l'univers est nécessairement un état compatible avec notre existence, en tant qu'êtres vivants et percevants. Or, nous savons que cette existence n'a été possible et ne reste possible qu'à l'intérieur d'un intervalle temporel correspondant à une phase (très récente) de son évolution. Car, compte tenu du scénario évolutif de l'univers en expansion et de ce que nous savons de la composition chimique du vivant, nous pouvons déterminer le temps nécessaire à la formation dans les étoiles, à partir de noyaux d'hydrogène et d'hélium, des noyaux de carbone et de ceux des autres éléments qui constituent les molécules organiques : il faut compter environ 10 milliards d'années. D'où la thèse que la vie ne pourrait pas exister dans un univers plus petit ; donc, que dans un univers qui se limiterait à notre galaxie, aucun « observateur » n'aurait pu apparaître.

La biochimie a ainsi apporté son tribut à cette thèse. Depuis l'expérience de l'Américain Stanley Miller en 1952, nous savons en effet que les constituants principaux de l'atmosphère terrestre primitive (méthane, ammoniac, hydrogène et eau) sont susceptibles, soumis à des orages, de donner lieu à des composés organiques complexes. La toute nouvelle « exobiologie » a fait de son côté apparaître l'existence de molécules organiques dans l'atmosphère interstellaire, et l'examen des micro-météorites a pris du coup un intérêt immense.

Mais voici la version « forte » dudit principe : « La présence d'observateurs dans l'Univers impose des contraintes, non seulement sur leur position temporelle mais aussi sur l'ensemble des propriétés de l'univers. » Cette version a gagné beaucoup d'audience parce qu'elle s'accorde bien à une interprétation répandue du big bang, fruit, comme on l'a vu, de la coopération entre astrophysiciens et physiciens des particules. À mesure qu'on entrait dans les détails du processus supposé amorcé après la « brisure de symétrie », au sortir du vide quantique, on s'apercevait que si, lorsque la température est « tombée » à 1010 K, il n'y avait pas eu un très léger (et complètement énigmatique) excès de matière par rapport à l'antimatière, le

processus qui a suivi n'aurait pas pu s'enclencher... Quant à ce processus lui-même, on voyait aussi comment, sur cette base, s'y était ajustées, au prix d'une succession vertigineuse de hasards minutieux, les constantes universelles qui régissent notre univers.

Soit l'exemple de la constante de couplage électromagnétique. Cette constante dépend de la chaleur et de la charge de l'électron. Si cette valeur était trois fois plus grande qu'elle ne l'est en réalité, les noyaux d'hélium ne pourraient pas subsister et donc les noyaux les plus lourds, tels que ceux du carbone, ne pourraient certainement pas exister. Si elle était trois fois plus petite, aucun atome neutre ne pourrait exister de façon stable, ce qui rendrait la vie impossible. La valeur de la constante de couplage électromagnétique s'avère ainsi confinée dans un intervalle relativement étroit autour du nombre qui a été calculé sur la base de l'observation.

En quel sens peut-on dire que le principe anthropique est un « principe » ? En physique classique, on appelait « principe » un ensemble d'énoncés premiers (définitions, axiomes ou lois...) qui rendaient compte de la nécessité des connexions établies entre des phénomènes. En physique quantique, la situation n'est pas, sur le fond, très différente malgré les apparences : il s'agit d'exprimer la dynamique qui sous-tend les phénomènes, c'est-à-dire la manière dont s'effectue, dans le temps, la transition d'un état à un autre – même si les calculs sont probabilistes. Il s'agit toujours de faire apparaître la « nécessité » de connexions dans ce qui apparaît d'abord comme contingent.

Bien différent apparaît le « principe » anthropique dans sa version forte. Destinée à expliquer certains « faits », il s'appuie en effet lui-même sur un fait actuellement constaté. Il affirme l'existence d'un lien entre ce fait et ceux qui sont à expliquer. On dira qu'il fait ainsi apparaître une nécessité. Ce n'est pourtant pas celle qui lie un antécédent à un conséquent, mais bien plutôt le lien supposé d'un état de choses à ses conditions d'apparition. Ce raisonnement procède donc à rebours de la logique en usage dans la physique. La nécessité n'est ici que le masque de la finalité. Le raisonnement n'est pas « déterminant » mais téléologique.

Le raisonnement part de l'apparition, à un certain moment et en un certain lieu, d'êtres vivants. Comme les conditions initiales et la valeur des constantes fondamentales apparaissent comme très improbables, on les rattache à une singularité dans l'univers, à laquelle on attribue un sens mais uniquement grâce à une autre singularité : la présence d'« observateurs ». Autrement dit le vocable de « nécessité » change de signification : l'univers est constitué de telle façon que la vie doit apparaître. Il s'agit bien d'une obligation, d'un « devoir-être », qui résulte rétrospectivement du constat d'un fait. En ce fait, est supposé se révéler le sens – la direction et la signification – du processus tout entier.

Mais quel est le présupposé de ce raisonnement sinon que ce fait ultime constaté à lui-même une valeur

éminente ? Et comme il s'agit de « notre » existence, on voit qu'il s'agit d'un renouveau de l'anthropocentrisme. À lire certains textes actuels, on croirait entendre l'écho assourdi des textes les plus mystiques de Kepler au début du XVII^e s. Ne savons-nous pas, demandait-il, que Dieu a créé dans l'homme, son image et ressemblance, la « créature contemplative » capable de le comprendre et qu'il a, inversement, créé le monde en fonction de cette « créature contemplative » ? Il se devait donc de la placer dans une situation qui lui permettrait d'atteindre son but suprême, la contemplation intellectuelle de l'œuvre de Dieu. De là, le rôle clé de la Terre, demeure de cette créature, dans la structuration du monde. De l'*Harmonice Mundi* à la *Mélodie secrète* de Trinh Xuan Thuan, la musique cosmo-théologique n'a guère connu de variation notable... L'aventure cosmique se trouve réinterprétée en terme généalogique : en l'origine se réfléchit la fin, le fait du commencement n'est que l'ombre portée du jugement que nous portons sur cette fin.

Cette argumentation philosophique abstraite suffirait à récuser la version forte du principe anthropique. Mais on peut la renforcer avec d'autres arguments. Ils visent au premier chef le statut de la singularité initiale. Peut-on dire qu'elle soit un « instant » ? En réalité cette singularité nous la devons à des équations, lesquelles nous permettent de décrire l'évolution de l'univers en fonction du paramètre temps. Or, il existe une valeur de ce temps pour laquelle ces équations cessent d'être valables. Autrement dit, le fameux « instant », auquel nous renverrait cette singularité, nous ne pouvons pas l'atteindre. Comme le dit Jean-Marc Lévy-Leblond : « Il n'appartient pas à la gamme des temps que décrit la théorie. » Il n'est « limite » qu'au sens où nous disons que l'horizon est une limite. Qui a jamais pu atteindre « son » horizon, puis se retourner, pour regarder le monde qu'il aurait laissé derrière lui ? La question de savoir ce qu'il y a au-delà n'a d'autre sens que de signifier notre peur de penser l'infini.

Nous voici en mesure de donner un sens fécond à la version faible du principe anthropique. Ce que notre physique formule en guise de lois ce ne sont pas, comme on a coutume de le dire dans un vocabulaire hérité de la théologie thomiste, les « lois de la nature » que seul un être extérieur à l'univers pourrait énoncer « objectivement », mais plutôt des concepts coordonnés, lesquels sont déterminés par notre façon de nous y prendre avec le monde qui est le nôtre pour le connaître. Que nous butions sur des limites « absolues », comme la valeur de la vitesse de la lumière, devrait rappeler les physiciens à la modestie. Ils n'occuperont jamais la place que les fidèles ont attribuée à Dieu...

On dira que ce tableau est « blessant ». En ce qu'il nous faut alors admettre que nous ne sommes que des accidents dans une histoire qui ne se souciait point de notre venue et restera pour l'essentiel indifférent à notre passage ? Sans doute. Mais, outre que, contrairement à ce que pensait par exemple Jacques Monod, nous n'avons aucune raison de penser que nous soyons

« seuls » dans l'univers, et que reprenne ainsi vigueur la vieille thèse libertine de la pluralité des mondes, ce n'est pas « nous », mais notre narcissisme qui se trouve « blessé ».

En adossant la généalogie de chacun à la grande fable d'une filiation cosmique d'ailleurs asexuée, le scénario du big bang ne vient-il pas, après tant d'autres récits, apaiser les angoisses dont les épisodes douloureux de l'aventure de notre vie nous charge tous, chacun pour soi ? Ne vient-il pas renouveler les grands récits d'origine que furent les plus puissants mythes de la Grèce antique ? Car ces mythes jouent, eux aussi, du hasard et de la nécessité repris, conjurés, sous les espèces du temps et du destin.

Platon a rapporté, à sa façon, l'un des plus beaux de ces mythes, dans les dernières pages de la *République*. Er, fils d'Amérios, originaire de Pamphylie, était mort dans une bataille. Douze jours plus tard, il ressuscita d'entre les morts et raconta « ce qu'il avait vu là-bas », dans le lieu divin où séjourner les âmes délivrées de leur corps. Il y avait eu d'abord, comme il se doit, le tribunal, le jugement, les châtements et les récompenses à proportion des injustices commises. Puis vient le moment (620 e) où les âmes ont à choisir la condition qui sera la leur dans la vie qui les attend lorsque, au terme de leur séjour, elles auront à s'unir à nouveau à un corps. « Spectacle qui valait la peine d'être vu », rapportait Er, « car il était pitoyable, ridicule et étrange ». Voici l'âme d'un chanteur célèbre qui choisit d'être rossignol, celle d'un cygne qui veut devenir homme... Chacune voyait alors le destin qu'elle avait choisi ratifié en passant sous le trône de la Nécessité. Puis il lui fallait se rendre dans la plaine du Lethé et y boire l'eau du fleuve de l'Oubli. « Quand on se fut endormi, et que vint le milieu de la nuit, un coup de tonnerre éclata, accompagné d'un tremblement de terre, et les âmes soudain lancées dans les espaces supérieurs vers le lieu de leur naissance, jaillirent comme des étoiles. » La pensée occidentale n'a sans doute jamais cessé de ressasser les motifs ambigus du mythe d'Er : vivons-nous sous l'empire de la Nécessité qui rend notre liberté illusoire ? Ou au contraire ce que nous appelons notre Destin n'est-il que le fruit d'un choix qui nous a appartenu, mais d'une volonté qui s'est recouverte elle-même du voile de l'Oubli ?

► COHEN-TANNOUDJI G., *Les constantes universelles*, Paris, Hachette « Pluriel », 1998. — EINSTEIN A., *Œuvres complètes*, dir. F. Balibar, Paris, Le Seuil/CNRS, 6 vol., 1989-1991. — FRIEDMANN A. & LEMAÎTRE G., *Essai de cosmologie*, précédé de *L'invention du big bang* par J.-P. Luminet, Paris, Le Seuil, 1997. — HAWKING S., *Une brève histoire du temps. Du big bang aux trois noirs*, Paris, Flammarion, 1989. — HEIDMANN J., *La vie dans l'univers*, Paris, Hachette, 1990. — LACHÛZE-REY M. & GUNZIG E., *Le fond diffus cosmologique*, Paris, Masson, 1995. — LACHÛZE-REY M. & KLEIN E., *Propos sur l'unité : la physique en marche*, Paris, Albin Michel, 1996. — NEWTON I., *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, Londres, Société Royale, 1687, 1713 ; 3^e éd., 1926. — SCHATZMAN E., *L'expansion de l'univers*, Paris, Hachette, 1989. — SCHNEIDER J. et al., *Aux confins de l'univers*, Paris, Fayard/la Nouvelle Encyclopédie

Diderot », 1987. — THUAN T.X., *La mélodie secrète*, Paris, Le Seuil, 1988. — WEINBERG S., *Les trois premières minutes de l'univers*, Paris, Le Seuil, 1979.

Dominique LECOURT

→ Big bang ; Constante de Hubble ; Expansion de l'univers ; Univers.

PRION

Le terme de prion (*proteinaceous infectious particle*) fut proposé en 1982 par le biologiste américain Stanley Prusiner pour désigner l'agent pathogène responsable de différentes maladies neurodégénératives — le kuru, décrit chez les papous de Nouvelle-Guinée et transmis par cannibalisme, la tremblante du mouton ainsi que les maladies dérivées obtenues par injection directe de l'agent pathogène chez la souris ou le hamster. Le terme fut choisi pour signifier que toutes les expériences semblaient montrer que l'agent pathogène ne contenait pas d'acides nucléiques, n'était ni un virus, ni une bactérie, mais était seulement formé de protéine(s). Depuis cette date, la liste des maladies engendrées par des prions s'est allongée. La maladie de Creutzfeldt-Jakob, connue depuis longtemps chez l'homme comme une maladie sporadique ou familiale, se révélait (accidentellement) transmissible par des extraits d'hypophyses. La maladie de la vache folle, d'origine encore inconnue, a connu un développement foudroyant dans l'espèce bovine, à cause du recyclage de l'agent pathogène par l'alimentation. Enfin, une nouvelle variante de la maladie de Creutzfeldt-Jakob, apparue depuis 1996, résulte très probablement de la transmission de la maladie bovine à l'homme.

Aucune étude n'a apporté d'arguments convainquants en faveur de la présence d'un acide nucléique dans les extraits infectieux de ces différents organismes. Au contraire, tous les travaux ont montré la place centrale occupée par une protéine, la protéine dite prion, présente chez tous les animaux, même sains. L'hypothèse de Stanley Prusiner s'est donc précisée : cette protéine pourrait exister sous plusieurs formes, une forme normale, non pathogène, et différentes formes pathogènes. Ces formes pathogènes seraient capables, seules ou en association avec d'autres protéines, de convertir la forme normale de la protéine prion en leur propre forme pathogène, engendrant ainsi le développement de la maladie et lui donnant son pouvoir infectieux.

Le phénomène prion pose deux problèmes, l'un direct et précis, l'autre plus éloigné, mais plus fondamental. Le premier est de comprendre comment une protéine peut « insuffler » à d'autres protéines sa forme. Différents modèles ont été proposés, mais aucun n'est encore démontré. Le deuxième problème est d'ordre général : si la forme d'une protéine peut provenir, non de l'information contenue dans un acide nucléique, mais d'une autre protéine, le rôle essentiel

des acides nucléiques, de l'ADN, dans les phénomènes héréditaires est remis en cause.

Si le phénomène prion est confirmé, il est clair qu'un des « dogmes » de la biologie moléculaire aura été violé. La question importante est de déterminer la généralité du phénomène. Existe-t-il d'autres exemples d'une telle hérédité protéique ? Quelle place occupent-ils dans l'ensemble du monde vivant ?

Des phénomènes de type prion, impliquant la transmission héréditaire d'une forme protéique en l'absence de tout acide nucléique, ont été décrits chez la levure et, tout récemment, chez les champignons. S'agit-il simplement des premiers cas d'une cohorte d'observations encore à venir ? Nous ne le pensons pas : les organismes — *Drosophile*, levure — choisis par les généticiens comme modèles ont été tellement étudiés qu'il est peu probable que de tels phénomènes aient pu passer inaperçus. Quelle que puisse être leur importance en pathologie — comme on le voit avec la maladie de la vache folle —, il est peu probable que ces phénomènes d'hérédité protéique occupent une place importante dans l'ensemble des phénomènes héréditaires caractéristiques du monde vivant. Leur découverte a cependant un mérite : elle nous rappelle que les gènes, l'ADN, sont une invention tardive de l'évolution pour assurer précision et fiabilité à la reproduction des organismes vivants. L'existence d'un processus héréditaire est la conséquence d'un phénomène de reproduction, non la cause. L'hérédité reposant sur le codage d'une information dans des molécules d'acide nucléique s'est imposée car elle était le mécanisme le plus fidèle, le plus efficace. D'autres formes d'hérédité étaient sans doute possibles : l'hérédité protéique, observée dans les maladies à prions, était une autre forme d'hérédité. Elle n'a pas connu le même succès évolutif que l'hérédité reposant sur des séquences d'acides nucléiques.

► HORWICH A.L. & WEISSMAN J.S., « Deadly conformations — Protein misfolding in prion disease », *Cell*, vol. 89, p. 499-510. — LINDQUIST S., « Mad cows meet psi-chotic yeast : the expansion of the prion hypothesis », *Cell*, vol. 89, p. 495-498. — PRUSINER S.B., « Novel proteinaceous infectious particles cause scrapie », *Science*, vol. 216, 1982, p. 136-144.

Michel MORANGE

→ Épidémie ; Micro-organisme.

PRIX NOBEL DES SCIENCES

Le prix Nobel a été institué par Alfred Nobel. Dans son testament (1895), Nobel mentionne cinq prix, dont trois se rapportent aux sciences exactes : physique, chimie et physiologie ou médecine. Les deux autres prix devaient être attribués pour la littérature et pour la paix. Les premiers prix Nobel sont décernés en 1901. Ils sont considérés, dès le début, comme la plus grande récompense scientifique que l'on puisse obtenir, surtout au regard de la somme engagée : à l'époque, le prix

équivalait au salaire annuel de vingt professeurs. De nos jours, il dépasse les 5 millions de francs.

Le système de sélection

Les prix de physique et de chimie sont décernés par l'Académie royale des sciences de Suède, celui de « physiologie ou médecine » par l'Institut Karolinska. Durant la première étape qui mène au choix des lauréats, les comités Nobel (un par prix, chacun composé de cinq membres de nationalité suédoise) invitent des scientifiques de différentes nationalités à donner les noms de lauréats potentiels. Ces scientifiques, les « nominateurs », peuvent être soit permanents soit appelés à faire des propositions pour une année donnée. Les comités Nobel commencent à évaluer les propositions dès la fin de la période des nominations, le 1^{er} février de chaque année. Au début de l'automne, ils recommandent un ou plusieurs candidats à l'Académie et à l'Institut Karolinska. Les décisions finales sont prises par les membres de l'Académie et de l'Institut lors d'une réunion plénière. Elles sont annoncées au mois d'octobre et les prix sont décernés lors d'une cérémonie organisée à Stockholm le 10 décembre (jour anniversaire de la mort d'Alfred Nobel). Lors de cette cérémonie les lauréats donnent une conférence publique (les conférences Nobel) qui porte sur le travail qui a remporté le prix.

Découvertes, inventions et progrès

Selon le testament d'Alfred Nobel, les prix doivent être décernés à l'auteur d'une découverte ou d'une invention. Cependant, la plupart des travaux distingués par le prix Nobel en sciences physiques rentrent dans la catégorie des « découvertes », c'est-à-dire qu'ils sont le résultat de recherches fondamentales. En médecine, Nobel donne la priorité à la « physiologie », une science considérée à l'époque comme une branche essentielle de la recherche et de la pratique médicale. Cette volonté indique que la recherche fondamentale devait être privilégiée par rapport à la recherche clinique. Les premiers travaux récompensés en physique et en chimie sont souvent issus des sciences expérimentales. Il s'agit d'une conséquence des préférences des comités pour l'expérimentation, d'une part. Mais d'autre part, d'importantes découvertes venaient d'être réalisées à partir d'une approche expérimentale : les nouveaux phénomènes des rayons X, de la radioactivité ou de l'électron (pour les prix de W.C. Röntgen, Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie, et J.J. Thomson). Au début des années 1920, le Comité Nobel de physique surmonte ses doutes quant aux travaux théoriques et recommande Albert Einstein (prix Nobel de physique [Ph] 1921) et Niels Bohr (Ph 1922) pour leur nouvelle théorie de l'atome. Depuis la Seconde Guerre mondiale, les prix de physique et de chimie récompensent, de façon alternative, les travaux expérimentaux et les travaux théoriques.

Proportionnellement, peu de prix ont récompensé

des inventions qui résultent de recherches industrielles ou technologiques. En physique, une proportion importante des prix relatifs à des inventions correspond à des innovations capitales dans l'instrumentation et la recherche technologique : par exemple, les instruments optiques de précision (A.A. Michelson, Ph 1907), la spectroscopie (Manne Siegbahn, Ph 1924), les cyclotrons (Ernest O. Lawrence, Ph 1939) et les détecteurs de particules (C.T.R. Wilson, Ph 1927, P.M.S. Blackett, Ph 1948, Dobald Glaser, Ph 1960, et Georges Charpak, Ph 1990).

Nombre, nationalité, et sexe des lauréats

En 1996, 416 personnes avaient déjà reçu un prix en physique, en chimie et en physiologie ou médecine. Le nombre de lauréats semble beaucoup trop élevé si on le rapporte au nombre d'années durant lesquelles le Nobel a été décerné. Ceci tient à la pratique de la division des prix. Les statuts de la Fondation Nobel indiquent en effet que le prix peut être partagé entre trois personnes au plus. Cette règle ne permet donc pas de récompenser tous les grands groupes de recherche qui, de nos jours, sont à la base des travaux reconnus dans les trois disciplines : seuls les dirigeants ou les leaders de ces groupes reçoivent le prix. Trois personnes (Marie Curie, Ph 1903 et Ch 1911, John Bardeen, Ph 1956, 1972, et Frederick Sanger, prix Nobel de chimie [Ch] 1958 et 1980) ont reçu un second prix Nobel, mais c'était pour un nouveau travail scientifique. La nationalité des lauréats reflète la domination de certaines nations dans le développement scientifique. Le décompte des Nobel est souvent utilisé comme un indicateur des performances scientifiques d'un pays, même si le faible nombre de prix devrait limiter la validité de cette appréciation. Jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, on trouve le plus grand nombre de lauréats en Allemagne. Les Américains commenceront à dominer après la Seconde Guerre seulement. Seize scientifiques français ont reçu le prix durant la première période (1901-1945), contre neuf seulement durant la seconde (1946-1996). Par comparaison aux grandes nations, le nombre de lauréats travaillant dans de petits pays (tels que la Hollande, la Suisse ou la Suède) apparaît très disproportionné lorsqu'il est rapporté à la population totale. En outre, quelques grandes nations, très peuplées, comptent un très petit nombre de lauréats. Depuis que le prix Nobel a été créé, seuls neuf scientifiques vivant en Russie ont été primés. À ce jour, aucun chercheur chinois habitant en Chine n'a encore reçu cette distinction. On trouve peu de femmes parmi les personnes primées en physique et en chimie. Seulement six Nobel ont été attribués à des femmes, dont deux à la même personne (Marie Curie, Ph 1903 et Ch 1911). Les quatre autres prix ont été décernés à Dorothy C. Hodgkin (Ch 1964), Maria Goeppert-Mayer (Ph 1963), Rosalyn Yalow (prix Nobel de médecine [M] 1977) et Barbara McClintock (M 1983).

Les lauréats Nobel : une super-élite

Le prix Nobel est le plus important de tous les prix et autres récompenses décernés aux scientifiques (membre honoraire d'une société savante, docteur *honoris causa*, etc.). Il offre de ce fait un très grand prestige et beaucoup de « visibilité » aux lauréats. On peut donc parler d'une super-élite scientifique. Aux États-Unis, en particulier, les lauréats Nobel sont très haut placés en termes d'influence, d'autorité, de pouvoir et de prestige. Outre la somme considérable d'argent impliquée, la remise du prix Nobel a d'importantes conséquences pour le lauréat. On a remarqué que, souvent, sa productivité scientifique décline durant les années qui suivent la remise du prix. Ceci tient aux énormes demandes qui limitent son temps de travail. Toutefois, la remise du prix a toujours un effet bénéfique sur le laboratoire, le département ou l'université du lauréat. Il sert d'amorce à de nouveaux financements, et le laboratoire ou le département impliqué devient plus attractif pour les étudiants et les jeunes chercheurs.

Les historiens des sciences considèrent que les prix Nobel reflètent, de façon générale, les avancées majeures dans les sciences physiques et biomédicales au XX^e s. Alors que le prix Nobel va entrer dans son deuxième siècle d'existence, des faiblesses deviennent apparentes. Elles tiennent principalement au nombre restreint des domaines considérés, imposé par Alfred Nobel. En particulier certains champs de recherche actuels, dont l'évolution est très rapide, sont encore exclus du prix (comme la biologie, la cosmologie et les sciences de l'environnement).

► CRAWFORD E., *La Fondation des prix Nobel scientifiques, 1901-1915*, Paris, Belin, 1988. — MAGILL F.N. dir., *The Nobel prize winners, Physics*, Pasadena (CA), Salem Press, 3 vol., 1989 ; *The Nobel prize winners, Chemistry*, Pasadena (CA), Salem Press, 3 vol., 1990 ; *The Nobel prize winners, Physiology or medicine*, Pasadena (CA), Salem Press, 3 vol., 1991. — SCHÜCK H. et al., *Nobel, l'homme et ses prix*, Paris, Presses du Compagnonnage, 1965. — ZUCKERMAN H., *Scientific elite: Nobel laureates in the United States*, New York, Free Press, 1977. — Coll. : *Les prix Nobel 1901- (1904-...)*, Stockholm, Norstedts, Almqvist & Wiksell International (depuis 1977).

Élisabeth CRAWFORD

→ Découverte ; Nobel.

PROBABILITÉ

LOGIQUE/MATHÉMATIQUES

Selon le sens qu'elle a dans le langage courant, l'idée de probabilité comporte une double signification : selon le contexte elle renvoie à un certain état de la connaissance ou à une certaine qualification du possible. On pourrait dire que la première est épistémologique et la seconde événementielle. La probabilité épistémologique est intermédiaire entre la certitude et son contraire, relativement à la vérité d'une proposition.

mais appuyée sur des raisons qui pèsent plutôt dans le sens de la certitude. La probabilité événementielle est la propriété d'un état de choses qui rend la possibilité de l'occurrence de cet événement plus forte que celle de sa non-occurrence. Cette dualité de significations se retrouve, comme on va le voir, dans l'analyse critique du concept de probabilité. C'est au cours du XVII^e s. que commence à s'élaborer une théorie scientifique, et même plus précisément mathématique de la probabilité, à partir de certains problèmes suggérés par les jeux de hasard. Les bases de la théorie dite « classique » ont été élaborées par Pascal (1623-1662), Fermat (1601-1665), Jacques Bernoulli (1654-1705) et Laplace (1749-1827).

Dans son *Essai* de 1814, Laplace définit la probabilité d'un événement, appartenant à une classe d'événements « également possibles », comme le rapport du nombre d'occurrences effectives (de « cas favorables ») au nombre d'occurrences possibles (de « cas possibles ») de cet événement. Le « calcul des probabilités » donne le moyen de déterminer numériquement la probabilité d'un événement complexe à partir des probabilités des événements élémentaires qui le constituent. Ainsi, si l'on considère des événements constitués à partir d'une classe d'événements élémentaires E_i ($i = 1, 2, \dots, n$), soit disjonctivement (du type « E_i ou E_j ») soit conjonctivement (du type « E_i et E_j »), leurs probabilités sont données respectivement par addition ou par multiplication. En notant par $P(x)$ la probabilité d'un événement x , on a les propriétés suivantes : 1) sous la condition que E_i et E_j s'excluent mutuellement, $P(E_i \text{ ou } E_j) = P(E_i) + P(E_j)$; et 2) sous la condition que E_i et E_j soient indépendants l'un de l'autre, $P(E_i \text{ et } E_j) = P(E_i) \times P(E_j)$. La difficulté majeure que présente cette définition c'est qu'elle fait intervenir l'équipossibilité des événements pris en considération. Si on identifie « équipossibilité » à « équiprobabilité » la définition est circulaire. Laplace lui-même fait appel, pour expliquer cette condition, à un « principe d'indifférence » : nous n'avons pas de raisons d'accorder une probabilité plus grande à un événement qu'à un autre. La présupposition qu'introduit un tel principe est relative à un certain état de connaissance : l'indifférence traduit une absence d'informations suffisantes. Pour donner au concept de probabilité un statut objectif, on a eu recours soit à l'idée d'une vérification statistique (dans des épreuves répétées les différents événements apparaissent avec la même fréquence), soit à l'idée d'une information préalable (connaissance des conditions de production de chacun des événements, permettant de conclure que tous ont des chances égales de se produire). Dans le premier cas, on s'engage sur la voie d'une conception fréquentielle (dont il sera question ci-dessous), qui a ses difficultés propres. Dans le second cas, on introduit un critère qui n'est guère utilisable que dans des cas élémentaires, comme celui d'un jet de dés. Jacques Bernoulli a établi un théorème de grande signification, appelé loi des grands nombres, qui établit une relation précise entre la notion de probabilité et la notion de fréquence relative. La fréquence relative d'un événement E dans une série d'épreuves est le

rapport du nombre d'occurrences de cet événement au nombre d'épreuves. Si n est le nombre d'épreuves et m le nombre d'occurrences de E , la fréquence relative de E est m/n . Le théorème de Bernoulli prend en considération la différence entre la fréquence relative d'un événement et sa probabilité théorique (supposée déterminée conformément aux principes de la théorie de la probabilité). Le théorème affirme que la probabilité (du second ordre en quelque sorte) pour que cette différence tende vers zéro se rapproche de plus en plus de 1 (c'est-à-dire de la certitude) lorsque le nombre d'épreuves augmente indéfiniment.

La théorie moderne de la probabilité s'est orientée dans différentes directions, en prenant comme fil conducteur soit l'idée de fréquence, soit l'idée de rapport logique entre propositions, soit l'idée de degré de croyance rationnelle. Dans son ouvrage capital de 1950 Carnap a clarifié considérablement la situation en introduisant une distinction tranchée entre deux formes de probabilité qu'il a proposé de désigner par les expressions probabilité, et probabilité. Il s'agit d'une part de la probabilité logique et d'autre part de la probabilité fréquentielle. La théorie de la probabilité fréquentielle a été développée principalement par von Mises, Kolmogorov et Reichenbach, et la théorie de la probabilité logique l'a été principalement par Keynes, Jeffreys et Carnap. Dans les deux directions, la construction est axiomatique. On peut ainsi distinguer le noyau mathématique de la théorie, qui est de nature purement formelle, et les interprétations de l'axiomatique qui sont déterminantes pour les applications qui sont faites de l'une et l'autre formes de probabilité, d'une part dans les recherches relatives à la logique inductive, d'autre part dans les sciences empiriques et surtout en physique. L'idée de croyance rationnelle est à la base de la théorie de la probabilité dite « subjective », dont les fondements ont été établis par de Finetti. Par plusieurs de ses traits fondamentaux cette théorie se rattache à la probabilité.

Carnap fonde sa propre construction axiomatique sur une analyse préalable de l'*explicandum*, à partir de laquelle sont précisées les conditions auxquelles doit répondre une théorie satisfaisante de la probabilité logique. (Carnap considère du reste que sa conception de la probabilité est « tout à fait proche » de celle de Reichenbach, qui est un des principaux représentants de la conception fréquentielle.) L'analyse proposée consiste à expliquer l'expression $P(h,e)$, dans laquelle P est une fonction qui représente la probabilité logique, h une hypothèse et e l'ensemble des informations disponibles. Dans « My basic conceptions of probability and induction » (Schilpp, 1963, p. 966-978), quatre significations sont associées à cette expression. 1) $P(h,e)$ est la mesure selon laquelle les informations e apportent une confirmation à l'hypothèse h . Ou, équivalamment, c'est la mesure du degré de croyance qu'une personne X peut accorder à h sur la base de e . 2) $P(h,e)$ est un quotient de pari juste relativement à h . (X_1 promet à X_2 de lui donner u_1 si h ne se réalise pas et X_2 promet à X_1 de lui donner u_2 si h se réalise. Le

quotient de pari est le rapport $u_i/u_1 + u_2$. Un quotient de pari est juste s'il est également profitable aux deux partenaires. On peut montrer que si le quotient de pari est égal à la probabilité de h sur la base de e , cette condition est réalisée.) 3) Supposons que h soit une prédiction singulière attribuant une propriété K à un certain individu non mentionné dans e . $P(h, e)$ peut être interprété comme une estimation de la fréquence relative de K dans une classe quelconque formée d'éléments non mentionnés dans e . (L'estimation est la somme des produits formés en multipliant chacune des valeurs possibles de la fréquence relative par la probabilité d'occurrence de cette valeur relativement à e .) 4) Enfin $P(h, e)$ peut être interprété comme une probabilité subjective ou personnelle, plus exactement comme une fonction de crédibilité. (Supposons qu'un agent X ait le choix entre n actions a_i et que le résultat de chacune de ces actions dépende de l'occurrence d'un des m événements e_j , sans que X sache lequel de ces événements se produira. Soit r_{ij} le résultat de l'action a_i lorsque l'événement e_j s'est produit. On suppose qu'il existe une fonction U associant à chaque résultat son utilité pour X , et qu'il existe une fonction C associant à chacun des événements possibles e_j sa crédibilité, c'est-à-dire le degré de croyance de X dans cet événement. On pourra alors définir la valeur subjective de l'action a_i pour X comme l'estimation de son utilité, obtenue en faisant la somme, pour les m événements possibles e_j , des produits de l'utilité du résultat r_{ij} par la crédibilité de e_j . Et on pourra alors formuler un critère de choix rationnel pour X : choisir l'action dont la valeur subjective est maximale.)

La définition de la probabilité logique consiste en la définition, par voie axiomatique, d'une fonction $c(h, e)$, dont la valeur dépend entièrement des relations logiques entre h et e , et dont les propriétés reflètent de façon suffisante les différents aspects de l'*explicitandum*. La construction s'effectue dans le cadre d'un langage dont la structure syntaxique est spécifiée de façon précise, et contenant un nombre fini de prédicats. On envisage d'abord un langage contenant un nombre fini d'individus. Le cas général s'obtient par passage à la limite. Une description d'état est une proposition indiquant comment les prédicats se distribuent entre les individus. Une description de structure est une description qui caractérise ce qu'il y a de commun à des descriptions d'état isomorphes: elle consiste en la disjonction des descriptions d'état isomorphes à une description d'état donnée. L'étendue logique d'une proposition est la classe des descriptions d'état dans lesquelles cette proposition est vraie. On se donne d'abord une fonction de mesure sur les descriptions d'état: c'est une fonction qui fait correspondre à chaque description d'état un nombre réel compris entre 0 et 1. On peut alors définir une mesure de l'étendue d'une proposition: c'est une fonction qui fait correspondre à chaque proposition non contradictoire la somme des mesures des descriptions d'état dans lesquelles cette proposition est vraie (et qui donne la valeur 0 aux propositions contradictoires). Une

fonction $c(h, e)$ peut alors être définie comme le rapport entre la mesure de la conjonction « h et e » et la mesure de e . Ce rapport donne la proportion, par rapport à l'étendue logique de e , de la partie de celle-ci qui appartient aussi à l'étendue logique de h . Il exprime donc exactement le soutien que e donne à h .

L'objectif poursuivi par Carnap est de construire, sur la base du concept de probabilité logique, une théorie dans le cadre de laquelle peuvent être formulées de façon précise les différentes espèces d'induction logique et en particulier les différentes formes d'inférence statistique. Pour réaliser cet objectif il introduit des conditions supplémentaires sur la fonction de confirmation c , et en particulier une condition de symétrie, imposant l'invariance de la fonction pour tout remplacement des constantes individuelles contenues dans e et h par d'autres. En imposant de plus à la fonction de mesure de prendre la même valeur pour toutes les descriptions de structure, Carnap aboutit à la définition d'une fonction de confirmation c^* , qui est à la base de son système de logique inductive: c'est la fonction fondée sur une fonction de mesure m^* pour les descriptions d'état, définie par: $m^*(D_i) = 1/sd_i$, où s est le nombre de descriptions de structure dans le langage considéré et d_i le nombre de descriptions d'état isomorphes à D_i . L'une des difficultés du système de Carnap c'est qu'il donne la valeur 0 à une hypothèse de forme universelle (dans le cas d'un langage avec une infinité de constantes individuelles) quel que soit e . Hintikka a montré que cette difficulté peut être éliminée moyennant une généralisation appropriée de la forme des descriptions d'état.

La probabilité fréquentielle d'un événement E est définie comme la limite de la fréquence relative d'occurrence de E dans une suite de n épreuves lorsque n augmente indéfiniment. L'intérêt de cette conception c'est qu'elle permet d'établir une connexion étroite entre la théorie mathématique de la probabilité et ses usages empiriques, qui se sont révélés particulièrement fructueux en physique (mécanique statistique, théories quantiques, etc.). C'est von Mises qui, dès 1919, a donné une forme systématique à la théorie fréquentielle, sur base axiomatique. Le concept de base est celui de collectif. Un collectif est une suite infinie d'éléments, représentant les résultats possibles d'une expérience répétée indéfiniment. Deux axiomes essentiels précisent les conditions que doit remplir un collectif: 1) pour chaque propriété A , représentée par une sous-suite dans un collectif K , la limite de la fréquence relative de A dans K existe; 2) ces limites demeurent inchangées pour les sous-suites prélevées dans K . Cette deuxième condition exprime le caractère aléatoire du collectif. En 1933 Kolmogorov a proposé un système axiomatique pour la probabilité fondé sur la théorie mathématique de la mesure. Il est formulé d'une manière entièrement formelle et définit la probabilité comme une fonction de mesure, définie sur un espace abstrait (qui représente l'ensemble des événements, lesquels peuvent être constitués d'un ensemble infini d'événements élémentaires) et soumise à

certaines conditions. Ces conditions définissent des champs infinis de probabilité. Dans les années 1960, Kolmogorov est revenu au problème de la caractérisation d'une suite aléatoire, qui a été l'objet, à la suite des travaux de von Mises, de beaucoup de discussions et de recherches. Il a introduit un nouveau point de vue, prenant appui sur la théorie de la calculabilité et des automates. Et il propose le critère suivant (proposé aussi de manière indépendante par Chaitin): une suite est aléatoire (ou irrégulière) lorsque le plus petit algorithme nécessaire pour la calculer contient approximativement la même information que la suite elle-même (de telle sorte que la façon la plus brève de caractériser la suite reviendrait à peu près à l'écrire). On a d'ailleurs montré qu'il est possible de définir directement la notion de probabilité en termes d'algorithmes d'évaluation. Les idées fondatrices gardent néanmoins toute leur pertinence.

L'utilisation du concept de probabilité dans les sciences empiriques pose la question du fondement de l'applicabilité de ce concept. Il faut mentionner tout particulièrement à ce propos l'interprétation que Popper a donnée de la probabilité (au sens fréquentiel) comme mesure d'une propriété physique qu'il appelle *propensité*. Il s'agit d'une propriété dispositionnelle relative non à des objets (comme des particules) mais à des arrangements expérimentaux donnant lieu à des mesures répétées. C'est une fréquence virtuelle, non observable directement mais manifestée par les fréquences actuelles effectivement mesurées.

► AGAZZI E. éd., *Probability in the Sciences*, Dordrecht/Boston/Londres, Kluwer Academic Publ., 1988. — BERNOULLI J., *Wahrscheinlichkeitsrechnung* (1713), trad. all. R. Haussner, Leipzig, Ostwalds Klassiker, 2 vol., 1899. — BOREL E. et al., *Traité du calcul des probabilités et de ses applications*, Paris, Gauthier-Villars, 4 vol., 1924-1939. — BODOT M., *Logique inductive et probabilité*, Paris, Armand Colin, 1972. — CARNAP R., *Logical Foundations of Probability*, Chicago, Univ. of Chicago Press, et Londres, Routledge & Kegan Paul, 1950, 2^e éd., 1962. — COHEN L.J., *The Philosophy of Induction and Probability*, Oxford, Clarendon Press, 1989. — FINE T.L., *Theories of Probability: An Examination of Foundations*, New York/Londres, Academic Press, 1973. — FINETTI B. DE, *Theory of Probability*, New York, Wiley, 2 vol., 1974-1975. — HINTIKKA J., « Towards a theory of inductive generalization », in BAR-HILLELY Y., *Logic, Methodology and Philosophy of Science, Proceedings of the 1964 International Congress*, Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1965, p. 274-288. — JEFFREYS H., *Theory of Probability*, Oxford, Univ. Press, 2^e éd., 1948. — KEYNES J.M., *A Treatise on Probability*, Londres, MacMillan, 1921, 2^e éd., 1929. — KOLMOGOROV A., *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*, Berlin, Springer, 1933, rééd., New York, Springer, 1946. — LAPLACE P.-S., *Essai philosophique sur les probabilités* (1814), in *Œuvres complètes*, vol. VII, 1847, rééd., Paris, Bourgeois, 1986. — MISES R. VON, *Mathematical Theory of Probability and Statistics*, New York, Academic Press, 1964. — PLATO J. VON, *Creating Modern Probability*, Cambridge, Univ. Press, 1994. — REICHENBACH H., *The Theory of Probability* (1935), trad. angl., Berkeley, Univ. of California Press, 1949. — SCHILPP P.A. éd., *The Philosophy of Rudolf Carnap*, La Salle (Ill.)/Open Court/Londres, Cambridge Univ. Press « The Library of Living Philosophers », vol. XI, 1963. — SCHNORR C.,

Zufälligkeit und Wahrscheinlichkeit, Berlin, Springer « Lecture Notes in Mathematics », 218, 1971. — STEGMÜLLER W., *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie, IV, Personelle und Statistische Wahrscheinlichkeit*, Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1973.

Jean LADRIÈRE

→ Axiomatisation et formalisation; Corroboration; Dédution; Hasard; Induction; Rationalité; Réfutabilité.

PROBABILITÉ

PHYSIQUE

La physique fait ample usage de probabilités. Celles-ci siègent aux fondements mêmes de deux grandes théories physiques: la mécanique statistique et la mécanique quantique. La notion de probabilité fut d'abord introduite en relation avec les jeux de hasard. Il semble que le premier à le faire fut J. Cardan (1501-1576), suivi un siècle après par Pascal (1623-1662) et Fermat (1601-1665), qui entretenirent une longue correspondance savante sur un problème concret de tripot posé par le chevalier de Méré. Pascal put alors parler avec émerveillement de « la géométrie du hasard ». Il existe actuellement une théorie mathématique des probabilités, fondée sur les axiomes de Kolmogorov (1933). Avertissement: le concept physique de probabilité, son utilisation quotidienne et universelle de par le vaste monde et, par conséquent, l'exposé qui suit, ignorent totalement les subtilités, et jusqu'à la problématique de la théorie mathématique moderne.

Définition des probabilités en physique

Pour comprendre ce qu'on appelle probabilité, en physique tout au moins, analysons les caractéristiques fondamentales du jeu de pile ou face: cet exemple très simple contient déjà, en effet, les traits essentiels communs à toutes les situations probabilisables.

Le jeu de pile ou face, archétype d'une situation probabiliste. — Il est probablement inutile de décrire en détail le jeu de pile ou face. Nous imaginerons que deux joueurs y sont aux prises.

S'il était possible de déterminer à l'avance, à chaque lancement de la pièce, laquelle de ses deux faces va être visible lorsqu'elle se sera immobilisée, il n'y aurait évidemment plus de jeu. Rien de magique pourtant, dans le mouvement d'un corps, telle la pièce, soumis au champ de pesanteur et astreint à évoluer au-dessus d'une table: ce mouvement devrait en principe être entièrement calculable à partir des lois de la mécanique. Mais ce calcul est en pratique impossible à mettre en œuvre, pour la raison que des modifications imperceptibles dans les conditions du mouvement (manière de lancer, point de chute sur la table...) peuvent en changer radicalement l'aboutissement final. C'est ainsi que s'introduit la notion de hasard: C'est ainsi que s'introduit la notion de hasard:

l'information que l'on peut rassembler avant un lancement est insuffisante pour en prédire le résultat. Il est dès lors plus efficace de renoncer à obtenir cette prédiction par les lois physiques qui régissent le système, et de raisonner directement sur les caractéristiques du hasard lui-même : ici, les deux joueurs ont *a priori* les mêmes chances de gain (nous précisons plus loin la signification de cette affirmation).

Le jeu de pile ou face possède une autre propriété cruciale : on peut répéter autant de fois qu'on le désire le lancement de la pièce, et chaque nouveau lancement est totalement indépendant des précédents, en ce sens que son résultat est *a priori* tout aussi aléatoire, et de la même façon, que si aucun autre lancement ne l'avait précédé. Cette dernière caractéristique — l'indépendance des divers lancements successifs — est simple à comprendre physiquement : comment tel lancement pourrait-il être influencé par ceux qui l'ont précédé, par quel mécanisme ? Pourtant, on entend souvent le « bon sens » affirmer que si face, par exemple, sort 99 fois de suite, il a, au centième coup, moins de chance de le faire que pile. Il n'en est rien, bien entendu : le centième coup est totalement indépendant des précédents (pourvu que la pièce ne soit pas truquée).

Les deux joueurs, avons-nous annoncé, ont autant de chances de gagner. Qu'est-ce à dire ? Sûrement pas qu'aucun des deux ne va gagner ! Dès le premier lancement de la pièce, il y aura un gagnant et un perdant, puisqu'il faut bien que le résultat soit pile ou face. Mais nous savons par expérience que la situation sera analogue (dans la plupart des cas) après plusieurs lancements : en général, si l'on joue N fois de suite à pile ou face, on n'obtient pas exactement $N/2$ fois pile et $N/2$ fois face (même si N est pair, même si N est grand). Si par exemple on lance 100 fois la pièce ($N = 100$), le résultat sera plutôt du genre de 42 piles (ou faces) et 58 faces (ou piles) ; de même, si N atteint 10 000, ce sera par exemple 4 920 contre 5 080. Ce n'est donc pas par une simple égalité de leurs gains que se manifeste concrètement l'égalité des chances des deux joueurs. Si nous avons donné les exemples numériques qui précèdent, c'est pour suggérer les deux propriétés suivantes : en premier lieu, l'écart à $N/2$ croît en général avec N (8 dans le premier exemple, pour $N = 100$, et 80 pour $N = 10\,000$; c'est pour cela que le désir de « se refaire », qui tenaille les perdants dans les maisons de jeu, s'avère souvent illusoire) ; cependant, et cette seconde propriété est essentielle, l'écart relatif (c'est-à-dire l'écart divisé par N) décroît quand N croît (bien que 80 soit supérieur à 8, $80/10\,000$ est inférieur à $8/100$). L'égalité des chances des deux joueurs prend donc la forme suivante : si N_1 est le nombre de fois où l'on obtient pile et N_2 celui où l'on obtient face en jouant N (somme de N_1 et N_2) coups de pile ou face, alors les proportions relatives N_1/N et N_2/N de piles et de faces deviennent égales lorsque N devient très grand. Répétons que N_1 et N_2 ne sont pas (en général) égaux ; pourtant N_1/N et N_2/N tendent tous deux vers $1/2$, c'est-à-dire que les différences entre N_1

et $N/2$ et entre N_2 et $N/2$ croissent moins vite que N quand celui-ci devient grand.

Situation probabiliste générale. — Cette donnée d'observation, généralisée, conduit à la notion de probabilité. Imaginons en effet une expérience possédant les deux caractéristiques principales du jeu de pile ou face, à savoir : (i) Le résultat n'est pas connu à l'avance avec certitude ; il peut être l'un ou l'autre de M résultats possibles : e_1, e_2, \dots, e_M (on appelle souvent « événements » ces résultats possibles) ; (ii) L'expérience peut être répétée, dans les mêmes conditions, autant de fois que l'on veut. Alors la probabilité P_i du premier événement e_i est définie comme la limite, lorsque le nombre total N d'expériences effectuées devient très grand, du rapport N_i/N , N_i étant le nombre de fois où l'événement e_i se produit au cours des N expériences ; bien entendu, les probabilités P_1, \dots, P_M des autres événements e_2, \dots, e_M sont définies de façon analogue.

Probabilités subjectives et probabilités objectives.

— Si l'on fait de la physique, c'est qu'on admet que la réalité et ses lois existent indépendamment de l'« observateur », c'est-à-dire de nous ; ce présupposé est commun à tous les physiciens, quelles que soient par ailleurs leurs opinions ou croyances sur l'origine et la signification profonde de cette réalité. Mais ce qui est en cause ici est l'objectivité de la description physique de la réalité. On qualifiera d'objective toute notion, grandeur ou propriété appartenant de façon intrinsèque au système étudié, sur laquelle tous les observateurs s'accorderont nécessairement dès lors qu'ils auront convenu de sa définition. Sera subjective, au contraire, une notion, grandeur ou propriété qui fait intervenir l'observateur de façon spécifique, c'est-à-dire dont l'expression ou la valeur peut varier irrédudiblement d'un observateur à l'autre.

Il va sans dire que les théories physiques introduisent préférentiellement, et si possible uniquement, des concepts et outils objectifs. Mais les probabilités occupent de ce point de vue une place particulière. Plutôt que de caractéristiques intrinsèques d'un système physique, il s'agit à première vue d'une manière de prendre en compte l'ignorance ou nous sommes de l'état du système ou de son évolution. La définition opératoire que nous avons donnée des probabilités n'exclut pas leur subjectivité : pourquoi l'expérience dont nous avons parlé peut-elle donner plusieurs résultats différents, si ce n'est parce que l'observateur est incapable de prédire lequel d'entre eux va sortir dans telle réalisation de ladite expérience ? La question peut légitimement se poser de savoir si les observateurs sont tous logés à la même enseigne, ou si certains sont plus malins que d'autres dans leur évaluation des probabilités. Inversement, est-il possible de rendre, dans certains cas tout au moins, la définition des probabilités parfaitement objective, en éliminant totalement le rôle de l'observateur ?

Concrétisons ces considérations en prenant quelques

exemples, empruntés à des jeux de hasard simples (après tout, l'étude des probabilités, dès Pascal et Fermat, avait pour but l'analyse des jeux). Lorsqu'un joueur de bridge, pour décider dans quel sens il va tenter une impasse, évalue la probabilité pour que telle carte se trouve dans la main de son adversaire de gauche, ce sont évidemment des probabilités subjectives qu'il manipule : la carte à laquelle il s'intéresse est en réalité chez l'un de ses adversaires et pas chez l'autre ; le but est donc de deviner où elle se trouve, et un joueur expérimenté sait utiliser l'information que lui ont fournie les annonces et les cartes déjà jouées pour déterminer si la carte en question a « plus de chances » de se trouver à gauche qu'à droite. De la même façon, si l'on étale sur une table un jeu de cartes, dont les dos sont seuls visibles, et que l'on parle de « la probabilité pour que telle carte désignée du doigt soit l'as de trèfle », il s'agit encore d'une probabilité subjective : l'arrangement des cartes est parfaitement déterminé et immuable à partir du moment où elles sont disposées sur la table, et l'on a recours aux probabilités seulement parce que leur répartition n'est pas connue. Il n'est pas difficile d'imaginer, dans les deux exemples précédents, divers moyens que pourrait utiliser un « observateur » astucieux pour acquérir des informations supplémentaires.

Examinons au contraire les probabilités associées à un jeu de dés. Lorsqu'on jette un dé, son état final (le nombre qu'il affiche) peut en principe être calculé, comme dans le cas de pile ou face, en appliquant les lois de la mécanique à partir de son état initial (sa position dans le cornet ou la main qui le lance, la vitesse qui lui est imprimée, la hauteur de la chute...). Il est pourtant sans espoir de mettre en pratique ce principe, comme chacun le sait pour avoir vainement tenté de sortir un 6 en agissant sur l'état initial du dé. Dans ce cas, les probabilités sont vraiment objectives : les observateurs sont tous aussi malins (ou aussi naïfs) les uns que les autres (pourvu que soit écartée toute possibilité de manipulations de prestidigitation). Cette situation découle de l'extrême sensibilité du système par rapport à d'infimes modifications dans les conditions initiales ou les influences extérieures : les états finals correspondant à deux états initiaux très proches sont très différents. Cette instabilité du mouvement empêche en pratique toute prévision déterministe de l'état final et impose un traitement probabiliste objectif. On aura reconnu la situation qui a été décrite plus haut pour le jeu de pile ou face.

Notons cependant un point important. Supposons que le dé soit pipé, c'est-à-dire construit de telle sorte que les probabilités d'apparition de ses six faces ne soient pas égales. Ces probabilités sont encore objectives, puisque inscrites dans le dé lui-même et donc indépendantes de l'observateur (si l'on exclut les possibilités de tricherie au lancement). Pour les déterminer, il n'y a pas d'autre moyen que de lancer le dé un très grand nombre de fois et de compter les fréquences d'apparition des six faces. Lorsqu'on n'a pas la possibilité d'effectuer une telle série d'essais pour mesurer

les probabilités objectives associées à ce dé truqué, on doit se contenter de probabilités subjectives, différentes des précédentes : même si l'on sait pertinemment que le dé est falsifié, on doit prendre des probabilités subjectives égales pour les six faces ; si en effet on les prenait différentes, on courrait le risque de s'éloigner davantage encore des probabilités objectives, car il se pourrait que l'on favorise subjectivement un résultat qui est en réalité défavorisé objectivement.

Probabilités et entropie en mécanique statistique

L'entropie thermodynamique. — Le désir d'analyser la « puissance motrice du feu » (titre d'un mémoire de Sadi Carnot, 1824) pour réaliser des moteurs thermiques, c'est-à-dire des machines capables de fournir du travail mécanique à partir de la chaleur, a donné naissance, dans la première moitié du XIX^e s., à la thermodynamique. Cette discipline est devenue une théorie physique très élaborée, dans laquelle l'ensemble des phénomènes relatifs à la chaleur et à sa transformation en travail mécanique est ramené à un petit nombre de principes, essentiellement deux.

Le premier principe de la thermodynamique affirme l'équivalence fondamentale de la chaleur et du travail. Lorsqu'un système (tel qu'un échantillon de gaz) est à l'équilibre macroscopique, il possède une énergie totale bien déterminée. Il existe essentiellement deux façons différentes de modifier cette énergie, c'est-à-dire de fournir (ou de retirer) de l'énergie au système. En premier lieu, on peut le faire en modifiant les « paramètres extérieurs » qui déterminent son état macroscopique (le volume par exemple, pour un gaz) : les forces qui, de l'extérieur, maintenaient en place ces paramètres (pression enfermant le gaz) effectuent, au cours de telles modifications, un travail mécanique ; selon qu'il est moteur ou résistant, ce travail des forces extérieures augmente ou diminue l'énergie du système. Mais l'expérience montre qu'on peut également transférer de l'énergie au système sans changer les paramètres extérieurs, en le chauffant, c'est-à-dire en lui fournissant de la chaleur (on peut inversement lui en retirer). La chaleur est donc une forme d'énergie échangée, comme le travail, mais différente de ce dernier ; si la nature physique du travail est connue grâce à la mécanique, celle de la chaleur (définie comme l'énergie échangée qui n'est pas du travail) reste à ce stade mystérieuse. Il n'en demeure pas moins que le premier principe exprime la conservation de l'énergie, en reconnaissant qu'un apport de chaleur augmente l'énergie du système au même titre qu'un apport de travail.

Le second principe de la thermodynamique est beaucoup plus subtil. Il constate que la chaleur et le travail, bien qu'équivalents dans le bilan énergétique d'une transformation, se comportent de façon dissymétrique, de sorte que certains processus qui seraient permis du point de vue énergétique ne se produisent pas en réalité. Cette constatation peut être exprimée et résumée sous forme d'énoncés qualificatifs du second principe.

Ainsi l'énoncé de Kelvin-Planck : « Il est impossible de réaliser un processus dont le seul résultat serait de transformer intégralement en travail une quantité de chaleur fournie par une source de chaleur unique » ; ou l'énoncé de Clausius : « Il est impossible de réaliser un processus dont le seul résultat serait de transférer de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud. » On peut démontrer que ces deux énoncés sont logiquement équivalents l'un à l'autre.

Mais, en utilisant la notion de processus « réversibles » (« idéaux », disait Sadi Carnot), Clausius (1850) introduisit une nouvelle fonction d'état (c'est-à-dire une grandeur prenant dans chaque état d'équilibre du système une valeur déterminée, indépendante de la manière dont le système est parvenu dans cet état), l'entropie. Le second principe s'exprime alors de façon analytique : l'accroissement (algébrique) de l'entropie du système dans une transformation vérifie nécessairement « l'inégalité de Clausius » ; il est supérieur, ou au moins égal, au quotient de la quantité (algébrique) de chaleur qu'a reçue le système au cours de la transformation, par la température du milieu extérieur qui a fourni cette chaleur (la formule se généralise aussitôt aux processus où le système reçoit de la chaleur de plusieurs sources de températures différentes) : cette inégalité devient égalité dans le cas limite idéal où la transformation étudiée est réversible.

On sait donc en thermodynamique définir et, en principe, calculer l'entropie S d'un système. La véritable nature physique de l'entropie reste, comme celle de la chaleur, mal comprise. Mais il est clair d'après sa définition que l'entropie thermodynamique est une grandeur objective.

L'entropie de Boltzmann. — Parallèlement au développement de la thermodynamique, le XIX^e s. vit la réapparition et l'affirmation progressive de l'hypothèse atomique, selon laquelle les corps que nous observons ont en réalité une structure intime granulaire : les gaz, par exemple, sont constitués de molécules. Un conflit extrêmement violent opposa jusqu'au début du XX^e s. les thermodynamiciens orthodoxes aux tenants de la théorie atomique.

Pourtant, dès 1872, Ludwig Boltzmann avait jeté les bases d'une théorie nouvelle, fondée sur l'hypothèse atomique et englobant la thermodynamique. Le lien entre les propriétés d'un système à l'échelle atomique, que l'on qualifie de « microscopique », et ses propriétés thermodynamiques à l'échelle courante, dite « macroscopique », se manifeste dans la célèbre formule de Boltzmann (qui est gravée sur sa pierre tombale, à Vienne) : $S = k \ln W(1)$.

S est l'entropie du système lorsqu'il se trouve dans un état macroscopique déterminé et W le nombre d'états microscopiques pouvant réaliser cet état macroscopique, c'est-à-dire compatibles avec lui ; la « constante de Boltzmann » k est universelle ; elle vaut $k = 1,38 \times 10^{-23}$ joule par kelvin. Notons que W est faramineusement grand : son logarithme est de l'ordre du nombre d'Avogadro ! On peut le comprendre : un

litre de gaz dans les conditions ordinaires comporte environ trente mille milliards de milliards de molécules ; les façons de répartir entre elles une énergie totale donnée sont effectivement en nombre gigantesque.

La géniale découverte de Boltzmann a donné naissance à la mécanique statistique. La formule de Boltzmann permet déjà de se faire une idée plus précise de l'entropie : celle-ci mesure en quelque sorte l'arbitraire que laisse au niveau microscopique la préparation d'un système dans un état macroscopique déterminé.

Entrée en scène des probabilités. — On peut pourtant se poser la question : comment est-il possible qu'interviennent ainsi tous les états microscopiques susceptibles *a priori* d'être réalisés lorsqu'on se fixe l'état macroscopique ? On s'attendrait plutôt à ce que le système se trouve dans l'un de ces états microscopiques permis (même s'il est pratiquement impossible de savoir lequel), alors que c'est leur nombre total qui apparaît dans la formule de Boltzmann. Cette question fondamentale trouve sa réponse dans l'affirmation, fondamentale elle-même, que la description microscopique d'un système macroscopique est de nature probabiliste : chacun des états microscopiques compatibles avec l'état macroscopique du système considéré a une certaine probabilité d'être réalisé.

Il va sans dire que la réalité des molécules et atomes, bien que farouchement niée par certains thermodynamiciens jusqu'au début de ce siècle, ne peut plus actuellement être mise en doute. La théorie physique qui fait le lien entre le comportement d'un système à l'échelle microscopique et ses propriétés macroscopiques est appelée « mécanique statistique ». Cette théorie utilise les probabilités comme ingrédients fondamentaux.

Ceci paraît soulever une difficulté rédhitoire : si l'on sait seulement prédire la probabilité pour qu'une grandeur macroscopique donnée prenne telle ou telle valeur, la description du système au niveau microscopique risque de rester floue, c'est-à-dire incomplète et approximative. Il n'en est rien en fait, à cause de la « loi des grands nombres » : le nombre d'Avogadro N_A , qui caractérise le passage du microscopique au macroscopique (c'est le nombre de molécules contenues dans une mole d'un corps pur quelconque, par exemple dans 18 g d'eau ou dans 32 g d'oxygène), a une valeur tellement élevée ($N_A = 6,023 \times 10^{23}$) que la description probabiliste d'un système macroscopique est pratiquement certaine et exacte. Les fluctuations d'une grandeur macroscopique, c'est-à-dire les écarts par rapport à sa valeur moyenne (au sens probabiliste), sont le plus souvent trop faibles pour se manifester de façon observable. Il est pourtant des situations où les fluctuations peuvent être étudiées. Heureusement, car leur existence donne raison à la mécanique statistique contre les tenants rigides de la thermodynamique sans substrat atomique. C'est ainsi que les expériences de Jean Perrin sur le mouvement brownien, en 1908, ont clairement mis en évidence les fluctuations, et vérifié les

propriétés qu'on attendait d'elles. Mais Ludwig Boltzmann s'était déjà suicidé, deux ans auparavant.

Le postulat fondamental de la mécanique statistique.

La mécanique statistique est une théorie physique au plein sens du terme, c'est-à-dire qu'elle se présente sous forme hypothético-déductive, tout comme une théorie mathématique. La différence est bien sûr qu'une théorie physique doit obligatoirement décrire la réalité (ou un aspect de celle-ci). Disons (en simplifiant) qu'un postulat fondamental n'a pas de justification *a priori* mais que, *a posteriori*, toutes ses conséquences doivent être conformes à la réalité ; ceci signifie concrètement que celles de ces conséquences qui peuvent être mises à l'épreuve de l'expérimentation doivent en sortir confirmées.

La mécanique statistique (des situations d'équilibre) est fondée sur un postulat unique : « Pour un système macroscopique isolé et à l'équilibre, tous les états microscopiques compatibles avec son état macroscopique sont également probables » (un système est considéré comme isolé s'il n'échange avec l'extérieur ni énergie ni particules). Disons aussitôt que la formule de Boltzmann découle directement de ce postulat.

Ensembles statistiques et principe ergodique. — Cet énoncé soulève deux questions de fond : en premier lieu, est-on dans une situation de probabilités objectives ? Si oui, les probabilités subjectives que propose le postulat coïncidentelles avec les précédentes ?

C'est évidemment la première de ces deux questions qui conditionne l'ensemble. La seconde, bien qu'importante, est plus banale : elle se pose en effet, sous des formes légèrement différentes mais essentiellement équivalentes, pour tout postulat physique : la théorie qu'il fonde décrit-elle correctement le réel ?

La première question est connue sous le nom de « problème ergodique ». Pour préciser un peu, il faut d'abord définir les probabilités que l'on va utiliser. Depuis J. Gibbs (1839-1903), cette définition se fonde sur la notion d'ensemble statistique. On imagine que l'on dispose d'un très grand nombre N de répliques du système considéré, toutes préparées de la même façon à l'échelle microscopique : on aura par exemple N récipients de même volume remplis du même gaz sous la même pression et à la même température. Chacun des N systèmes de l'ensemble se trouve, à un instant donné, dans un état microscopique déterminé. La probabilité P_i , à cet instant, d'un état microscopique particulier (i) est par définition le rapport N_i/N , où N_i est le nombre de systèmes de l'ensemble qui se trouvent dans l'état (i) choisi (il serait plus correct de dire que P_i est la limite, quand N tend vers l'infini, du rapport N_i/N). Autrement dit, la probabilité d'un état microscopique est en fait la probabilité pour que, si l'on choisit au hasard un système dans l'ensemble statistique, ce système se trouve dans l'état microscopique considéré. À l'équilibre macroscopique, les probabilités P_i sont indépendantes du temps.

Il est clair que les probabilités ainsi introduites sont

objectives. Mais on n'a évidemment jamais affaire dans la réalité à un ensemble statistique de systèmes, seulement à un exemplaire particulier de cet ensemble. Comment, dès lors, la définition précédente peut-elle concerner les propriétés d'un système unique ? On sait que dans un système (prenons l'exemple d'un gaz), l'équilibre macroscopique recouvre en fait, au niveau microscopique, une agitation thermique désordonnée des molécules : celles-ci se déplacent en tous sens à des vitesses de l'ordre de 500 m/s, et chacune d'elles subit plus d'un milliard de collisions par seconde sur ses voisines. Une grandeur donnée, par exemple le nombre de molécules situées dans un petit volume fixe délimité (par la pensée) dans le récipient contenant le gaz, fluctue sans arrêt au cours du temps. Ce mouvement des molécules devrait être déterminé, par les lois de la mécanique, à partir de l'état microscopique du système à l'instant initial. Mais les équations du mouvement présentent, pour de tels systèmes, une instabilité par rapport à de très légères modifications des conditions initiales ou des forces s'exerçant de l'extérieur sur le système : on montre par exemple que, dans un échantillon de gaz, l'interaction gravitationnelle avec une personne située à quelques mètres, bien que ridiculement faible du point de vue énergétique, suffit à désorienter totalement une molécule (par rapport à la trajectoire qu'elle aurait eue en l'absence de la personne) au bout d'une dizaine de collisions seulement, c'est-à-dire en un cent millionième de seconde ! Il s'ensuit qu'un système macroscopique change constamment, très rapidement et de façon imprévisible, d'état microscopique. C'est ce phénomène, appelé depuis Boltzmann le chaos moléculaire, qui autorise et impose l'utilisation des probabilités.

Le principe ergodique consiste à admettre que les fluctuations temporelles aléatoires des propriétés d'un système macroscopique (fluctuations qui se produisent sur des temps très courts par rapport à ceux que met en jeu les phénomènes macroscopiques) sont bien décrites par les probabilités définies à l'aide d'un ensemble statistique de systèmes identiques à celui que l'on étudie. De nombreux travaux ont été consacrés à cette question, pour tenter de justifier le principe ergodique à partir des lois de la mécanique. Le problème est compliqué, et les résultats moins probants qu'on ne pourrait le souhaiter ; c'est, pour le moment du moins, l'instabilité des équations du mouvement microscopique, déjà évoquée plusieurs fois, qui joue dans ce problème le rôle crucial. Le principe ergodique n'est pas vraiment démontré à partir de postulats plus fondamentaux, mais il est aux fondations mêmes de la mécanique statistique, pour laquelle sa validité est essentielle.

Probabilités et amplitudes de probabilité en mécanique quantique

Il est une autre théorie physique moderne (elle est née au cours du premier tiers du XX^e s.) qui place les probabilités au cœur même de son formalisme, la

mécanique quantique. Faut-il souligner son importance primordiale dans la compréhension du comportement et des propriétés du monde qualifié ci-dessus de « microscopique » (atomes, molécules, photons, cristaux...)? Pour ce qui nous occupe ici, l'intervention des probabilités en mécanique quantique se situe à un niveau plus profond encore, et donc moins accessible au « sens commun » (fût-il physique) qu'en mécanique statistique. Les fondements de la mécanique quantique ont donné lieu à d'âpres discussions dans lesquelles la passion n'était pas seulement professionnelle : « Dieu ne joue pas aux dés », disait Einstein au cours de l'une de ses premières controverses (1927), qui l'opposait (très courtoisement) à Bohr, et qui reste un monument de clarté et d'intelligence. Nous n'entrerons pas ici dans de telles argumentations, pour la raison (tout à fait suffisante pour la plupart des physiciens) que la mécanique quantique « marche » telle qu'elle est : toutes ses prédictions ont jusqu'ici été confirmées par l'expérience, y compris celles de ces prédictions que d'aucuns, suivant en cela Einstein, considéraient comme paradoxales (la période récente a en particulier vu la réalisation d'expériences claires et précises qui ne laissent aucun doute sur la réalité des effets prédits par la mécanique quantique, fussent-ils « contraires au bon sens »).

Postulats sur la mesure en mécanique quantique.

— Comme la mécanique statistique, comme plus généralement toute théorie physique, la mécanique quantique est fondée sur un ensemble de postulats. Nous n'allons pas les détailler ici, nous contentant d'indiquer, en les schématisant, ceux qui touchent au rôle des probabilités. Soulignons, avant de le faire, que le formalisme de la mécanique quantique est particulièrement abstrait, mais qu'il n'en est pas moins clair et parfaitement défini.

Premier postulat. À un instant fixé, l'état d'un système physique est caractérisé par la donnée d'un vecteur y et appelé « ket » (cette terminologie, maintenant universellement acceptée, a été proposée par Dirac : elle provient de la césure du mot anglais *bracket*, qui signifie « crochet » ou « parenthèse », en « bra » et « ket »), appartenant à un espace vectoriel nommé « espace des états ». L'espace des états est construit sur le corps des nombres complexes, de sorte que, si y_1 et y_2 décrivent deux états possibles du système, et si a_1 et a_2 sont des complexes quelconques, alors la somme de $a_1 y_1$ et $a_2 y_2$ décrit aussi un état possible. Pour faire le lien avec une notion plus populaire, indiquons que, dans le cas particulier où le système est constitué d'une seule particule (sans spin), la donnée du ket y est équivalente à celle de la fonction d'onde $y(r,t)$ de la particule.

Deuxième postulat. Toute grandeur physique mesurable A est décrite par un opérateur A agissant dans l'espace des états. Cet opérateur doit posséder certaines caractéristiques techniques qui en font ce que l'on appelle une observable. L'une des propriétés intrinsèques les plus importantes d'une observable

concerne l'ensemble de ses valeurs propres et le système des vecteurs propres associés. Un ket j_n est vecteur propre de A si l'action de A sur lui le redonne à un facteur constant près. Ce facteur a_n (nécessairement réel si A est une observable) est dénommé « valeur propre » correspondant au « vecteur propre » j_n . Nous avons affecté un indice, n , à j_n et a_n pour indiquer qu'une observable donnée possède tout un ensemble de vecteurs propres, et un ensemble de valeurs propres.

Troisième postulat. La mesure d'une grandeur physique A ne peut donner comme résultat qu'une des valeurs propres de l'observable A correspondant à A . Notons que ce postulat systématise et élève au rang de principe le phénomène de quantification de certaines grandeurs physiques : si l'ensemble des valeurs propres d'une observable particulière est discret (c'est-à-dire si les valeurs propres sont nettement distinctes les unes des autres), les résultats possibles d'une mesure de cette observable sont quantifiés.

Quatrième postulat. Lorsqu'on mesure la grandeur physique A sur un système dans l'état y , la probabilité $P(a_n)$ d'obtenir comme résultat la valeur propre a_n de l'observable A correspondante est donnée par le module, au carré, du produit scalaire de y par le ket propre j_n de A qui correspond précisément à la valeur propre a_n dont on cherche la probabilité. (Nous supposons que la valeur propre considérée est « non dégénérée », c'est-à-dire qu'il ne lui correspond qu'un seul vecteur propre j_n — à un facteur près. On peut sans difficulté donner de ce quatrième postulat un énoncé plus général, incluant le cas de valeurs propres dégénérées, ou/et continues au lieu de discrètes.) Le produit scalaire du vecteur y par le vecteur j_n est un nombre complexe que l'on appelle amplitude de probabilité parce que c'est le carré de son module qui donne la probabilité $P(a_n)$ elle-même.

Nous voilà donc à nouveau avec des probabilités, qui apparaissent à nouveau au stade des postulats fondamentaux. Pourtant celles-ci ont toujours soulevé des objections : si l'on peut calculer seulement les probabilités pour que les divers résultats de mesure possibles soient obtenus, qu'est-ce qui décide que c'est tel résultat et non tel autre qui va sortir dans une expérience particulière? Comme nous en sommes convenus plus haut, nous ne discuterons pas ces problèmes. Nous nous en tiendrons à la position pragmatique qui prend le quatrième postulat tel qu'il est et qui constate que rien ne permet pour le moment de le mettre en doute. En fait, toutes les prédictions qui en découlent sont confirmées par l'expérience, et toutes les tentatives pour le déduire de postulats prétendument plus fondamentaux ont échoué.

Amplitudes de probabilité et interférences. — En mécanique quantique, les probabilités qui interviennent au niveau fondamental (celui des postulats eux-mêmes) ont une caractéristique singulière, sans autre exemple dans l'ensemble des situations probabilisables : elles s'évaluent en prenant le carré du module d'un nombre complexe, que l'on appelle « amplitude de

probabilité ». Cette particularité a des conséquences très importantes (« interférences quantiques ») que nous allons décrire ici sur un exemple. Bien entendu, ces conséquences ont toujours, jusqu'ici, été confirmées par l'expérience.

De façon générale, ces phénomènes d'interférence ont leur origine dans la relation entre le premier postulat et le quatrième. Selon le premier, un vecteur y construit par combinaison linéaire de deux vecteurs d'états y_1 et y_2 , ce que l'on note $y = a_1 y_1 + a_2 y_2$ (où a_1 et a_2 sont deux nombres complexes), est lui-même un vecteur d'état, c'est-à-dire qu'il décrit lui aussi un état physique réalisable, pour le même système. Maintenant, l'amplitude de probabilité qu'introduit le quatrième postulat (produit scalaire de y par j_n) est dans ce cas la somme de deux amplitudes de probabilité, l'une associée à $a_1 y_1$, l'autre à $a_2 y_2$. Ainsi, comme le carré d'une somme n'est pas égal à la somme des carrés, la probabilité $P(a_n)$ fait intervenir, non seulement la somme des probabilités relatives à $a_1 y_1$ et $a_2 y_2$, mais aussi un « terme croisé », qui est précisément le terme d'interférence.

Pour concrétiser ces notions, analysons succinctement l'expérience des fentes de Young, qui a été abondamment discutée, et constitue le prototype même des situations où interviennent les interférences quantiques. Cette expérience met en évidence ce qu'on appelle traditionnellement la dualité onde-corpuscule.

Voici une description du dispositif expérimental, très simple, et des résultats, très typés. Une source S émet de la lumière (monochromatique) qui arrive sur une plaque opaque P percée de deux fentes fines F_1 et F_2 , puis de là sur un écran d'observation E . Si l'on observe F_2 , on obtient sur E une répartition I_1 de l'intensité lumineuse (c'est la tache de diffraction de la fente F_1 restée ouverte) ; de même, on obtient I_2 si F_1 est bouchée. Lorsque les deux fentes F_1 et F_2 sont ouvertes à la fois, on observe sur l'écran E un système de franges d'interférences : la répartition de l'intensité lumineuse sur E n'est pas la somme des intensités I_1 et I_2 produites séparément par les deux fentes ; elle dessine une succession de lignes parallèles, alternativement très lumineuses (franges brillantes) et obscures (franges noires), c'est-à-dire une figure foncièrement différente de celle que forme l'une ou l'autre fente, prise seule.

Or, nous savons depuis Planck (1900) et Einstein (1905) que la lumière est constituée de corpuscules, les photons. Dans le cadre d'une théorie purement corpusculaire, on est amené à considérer que chaque photon passe nécessairement par l'une ou l'autre fente. Le phénomène d'interférence, qui apparaît seulement lorsque les deux fentes sont simultanément ouvertes, ne peut dès lors être dû qu'à des interactions entre les photons franchissant F_1 et ceux qui franchissent F_2 . Cette explication conduit à la prédiction suivante : si les photons sont émis l'un après l'autre, séparément, par la source S (ce qui est possible à réaliser concrètement), leurs interactions diminuent jusqu'à s'annuler ; les franges d'interférence doivent disparaître.

En termes d'ondes, au lieu de corpuscules, l'existence du phénomène d'interférence s'interprète très naturellement. En effet, l'intensité lumineuse en un point M de l'écran est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique de l'onde en ce point. Ainsi, I_1 est proportionnelle au carré de E_1 , champ produit en M par la fente F_1 , et de même I_2 est proportionnelle au carré du champ E_2 rayonné en M par F_2 . Quand les deux fentes sont ouvertes à la fois, le champ électrique E est la somme de E_1 et E_2 , de sorte que son carré I n'est pas la somme de I_1 et I_2 ; le terme croisé qui s'ensuit est responsable des interférences. Dans ce cadre purement ondulatoire, on prévoit que si l'on diminue l'intensité de la source S (comme on voulait le faire ci-dessus pour émettre les photons un à un), les franges vont devenir moins lumineuses mais persister.

Que se passe-t-il en réalité, dans de telles conditions de très faible intensité lumineuse? Il est remarquable que ni la prédiction de la théorie ondulatoire, ni celle de la théorie corpusculaire ne sont vérifiées. En effet, si l'écran E est revêtu d'une plaque photographique et si l'on augmente le temps de pause de façon à recevoir une énergie lumineuse suffisante, on constate au développement de la plaque que les franges sont toujours là ; il faut donc rejeter le modèle purement corpusculaire qui prévoyait la disparition des franges. Mais on peut, au contraire, examiner ce qui se passe sur l'écran E lorsque les photons y arrivent un à un. On constate alors que chaque photon produit sur E un impact localisé et non pas une figure d'interférence d'intensité très faible ; il faut donc aussi rejeter le modèle purement ondulatoire.

La solution de ce « paradoxe » réside dans l'interprétation de l'onde comme une amplitude de probabilité pour que le corpuscule se manifeste. Ainsi, au fur et à mesure que les photons parviennent à l'écran E , leurs impacts se répartissent de manière aléatoire, mais ils recomposent peu à peu une figure d'interférence : la densité des impacts est très forte dans les franges brillantes et nulle dans les franges sombres.

Reste la question (toute naïve) suivante : si l'on a affaire à des photons qui n'interagissent pas entre eux, comment le résultat peut-il être si différent selon que les deux fentes sont ouvertes, ou une seule? Après tout, il semble assuré que chaque photon passe par l'une ou l'autre des deux fentes. Pourtant, cette dernière affirmation doit être nuancée. Si nous plaçons des détecteurs derrière les deux fentes, nous constaterons effectivement que, à l'arrivée d'un photon, un seul de ces deux détecteurs est frappé. Mais il n'est pas question alors de figure d'interférence, puisque tous les photons sont absorbés avant de parvenir à l'écran E . De façon plus générale, une analyse détaillée des expériences montre qu'il est impossible d'observer la figure d'interférence et de savoir en même temps par quelle fente est passé chaque photon. Lorsque les deux fentes sont ouvertes, l'onde-amplitude de probabilité passe à la fois par les deux, ce qui donne lieu au phénomène d'interférence. Lorsque les photons se manifestent en

tant que corpuscules, c'est-à-dire lors de leur arrivée sur l'écran E, leurs impacts se distribuent aléatoirement selon le carré du module de l'onde, et donc selon la figure d'interférence.

► BASS J., *Éléments de calcul des probabilités*, Paris, Masson, 1974. — DIU B., GUTHMANN C., LEDERER D. & ROULET B., *Éléments de Physique statistique*, Paris, Hermann, 1989, appendice I. — PELLER A., *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, New York, John Wiley, 1950. — PUGACHEV V.S., *Théorie des probabilités et statistique mathématique*, Éd. de Moscou, 1982.

Bernard Diu

→ Avogadro (Nombre d'); Corps noir; Entropie; Feynman; Statistique.

PROGRÈS

Depuis un siècle et demi, le mot « Progrès » fait figure d'emblème. Il a pris rang parmi ces mots dont on fait des enseignes comme la Nature, la Patrie ou la Science, ceux qui sollicitent la croyance et l'adhésion plutôt que la réflexion critique. De ce fait on perd souvent le bénéfice de sa polysémie. Si l'on regardé son histoire, on s'aperçoit que sous sa forme première latine, *progressus*, il n'a longtemps eu qu'une acception militaire désignant une avancée conquérante ou triomphante des troupes. Dans le français du XVII^e s., chez Montaigne en particulier, il recueille le sens moral du « chemin vers la vertu » qui se trouvait attaché au latin *progressio*. On dit, non sans raison, que le sens moderne du mot progrès a été en grande partie forgé par Francis Bacon. Pourtant lorsqu'il écrit en anglais, le chancelier d'Angleterre n'emploie pas *progress* mais *advancement* dont la traduction ne s'avère guère aisée. Michèle Le Dœuff a proposé : « progrès et promotion », *progress* ne désignant encore à cette époque que le voyage. Il reste que sous le mot *advancement* Bacon ouvre la voie à la conception moderne du progrès. Il s'adresse à Jacques I^{er}, roi d'Angleterre et d'Irlande de 1603 à 1625, et veut lui faire entendre que la prospérité du pays ne pourra être assurée si les inventions restent le fait d'amateurs isolés. Il ne faut pas que tout soit toujours à refaire. Il importe au contraire d'établir un lien entre les inventions, de constituer entre les inventeurs comme une chaîne ininterrompue. Bref, Bacon plaide pour que s'institue une mémoire sociale qui se transmette des uns aux autres. Par cette institution, la science deviendra cumulative. Les grandes pensées ne resteront plus héroïquement isolées les unes des autres. Cette conception toute nouvelle se retrouve dans les textes fondateurs de la Royal Society. Elle surgit dans l'histoire de l'Occident comme un mot d'ordre politique en faveur de la conservation et de la mise en valeur d'un patrimoine intellectuel pour des raisons économiques.

C'est pour avoir formulé le premier cette conception du progrès que Bacon reste depuis plus de trois siècles

la référence majeure de la philosophie dans les pays de langue anglaise. Combien de livres aux États-Unis comme en Angleterre portent en vignette le buste ou le portrait de Bacon ! Au même moment de l'autre côté de la Manche, en France, s'est élaborée une tout autre pensée du progrès qui s'inscrit dans une conception apogéotique de l'histoire. C'est celle que défend Blaise Pascal dans la célèbre préface qu'il écrit en 1651 pour le *Traité du vide* et celle de Bossuet, dans un avant-propos au *Discours de l'histoire universelle* qu'il rédige à l'intention du fils de Louis XIV, le Dauphin dont il fut le précepteur de 1669 à 1681. Ils proposent l'un et l'autre de considérer la succession des générations humaines comme celle des âges d'un même individu, de l'enfance à l'âge adulte. L'humanité pourrait être tenue pour un seul individu qui progresserait. Le sens moral du mot *progressio*, le chemin vers la vertu, l'emporte manifestement.

De Pascal, cette idée passe à la pensée de celui des philosophes des Lumières qui s'est montré certainement le plus hostile au christianisme, Condorcet. Dans l'*Esquisse d'un tableau des progrès de l'esprit humain*, il présente le récit du long combat de la raison contre les superstitions répandues par les despotes et les prêtres au bénéfice des puissants de ce monde ; il retrace la marche trébuchante de l'humanité vers la liberté par le savoir. Il affirme avoir emprunté l'idée à son ami Turgot, qui se trouvait être l'auteur d'un plan de deux « discours sur l'histoire universelle » conçus comme la réécriture du fameux *Discours* de Bossuet. Mais, avec Turgot et Condorcet, on n'a encore affaire qu'à des formes d'existence « primitives » de l'idée de progrès. Le mot lui-même s'avère encore à peu près inconnu des philosophes du XVIII^e s. Si l'on ouvre l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert à cette entrée, par exemple, il n'est question que de cosmologie (« le progrès du Soleil dans l'écliptique »), de pédagogie (« faire des progrès dans un art, une science ») et de musique (« les mauvais progrès des notes ») dont les intervalles sonnent mal. Ces penseurs parlent des progrès de l'esprit, de la raison, de l'humanité... L'idée d'un Progrès, avec majuscule, comme principe d'une Histoire sans autre sujet que lui-même n'a pas encore été forgée, contrairement à ce qu'ont prétendu les philosophes scientifiques du XIX^e s. en quête d'ascendants illustres.

L'*Esquisse* présente l'histoire tout entière comme celle de la raison prenant conscience d'elle-même. L'esprit humain progresse chez Condorcet de façon à la fois géographique et chronologique. Il a fait ses premiers pas à Athènes, il est passé par Rome, a fait halte à Londres, puis a traversé l'Atlantique pour séjourner un temps aux États-Unis avant de venir en France. L'histoire apparaît ainsi comme une succession d'époques. La dernière époque, c'est le futur. Et Condorcet n'hésite pas à écrire l'histoire du futur, laquelle se déroulera en France... Mais qu'est-ce qu'écrire l'histoire du futur si ce n'est prophétiser ? L'auteur des *Cinq mémoires d'instruction publique* prédit la

destruction des inégalités entre les nations, les citoyens de ces nations, et les sexes... Les progrès de l'esprit humain qui gouvernent l'histoire de l'humanité aboutissent ainsi à une prophétie mobilisatrice fondée sur une certaine idée de la perfectibilité indéfinie de la nature humaine. Condorcet en déduit le projet d'une « mathématique sociale ». Le premier, il tente, par l'application du calcul des probabilités, de donner, des théories du contrat social, une traduction politique concrète et voit l'acte du vote comme celui qui renouvelle en chaque individu le pacte originel. Il affronte le paradoxe « mathématique » selon lequel la prise d'une décision à la majorité simple peut s'avérer contraire à l'objectif — rousseauiste — de déclarer la volonté générale. Serait-ce faire injure à sa mémoire d'affirmer que nous avons autant à apprendre de ses erreurs que de ses réussites ? L'identification du rationalisme au mathématisme a pesé sur l'enseignement et la recherche des sciences en France. On a cru que le développement des « arts mécaniques » proviendrait désormais essentiellement de l'« application » des connaissances élaborées par « les savants ». On a oublié l'inventivité et l'allure propres de la pensée technique. En imputant les préjugés à l'ignorance délibérément entretenue par les prêtres et les despotes, ce penseur, qui s'est ingénié à analyser mathématiquement les « motifs de croire » de l'*homo suffragans*, a donné libre cours à une ignorance souvent aggressive de réels ressorts de la croyance.

Mais à côté de Condorcet, Pierre-Simon Laplace a contribué à forger l'idée « française » du progrès. L'ouvrage marquant de Laplace s'intitule *Essai philosophique sur les probabilités* (1814). Astronome, Laplace pouvait se flatter d'avoir rectifié et corrigé l'œuvre de son modèle, Isaac Newton. Le « système du monde » exposé dans la troisième partie des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* avait eu l'immense mérite, à ses yeux, de « ramener tous les phénomènes célestes à une seule formule », la loi de la gravitation universelle. Subsistaient encore cependant quelques « scandales dans le ciel » : on ne savait toujours pas rendre compte des mouvements exacts de tous les corps célestes, de la stabilité du système solaire, de la figure de la Terre... Laplace montre qu'une nouvelle branche des mathématiques, le calcul des probabilités, permet de lever l'essentiel de ces difficultés par une estimation rigoureuse des erreurs d'observation. Il propose de compléter le système en déterminant la probabilité des causes par les événements. « Chacune des causes auxquelles un événement observé peut être attribué est indiquée avec d'autant plus de vraisemblance qu'il est plus probable que, cette cause étant supposée exister, l'événement aura lieu. » La cosmologie de Laplace se veut entièrement régie par des causes mécaniques. Si certaines d'entre elles restent encore inconnues, explique-t-il, et ne sont qu'inférées grâce au calcul des probabilités à partir des régularités observées, on ne saurait les tenir pour différentes de celles que met en jeu la mécanique. Tous les mouvements des corps célestes lui paraissent ainsi

calculables avec une précision toujours plus grande et imputables à des causes constantes. L'ambition de Laplace consiste à étendre l'application du calcul des probabilités aux phénomènes humains (mariages, naissances, décès...) de manière à rendre possible la « prévision rationnelle » même de ceux qui paraissent les plus erratiques. Il voit dans cette maîtrise intellectuelle la promesse d'un bonheur assuré.

Auguste Comte ne cesse de dénoncer les descendants des philosophes des Lumières comme des métaphysiciens négatifs, destructifs. Leur pensée a fait son office historique. Elle ne peut plus avoir d'autre effet social que de susciter et entretenir l'anarchie intellectuelle et morale. Il se reconnaît pourtant, parmi eux, un prédecesseur : Condorcet. Cette filiation revendiquée lui permet de frapper sa maxime majeure : « Ordre et progrès. » Le progrès se trouve maintenant défini comme « développement de l'ordre ». Mais il s'agit à ses yeux d'un ordre biologique qui définit la nature humaine comme telle et qui peut fonder le nouvel ordre politique : l'ordre même qu'a révélé cette « science positive de la nature humaine » que constitue à ses yeux la « phrénologie » de l'illustre Franz Josef Gall. De cette première théorie des localisations cérébrales, Comte tire l'idée d'une tripartition des facultés (motrice, affective, intellectuelle) qui gouverne le développement de ladite nature humaine. De la marche au développement, le registre change : on ne développe que ce qui est d'abord enveloppé. Le progrès apparaît comme le déploiement ou l'agrandissement d'une structure donnée dès l'origine ; il obéit à un principe interne de conservation. La métaphore biologique ouvre la voie au mot « évolution » qui ne va pas tarder à s'imposer avec Herbert Spencer, en provenance de la théorie de la génération, puis de l'embryologie. On ne parle plus dès lors des seuls « progrès de l'esprit humain », mais du Progrès, avec majuscule. Quitte à le monnayer en progrès scientifique, technique, social, moral... Et la finalité de ce mouvement historique, la « liberté » d'après Condorcet, n'est plus la même. Elle devient, avec Comte, la maîtrise rationnelle des relations sociales par la science de la société — celle qu'il baptise du nom de sociologie. La plupart de ses successeurs n'ont pas pardonné à Comte d'avoir eu le juste sentiment qu'une telle maîtrise ne saurait être assurée par les seuls « sociocrates » : il faut mobiliser les affects pour conserver l'ordre social. D'où, au nom de la « politique positive », son projet d'une nouvelle religion, celle de l'Humanité, la première religion démontrée qu'annonçait déjà la 46^e leçon du *Cours* !

Le monde anglo-saxon n'a jamais adhéré à la version française de la philosophie du progrès. Il a composé la sienne propre en combinant aux leçons de Bacon celles de Spencer. Ingénieur des chemins de fer, auteur d'une œuvre philosophique immense aujourd'hui trop méconnue eu égard à l'immense retentissement qu'elle eut de son temps et à l'impact qu'elle continue d'avoir sur nos modes de pensée. Spencer développe l'idée d'une évolution et d'un développement de l'ordre par différentiations et intégrations

successives. En 1882, Andrew Carnegie, créateur du trust de l'acier et philanthrope américain, invite Spencer à New York et organise en son honneur un banquet. Les capitalistes de la côte est lui font un triomphe. Ne présente-t-il pas tout désordre comme essentiellement provisoire, destiné à accoucher d'un ordre supérieur ? On a parlé à propos de son œuvre de « théodicée du capitalisme sauvage ».

Dans une lettre datée de 1849, le jeune Ernest Renan qui rédigeait alors *L'Avenir de la science* présentait l'esprit de l'ouvrage en ces termes : « Je veux dire dès le début le sens que j'attache à la science, comment elle est à mes yeux inséparable de la philosophie, comment elle n'a de valeur que par la philosophie qu'elle renferme, comment la science est une religion, sacrée au même titre qu'elle, puisque seule elle peut résoudre à l'homme le grand problème des choses, etc. Ce sera ma profession de foi scientifique, mon *Discours de la méthode*, mon *Novum Organum*. » Dans le corps de l'ouvrage lui-même, Renan affirme que « la science renferme l'avenir de l'humanité », et que le dernier mot de la science moderne consistera à « organiser scientifiquement l'humanité ». Sur cette base, l'auteur propose une analyse historique et critique des religions antérieures. Il accorde une attention particulière aux origines du christianisme. Ces études l'éloignent toujours davantage du positivisme d'Auguste Comte. Il récuse l'idée d'une « religion de l'humanité » – puisque c'est la science elle-même qui constitue la nouvelle religion. Il dénonce le simplisme de la conception comtienne de l'histoire, incapable de rendre compte des « lignes infiniment flexueuses de la marche des sociétés humaines, leurs embranchements, leurs caprices apparents ». Autant dire qu'on ne trouve pas dans *L'Avenir de la science* une vision simple du progrès. Non seulement l'histoire atteste que, dans la vie de l'humanité, il peut y avoir des périodes d'obscurcissement, le Moyen Âge par exemple, mais aussi des développements incomplets, des transitions inabouties. On remarque aussi que Renan ne manque jamais de souligner le coût des progrès, la brutalité et les orages dont les hommes le paient. De telles positions ont ainsi pu se réclamer aussi bien la gauche républicaine que Maurras ou Barrès...

D'un côté, quelques esprits confrontent sarcastiquement le discours sur le Progrès aux dures réalités sociales, et de l'autre, certains récuse ce discours au nom d'une conception métaphysique de l'ordre social, par un anti-progressisme de principe. Flaubert manie la dérision dans le *Dictionnaire des idées reçues*. Baudelaire, en qui l'on a souvent voulu voir à tort un penseur de la modernité, dénonce l'idée du progrès comme « une idée grotesque qui a fleuri sur le terrain pourri de la fatuité moderne ». Il couvre de sarcasmes la vapeur, l'électricité, l'éclairage au gaz ; il écrit des tirades contre la photographie et se plaint de l'invasion des arts par l'industrie ! Il théorise en affirmant qu'on assiste au triomphe de l'ordre matériel sur l'ordre spirituel. Dans la même veine, on a voulu intégrer Rimbaud au camp

progressiste. N'a-t-il pas écrit qu'il fallait être « résolu-ment moderne ». Mais c'était pur sarcasme au pic du désespoir. Sa correspondance est explicite. Il ne se rallie jamais au monde moderne. Il ne s'est nullement converti aux affaires en Abyssinie. Il essaye de survivre tant bien que mal sur cette côte torride au beau milieu de « la canaille » des trafiquants d'armes. Et il n'a manifestement qu'une idée en tête, celle de retrouver à ses propres yeux une certaine respectabilité.

Mais c'est sans aucun doute Nietzsche qui peut faire figure de penseur anti-progressiste par excellence. Il écrit dans *L'Antéchrist* : « L'humanité ne représente pas un développement vers le mieux, vers quelque chose de plus fort, de plus haut ainsi qu'on le pense aujourd'hui. Le progrès n'est qu'une idée moderne, c'est-à-dire une idée fautive. Dans sa valeur, l'Européen d'aujourd'hui reste bien loin au-dessous de l'Européen de la Renaissance. Se développer ne signifie absolument pas nécessairement s'élever, se surhausser, se fortifier ; par contre, il existe une continue réussite de cas isolés sur différents points de la terre au milieu des civilisations des plus différentes. Ces cas permettent d'imaginer un type supérieur, quelque chose qui par rapport à l'humanité tout entière constitue une espèce d'homme surhumain. » La philosophie du surhomme se présente expressément en opposition directe à la philosophie du progrès comme idée moderne à combattre et à détruire.

► ANSART P., *Sociologie de Saint-Simon*, Paris, PUF, 1970.
 – ARON R., *Les désillusions du progrès*, Paris, Calmann-Lévy, 1969.
 – BACHELARD G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF « Quadrige », 1994.
 – BACON F., *Du progrès et de la promotion des savoirs*, trad. et avant-propos M. Le Dœuff, Paris, Gallimard, 1991.
 – BERGSON H., *Les deux sources de la morale et de la religion*, Paris, PUF « Quadrige », 1995.
 – BOSSUET J.B., *Œuvres*, Paris, Gallimard « Pléiade », 1961.
 – COMTE A., *Cours de philosophie positive*, Paris, Hermann, 1990.
 – CONDORCET, *L'Esquisse*, Paris, Garnier-Flammarion, 1988.
 – DESCARTES R., *Œuvres*, Paris, Vrin, 11 vol., 1974.
 – DIDEROT D. & D'ALEMBERT, *L'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, rééd., Pergamon Press, 1969.
 – JAURÈS J., *Les pages choisies*, Paris, Rieder, 1928.
 – LECOURET D., *Contre la peur*, suivi de *Critique de l'appel de Heidelberg* (1990), rééd., Paris, PUF « Quadrige », 1999.
 – *L'avenir du progrès*, Paris, Textuel, 1997.
 – MARCUSE H., *L'homme unidimensionnel*, Paris, Minuit, 1968.
 – MARX K., *Œuvres*, Paris, Gallimard « Pléiade », 1979.
 – NIETZSCHE F., *L'Antéchrist*, Paris, 10/18, 1967.
 – PASCAL B., *Œuvres*, Paris, Gallimard « Pléiade », 1954.
 – PLEKHANOV G., *Œuvres philosophiques*, t. 1, Genève, 1883 (trad. L. & J. Cathala, Moscou, Éd. en langues étrangères).
 – RENAN E., *Œuvres complètes*, Paris, H. Psichari, 10 vol., 1947-1961.
 – SOREL G., *Les illusions du progrès*, Paris, Marcel Rivière, 1908.
 – TAGUIEFF P. A., *Le sens du progrès : Une approche historique et philosophique*, Paris, Flammarion, 2004.
 – ZINOVIEV A., *L'avenir radieux*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1978 ; *Le communisme comme réalité*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1981.

Dominique LECOURET

→ Bacon ; Comte ; Continuité ; Laplace ; Paradigme ; Positivismisme ; Royal Society ; Rupture ; Spencer.

PROPAGATION
 PHYSIQUE/MATHÉMATIQUES

On ignorera toujours quel est le premier homme qui, ayant jeté un caillou dans une eau calme, a observé des ondes circulaires s'éloignant du point de chute. Le mouvement des vagues semble montrer que l'eau, du moins celle qui est proche de la surface, s'éloigne du point où est tombé le caillou. Mais il n'en est rien : un petit bout de bois flottant se contente d'osciller légèrement autour de sa position initiale. Ce n'est pas l'eau qui se déplace, mais la déformation de la surface. Le phénomène est complètement différent du mouvement d'un corps mobile. Il serait plus juste de préciser qu'il l'est tant qu'on ne parle que de mouvements macroscopiques, mais cette restriction n'a été connue qu'avec l'avènement de la physique quantique.

Du point de vue de la physique, les phénomènes de propagation les plus étudiés relèvent de deux grands domaines : la mécanique des milieux continus et l'électromagnétisme. Le mieux compris est la propagation des ondes électromagnétiques (lumière comprise bien entendu). Cela peut paraître paradoxal puisque plusieurs des phénomènes de propagation relevant de la mécanique des fluides, comme les ondes de surface dont nous venons de parler et le son, sont accessibles à l'observation directe. L'avantage des ondes électromagnétiques dans le vide est qu'elles sont régies par un système linéaire. Les phénomènes de propagation relevant de la mécanique des milieux continus sont très variés. Tant que les perturbations qui se propagent sont assez faibles pour relever d'une approximation linéaire, on y retrouve les propriétés des ondes électromagnétiques. Dans les autres situations, il faut d'abord distinguer entre solides et fluides. Dans ces derniers, les phénomènes de propagation se produisent lorsqu'on peut négliger la viscosité. Dans les liquides, les complications sont dues à l'existence de frontières mobiles (la surface de l'eau dans l'exemple que nous avons mentionné). Dans les gaz, c'est la compressibilité qui peut donner lieu à des variations brusques de pression caractéristiques des ondes de choc.

Du point de vue mathématique, l'électromagnétisme, la mécanique des solides élastiques et celle des fluides non visqueux ont ceci de commun qu'ils sont régis par des équations ou des systèmes aux dérivées partielles hyperboliques. Les concepts jumeaux de surface caractéristique et de courbe bicaractéristique y jouent le rôle fondamental. Ils sont difficiles à présenter en raison d'une sophistication mathématique difficile à contourner d'une part, de leurs aspects très variés de l'autre. Ces différents aspects n'ont été unifiés qu'aux alentours de 1900, surtout avec les travaux d'Hadamard. Partons du cas simple d'une équation scalaire, linéaire à coefficients constants et homogène, c'est-à-dire que toutes les dérivées qui y figurent sont du même ordre. Telle est l'équation des ondes, dite aussi de d'Alembert : $\partial^2 u / \partial x_0^2 - c^2 (\partial^2 u / \partial x_1^2 + \partial^2 u / \partial x_2^2 + \partial^2 u / \partial x_3^2) = 0$, qui régit les ondes

électromagnétiques et acoustiques (en utilisant l'indice zéro pour la composante temporelle et en notant c la vitesse de propagation qui est dans ce cas constante). Une telle équation a des solutions de la forme $\exp(ip \cdot x)$, appelées ondes planes. Nous avons noté $p \cdot x$ pour $p_0 x_0 + \dots + p_3 x_3$, où les x_j sont les variables indépendantes et les p_j des coefficients constants ; dans cette formule x et p appartiennent à des espaces en dualité. Les hyperplans d'équation $p \cdot x = c^t$ correspondant à ces solutions sont dits caractéristiques. Dans le cas de l'équation des ondes, on a $p_0^2 = c^2 (p_1^2 + p_2^2 + p_3^2)$, ce qui exprime que l'onde se propage à la vitesse c . Les hypersurfaces caractéristiques sont les enveloppes de familles d'hyperplans caractéristiques, ce qui revient à dire que si on écrit $S(x) = 0$ leur équation, S vérifie une équation aux dérivées partielles du premier ordre, l'équation eikonale,

$$(\partial S / \partial x_0)^2 - c^2 [(\partial S / \partial x_1)^2 + (\partial S / \partial x_2)^2 + (\partial S / \partial x_3)^2] = 0,$$

dans le cas de l'équation des ondes. Lorsque les coefficients ne sont plus constants, par exemple dans le cas de la lumière dans un milieu d'indice de réfraction variable, il n'y a plus de solutions ondes planes. La vitesse dépend du point considéré et de la direction de propagation. En revanche, l'équation eikonale se généralise très naturellement et avec elle la définition des caractéristiques. Ces hypersurfaces sont celles qui peuvent porter une discontinuité de la solution ou de ses dérivées. Revenant un instant au cas des équations à coefficients constants, on voit que ces singularités se propagent à la même vitesse que les ondes planes. Équation eikonale et caractéristiques se généralisent aussi aux systèmes. Équations et systèmes hyperboliques peuvent être définis, au moins schématiquement, comme ceux qui donnent lieu à une propagation à vitesse finie. Dans le cas des systèmes du premier ordre, le problème de Cauchy consiste à déterminer la solution connaissant sa valeur à un instant t_0 ; il admet toujours une solution unique lorsque toutes les données sont analytiques. Les systèmes hyperboliques sont ceux pour lesquels ce résultat subsiste si on lève l'hypothèse d'analyticité. On démontre que ceci est équivalent à la « propagation du support » qui fait apparaître un troisième aspect du concept de caractéristique et les courbes bicaractéristiques. Si la solution s'annule à l'instant t_0 en dehors d'une région bornée R_0 , à tout instant t_1 elle s'annule en dehors d'une autre région bornée R_1 qui peut être construite de la façon suivante. La résolution de l'équation eikonale fait apparaître un système différentiel du type de Hamilton-Jacobi dans l'espace des (x, p) (c'est l'espace de phase ou fibré cotangent). Les trajectoires de ce système sont les courbes bicaractéristiques et leurs projections sur l'espace des x les bandes bicaractéristiques. La région R_1 est celle que les bicaractéristiques issues de R_0 atteignent à l'instant t_1 . L'analyse microlocale permet de généraliser l'analyse des solutions en ondes planes en faisant l'étude au voisinage d'un point de l'espace de phase.

Ce qui précède concernait les systèmes linéaires.

Pour les autres, caractéristiques et bicaractéristiques sont celles du système linéaire tangent, mais celui-ci ne peut être utilisé que là où la solution est assez régulière. Le point essentiel est que les unes et les autres peuvent maintenant dépendre de la solution. Malgré un quart de siècle d'intenses efforts, seul le cas d'une dimension d'espace est actuellement bien compris. Les caractéristiques sont alors identiques aux bicaractéristiques et celles qui sont issues de deux points distincts peuvent se croiser en créant une discontinuité au point de rencontre. C'est ce qui se produit dans les ondes de choc. Il n'y a plus alors unicité de la solution mathématique mais, parmi les solutions, une seule respecte la loi de l'entropie et est donc acceptable physiquement. C'est aussi celle qu'on obtient en ajoutant une force de viscosité puis en faisant tendre celle-ci vers zéro.

► HADAMARD J., *Leçons sur la propagation des ondes*, Paris, Hermann, 1903.

Martin ZERNER

→ Constantes physiques ; Éther.

PROPOSITION

LOGIQUE

Classification des propositions

Dans l'*Organon* d'Aristote, la proposition est appelée prémisses : « une prémisses (*protasis*) est une phrase qui affirme ou nie quelque chose de quelque chose » (*Premiers Analytiques*, I,24a16). Elle est composée de deux termes qui sont le sujet et le prédicat.

Le traité d'Aristote intitulé le *Peri Hermeneias* nous présente une première classification logique des propositions. Il s'agit des propositions déclaratives (*logos apophantikos*), celles qui peuvent être dites vraies ou fausses et qu'Aristote présente quant à leur quantité (propositions universelles, propositions particulières) et quant à leur qualité (propositions affirmatives, propositions négatives), excluant les propos rhétoriques ou poétiques, ainsi que les impératifs. Les médiévaux ont désigné par les lettres Λ et B respectivement les quatre types de proposition suivants : « appartenir à tout » ; « n'appartenir à aucun », « appartenir à quelque », « ne pas appartenir à quelque ».

Les propositions universelles sont celles qui contiennent des mots tels que « tout », « aucun ». Ce sont ces propositions que l'on retrouve dans les syllogismes valides avec usage de lettres ou variables : « Si B appartient à tout A et si C appartient à quelque A, alors C appartient à quelque B. »

Le statut de la proposition a profondément changé suite au développement de la logique mathématique à la fin du XIX^e s. On peut rendre compte de ce changement à travers deux points : 1) La logique classique fait disparaître la distinction entre « propositions d'inhérence et

propositions de relation » (J. Cavailles, *Logique mathématique et syllogisme*, 1994, p. 584). La possibilité d'exprimer des relations asymétriques comme « X est plus grand que Y » suppose que l'on mette fin à l'exclusivité de la forme prédicative aristotélicienne du type « S est P » et de ne plus considérer cette forme que comme un cas particulier de relation, celle où le sujet ou l'argument est au nombre de un, autrement dit c'est le cas où le prédicat est à une place. Mais il n'y a aucune raison de se limiter à un seul sujet ou à une seule place vide ; la relation peut être binaire ou même n-aire (à n termes), n'étant un entier naturel. 2) Par ailleurs, la quantification impose un usage quasi exclusif de l'extension ; les rapports de compréhension passent à l'arrière-plan : « Une classe sera définie par une propriété, non une propriété par les individus qui la possèdent » (Cavaillès, *op. cit.*, p. 591). C'est la notion d'individu quelconque qui est au principe de la quantification et non celle de tel ou tel individu. Cette nuance est d'importance puisqu'elle permet de comprendre pourquoi le mode *Darapti* qui repose sur l'importation existentielle des propositions universelles est invalide : en effet, contrairement à ce que laisse entendre Aristote, les propositions universelles ne sont pas plus puissantes existentiellement que les propositions existentielles, mais bien en réalité plus faibles. Il appartiendra à Frege et à Russell de faire cette rectification. Une proposition universelle est en fait une conditionnelle par laquelle aucune affirmation d'existence n'est induite : dire « tous les hommes sont mortels » ne peut avoir de force existentielle que si j'ajoute « il y a des hommes ». « En un sens la proposition affirmative particulière dit moins que l'universelle affirmative, mais en un autre sens, elle dit plus, puisqu'elle asserte la réalisation des concepts, alors que la subordination a lieu aussi dans le cas des concepts vides – ce qui se produit invariablement dans le cas des propositions universelles affirmatives » (G. Frege, *Les lois fondamentales de l'arithmétique*, note au § 13).

Proposition, raisonnement, assertion

Nous venons de voir que dans une proposition universelle se trouve de façon sous-jacente une conditionnelle ; c'est un des bons arguments en faveur de ceux qui voient dans la proposition un raisonnement raccourci. Ainsi l'usage fait par C.S. Peirce de « l'illation » permet de considérer toute proposition comme une argumentation. L'illation notée $\dashv\vdash$ sert à exprimer aussi bien la relation d'implication que celle d'inclusion. C'est une « relation sémiotique première et fondamentale » (2.444) ; elle permet d'identifier « la proposition avec l'inférence et le terme avec la proposition [...] ». En conséquence de l'identification en question, dans $S \dashv\vdash P$, je parle de S indifféremment comme d'un sujet, d'un antécédent ou d'une prémisses, et de P comme d'un prédicat, d'un conséquent ou d'une conclusion » (3.175). La proposition comme raisonnement raccourci se fonde sur le privilège accordé à la relation conditionnelle à laquelle se ramène selon

Peirce la proposition catégorique : « Il y a là une grande force ; l'idée même de la logique impose au logicien la conception de l'inférence, l'inférence contient celle de l'inférence nécessaire, et celle-ci contient l'idée de la proposition conditionnelle universelle » (2.354). Cette position est pragmatiste dans la mesure où l'usage de la proposition comme d'une argumentation prend le pas sur la différence de structure entre une proposition et un raisonnement.

L'usage de la proposition peut aussi être un usage assertif. Quand la proposition est donnée comme véhicule d'une vérité dont on a à rendre compte, alors c'est une assertion : « Il faut distinguer entre une proposition et son assertion. Confondre ces deux choses, c'est comme confondre l'écriture de son nom négligemment apposée sur un morceau de papier, peut-être pour pratiquer la chirographie, avec l'attachement de la signature à un acte légal notarié » (Peirce, *The New Elements of Mathematics*, IV, cité par C. Tiercelin, 1993, p. 283).

La composition des propositions

Peirce tout comme Frege retient la métaphore chimique de la saturation et de l'insaturation pour rendre compte des constituants de la proposition : le rhème (prédicat + copule) est insaturé ; et le sujet est tout ce qui peut remplir les blancs d'un rhème. Voulant mettre fin aux ambiguïtés liées à la notion de sujet chez Aristote, notion qui est utilisée à la fois pour des expressions telles que « le nombre entier 2 » et « tous les nombres entiers », Frege a substitué au couple sujet/prédicat le couple argument/fonction. Le gain premier de ce changement de langage est la distinction entre la relation de subordination d'un individu sous un concept et la relation de subordination d'un concept à un autre concept. La distinction entre forme logique et forme grammaticale permet d'éviter les confusions induites par la structure linguistique des propositions.

Sens, phrase, proposition

C'est que les propositions en logique s'entendent en un sens différent des phrases. B. Bolzano distingue entre la proposition qui exprime un sens objectif et qui est en soi et la proposition verbale : « Ce que j'entends par proposition, ce n'est pas pour moi ce que les grammairiens appellent une proposition, à savoir l'expression verbale mais uniquement le sens de cette expression, lequel nécessairement et toujours ne peut être que vrai ou faux : une proposition en soi ou une proposition objective [...]. Que nous pensions à une proposition, que nous jugions qu'une chose soit ainsi ou autrement, cela est quelque chose de réel, qui est apparu en un temps déterminé ; les signes écrits, par lesquels nous couchons quelque part de telles propositions, sont de même quelque chose qui appartient à la réalité ; mais les propositions mêmes n'appartiennent à aucun temps et à aucun lieu » (cité par Jan Berg, *Bolzano's Logic*, 1962, p. 47-48).

Ce que l'on écrit ou prononce ce sont des phrases, non des propositions ; c'est pourquoi B. Bolzano, aussi bien que C.S. Peirce et que G. Frege considèrent que les propositions ne cessent pas d'être ce qu'elles sont même quand personne ne les pense ou ne les exprime. « Je n'emploie pas le mot "proposition" (*Satz*) exactement au sens des grammairiens. La grammaire a des propositions subordonnées. Une subordonnée, prise séparément, n'a pas toujours un sens dont on puisse examiner la vérité, tandis que l'ensemble propositionnel auquel elle appartient a un sens qui supporte cet examen » (*Recherches logiques*, I. *La pensée*, in *Écrits logiques et philosophiques*, p. 174).

Les propositions sont donc le véhicule d'un sens qui est l'unité logique soumise à l'examen et qui est de part en part objective. Il ne s'agit pas d'une signification telle que la langue peut la donner, mais il s'agit d'un mode d'accès à la référence. Considérée comme un nom propre complexe, la proposition ainsi entendue pose des problèmes quant à sa référence : si elle est assimilée à un nom propre et si tout nom propre réfère à un objet, faut-il dire que la vérité à laquelle une proposition réfère est un objet ?

Encore une fois, ce sont les acquis du symbolisme qui permettent de lever les difficultés. Comme le note Wittgenstein, c'est notre propension à vouloir tout nommer qui nous fait rencontrer des obstacles. En retenant cette leçon B. Russell, a pu indiquer que les propositions n'étaient pas comme des noms propres ; elles ne désignent pas un objet quelconque. Frege avait calqué les propositions sur les noms propres et les valeurs de vérité sur les objets ; assimilant ainsi les propositions à des noms qui désignent l'objet vrai et l'objet faux. B. Russell, tenté un moment de faire des propositions des noms pour des faits, reconnu qu'il y avait là une inexactitude. En effet, à chaque fait correspondent deux propositions, l'une vraie, l'autre fausse ; par exemple : « Socrate est vivant » et « Socrate n'est pas vivant ». Ainsi, dans la mesure où deux propositions se rapportent à un même fait, aucune d'elles ne peut le nommer ; les faits peuvent donc être assertés, mais ne peuvent pas être nommés, par distinction d'avec les choses : « La relation entre la proposition et le fait est totalement différente de la relation entre le nom et la chose qu'il nomme. Pour chaque fait il y a deux propositions, et rien dans la nature du symbole ne nous montre laquelle est la vraie et laquelle est la fausse. S'il y avait quelque chose qui le montre, on pourrait découvrir la vérité sur le monde par le seul examen des propositions, sans même regarder autour de soi » (*Recherches logiques*, *op. cit.*, p. 346).

Wittgenstein qui avait attiré l'attention de Russell sur ce point, à savoir que les propositions ne sont pas des noms, insistera pour sa part dans le *Tractatus* sur l'idée selon laquelle les propositions ne peuvent pas être objet de discours ; on ne peut en parler, on ne peut que les montrer. Avoir du sens pour une proposition est équivalent à avoir des conditions de vérité avec lesquelles elle exprime son accord. Avoir du sens pour

une proposition c'est dire que l'état de choses qu'elle exprime est possible, possible signifie qu'on peut l'affirmer comme le nier (Wittgenstein, de façon continue dans ses œuvres, s'oppose à un concept ontologique du possible : « C'est une des erreurs les plus profondément enracinées de la philosophie que de regarder la possibilité comme l'ombre de la réalité », *Grammaire philosophique*, trad. fr., p. 288) ; en ce sens il n'y a pas de faits nécessaires ; tous les faits sont contingents. Mais cela n'est pas une classification comme "tous les lions ont une queue" qui est une question d'expérience et pourrait être autre. Nul fait ne peut être nécessaire, car s'il y a sens à l'affirmer, il y a sens aussi à le nier. S'il n'y avait pas ce choix, il n'y aurait aucun sens à faire l'assertion. La négation d'une proposition doit avoir un sens. Mais s'il y avait un fait nécessaire, il ne pourrait pas être autre » (L. Wittgenstein, *Wittgenstein und die Wiener Kreis*, 1967, p. 93).

Pour qu'une proposition soit douée de sens, il faut donc que sa négation soit possible. Ainsi une proposition qui est nécessairement vraie, comme une tautologie, est dépourvue de sens ; c'est pourquoi les propositions nécessaires n'expriment rien du monde. Elles ne font qu'exprimer des propriétés du langage.

Une proposition est comme un tableau ou une image d'un état de choses ; elle en est le reflet : « Si une proposition affirme un fait, il doit y avoir quelque chose de commun entre la structure de la proposition et celle de ce fait » (*Tractatus logico-philosophicus*, 2.18).

Proposition et règle

Quelques années plus tard (1929), Wittgenstein rompt avec l'essentialisme induit par cette conception : « On croit d'abord avoir un concept déterminé de la proposition, abstraction faite des règles, et ensuite on exige que ces règles correspondent au concept — comme si les règles suivaient du concept de proposition plutôt que de le constituer. Pour nous le calcul des propositions constitue l'essence de la proposition » (Wittgenstein, *Dictées à Waissmann et pour Schlick*, p. 188).

Le calcul des propositions que Wittgenstein mentionne ici est fondé sur la théorie des fonctions de vérité : la proposition est jugée vraie ou jugée fautive selon l'attribution des valeurs de vérité qui est effectuée. Les valeurs de vérité respectent les principes de contradiction (le vrai n'est pas mêlé au faux mais s'oppose à lui) et du tiers exclu (il n'y a pas d'autre valeur que le vrai et le faux). C'est la possibilité d'une assignation de valeurs de vérités qui fonde l'essence d'une proposition et non un élément intrinsèque.

Wittgenstein défend l'idée d'une « comparaison » qui devrait nous permettre d'« apposer la proposition à la réalité » comme « étalon de mesure » (*ibid.*, III, § 43, p. 75) ; non pas au sens où les propositions sont prises une à une et comparées à des états de choses isolées : « Si j'appose une règle graduée le long d'un objet de

l'espace, j'appose à la fois toutes les graduations », nous comparons toujours un système entier à la réalité et non une proposition élémentaire. Si on objecte que l'étalon de mesure n'appartient pas lui-même à la réalité, c'est parce qu'on oublie que l'étalon qui remplit la fonction du sens est nécessairement symbolique et en tant que tel a des caractéristiques matérielles : « L'indication de lieu "Londres" n'a de sens que s'il est possible de chercher Londres » (*ibid.*, 46, p. 75). En parlant de règle graduée et d'étalon de mesure, Wittgenstein veut rompre avec le langage correspondantiste qui fut le sien lors du *Tractatus* : non, la proposition n'est pas une image de la réalité ; sa structure n'est pas une reproduction de la structure du réel pour la simple raison, énoncée par Berkeley depuis longtemps déjà, que les mots ne ressemblent pas aux choses. Mais si nous abandonnons cette conception, nous pouvons cependant garder le mot « image » au sens de quelque chose qui est appliqué contre le réel, à la manière d'une règle appliquée contre un objet pour le mesurer. L'avantage du mot « image » c'est qu'il « nous retient de penser exclusivement au langage verbal à propos de l'expression "proposition" » (Wittgenstein, *Dictées...*, p. 255).

► ARISTOTE, *Premiers analytiques*, trad. fr., Paris, Vrin ; *De Interpretatione*, trad. fr., Paris, Vrin. — BERG J., *Bolzano's Logic*, Stockholm, Almqvist & Wiksell, 1962. — BOLZANO B., *Die Wissenschaftslehre*, I, 1837, in *Grundlegung der Logik*, Hambourg, 1963. — CAVAILLES J., *Logique mathématique et syllogisme*, in *Œuvres complètes*, Paris, Hermann, 1994. — FREGÉ G., *Grundgesetze der Arithmetik, Begriffsschrift abgeleitet*, vol. 1, Iéna, H. Pohl, 1893 ; rééd. avec le vol. 2 (1903), Hildesheim, G. Olms, 1962 ; *Recherches logiques*, I. *La pensée*, in *Œuvres logiques et philosophiques*, trad. fr., Paris, Le Seuil, 1971. — TIERCELIN C., *La pensée-signe, études sur C.S. Peirce*, Nîmes, J. Chambon, 1993. — WITTEGENSTEIN L., *Wittgenstein und die Wiener Kreis. (Conversations avec le cercle de Vienne)*, Wittgenstein Schriften 3, Francfort-sur-le-Main, Suhrkamp, 1967 ; *Dictées à Waissmann et pour Schlick*, trad. fr. Paris, PUF, 1997.

Ali BENMAKHOLOU

→ Démonstration ; Forme ; Méthode ; Nécessité ; Validation ; Wittgenstein ; Wittgenstein et le Cercle de Vienne.

PTOLÉMÉE Claude, 100-135

Mathématicien, astronome et géographe grec. Il est l'auteur de l'*Almageste*, synthèse de toutes les connaissances astronomiques, mathématiques, cosmologiques de l'Antiquité, qui a fait autorité pour la période hellénistique et a été transmis par l'École d'Alexandrie, où le mathématicien Pappus (IV^e s. apr. J.-C.) en a inauguré les innombrables commentaires. L'astronomie arabe s'est construite autour des travaux sur l'*Almageste*, dont le contenu a d'abord été transmis par l'intermédiaire de l'Inde. La *Grande Syntaxe* (*Almageste* est le terme arabe *al-megiste*) fut traduite en arabe au moins trois fois. La tradition médiévale de l'*Almageste* ne commence qu'au XII^e s. Une dernière école de

commentateurs, celle des humanistes du XVI^e s., a permis, par les traductions de cet ouvrage, le renouvellement de l'astronomie européenne : Copernic ou Kepler sont incompréhensibles sans une connaissance profonde de l'*Almageste*. (Ptolémée y développe en effet une cosmologie ainsi qu'une certaine épistémologie et même une philosophie de l'astronomie et de la cosmologie.) Parmi les treize livres qui la composent le premier traite de la Terre et de sa position au centre de l'Univers ; la fin du livre I et le livre II s'intéressent aux problèmes d'astronomie sphérique ; les livres III à VI comprennent la théorie du mouvement du Soleil et de la Lune ; quant aux livres VII et VIII ils traitent de la théorie des étoiles fixes et les livres IX à XIII de la théorie des cinq planètes.

Ptolémée tente de prouver, sans que subsiste le moindre doute, que même les phénomènes célestes les plus confus et les plus désordonnés peuvent être exprimés en termes de concepts géométriques et cosmologiques invariables : il doit donc trouver de tels concepts et montrer que les phénomènes peuvent s'en déduire. Le concept central pour réaliser cette tâche est celui de mouvement circulaire uniforme. Le caractère philosophique et cosmologique de ce concept n'est plus à démontrer. De la même façon il met en place en construisant les bases d'une astronomie mathématique des formes de rationalité qui restent à la base de notre concept de science : le temps comme variable indépendante, la sphère comme base pour constituer un observateur rationnel. Ptolémée est l'auteur d'un ouvrage d'astrologie qui n'interfère en rien avec l'*Almageste*, le *Tetra-bible*, où il poursuit sa recherche d'une physique et d'une cosmologie adéquate à son astronomie dans les *Hypothèses planétaires*, réalisation sphérique de l'astronomie (cette recherche semble avoir été au centre de son travail théorique). Ses *Tables manuelles* renferment des paramètres plus précis pour les mouvements planétaires.

Ptolémée est aussi l'auteur d'un très important traité, l'*Optique*. Ses *Harmoniques* ont profondément inspiré Kepler qui tenta d'en publier une traduction ; ses *Analemma* et son *Planisphérique*, qui portent sur des problèmes précis d'astronomie sphérique et l'usage de certains instruments astronomiques, nous sont parvenus grâce à une version arabe retraduite en latin.

Auteur aussi d'un immense traité de *Géographie* (description du monde connu, habité), Ptolémée, par l'extraordinaire richesse de son œuvre, est l'équivalent d'Euclide pour l'astronomie et la cosmologie.

► GINGERICH O., « Was Ptolemy a fraud ? », *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, 21, 1980 ; « Ptolemy revisited », *ibid.*, 22, 1982. — KUHN T., *La révolution copernicienne*, trad. fr., Paris, Fayard, 1973. — LLOYD G.E.R., *La science grecque après Aristote*, trad. fr., Paris, La Découverte, 1990. — NEWTON R.R., *The crime of Claudius Ptolemy*, Londres, John Hopkins Press, 1977.

Jean-Jacques SZCZECINIARZ

→ Géocentrisme ; Héliocentrisme ; Isopérimètre ; Vision.

PUTNAM Hilary, né en 1926

Le philosophe américain H. Putnam, professeur à Harvard, est l'auteur d'une œuvre importante en philosophie des sciences, ainsi qu'en philosophie de l'esprit et du langage. Il a d'abord défendu, contre le positivisme, une forme de réalisme scientifique, fondée sur l'idée que les termes des théories scientifiques ne sont pas réductibles à des définitions opérationnelles, mais reposent sur des « stéréotypes » désignant des espèces naturelles indépendantes de notre connaissance. Cela le conduisit notamment à critiquer la thèse de Kuhn selon laquelle les théories scientifiques sont relatives à des « paradigmes ». Il rejette aussi le conventionnalisme géométrique et défend une théorie réaliste des entités mathématiques. Ensuite Putnam s'est éloigné de la théorie réaliste de la vérité et de la référence. Il défend un « réalisme interne », plus proche du pragmatisme de Peirce : la réalité décrite par la science est relative à notre connaissance, tout en étant indépendante de nous. La vérité est l'« acceptation rationnelle à la limite de l'enquête scientifique ».

► *Collected Papers*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 3 vol., 1975, 1983. — *Meaning and the Moral Sciences*, Londres, Routledge, 1978. — *Reason, Truth and History*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1981 (trad. fr. Paris, Minuit, 1986). — *Realism with a Human Face*, Cambridge, Harvard Univ. Press, 1990 (trad. fr., Paris, Le Seuil, 1994).

► MARGALIT A. éd., *Meaning and Use*, Dordrecht, Reidel, 1979.

Pascal ENGEL

→ Pragmatisme ; Réalisme ; Réductionnisme.

PYTHAGORE

Une obscurité presque totale s'attache à la figure de Pythagore, réformateur religieux, mathématicien et premier « philosophe », si l'on en croit Diogène Laërce (*Vie*, 8). Né à Samos en 558 (Jamblique), en 580 (Porphyre) ou en 606 avant J.-C. (D. Laërce), « Pythagore », « celui qui a été annoncé par la Pythie », tenait son nom de l'annonce de sa naissance faite à son père, Mnésarchos, lors d'un voyage à Delphes ; il serait mort vers 497. Les doxographies néopythagoriciennes de l'ère chrétienne ont compilé des auteurs du IV^e s. avant J.-C. comme Aristoxène de Tarente, Dicéarque de Messénie, Héraclide du Pont ou Timée de Tauroménium, avant d'inspirer les *Vies de Pythagore* de D. Laërce, Porphyre et Jamblique (fin du II^e s.-début du IV^e s. de notre ère).

Héraclite (frag. B 129), Ion de Chios (frag. B IV), Hérodote (IV, 95), Démocrite, qui lui aurait consacré un livre (frag. A XXXIII), et Empédocle (frag. B 129) le mentionnent brièvement. Platon ne cite le nom de Pythagore qu'une seule fois (*Rép.*, X, 600 b) à propos de la règle de vie « pythagorique » et parle des « pythagoriciens » en un seul passage (*Rép.*, VII, 530 d) à propos de l'harmonie et de l'astronomie. Aristote, dont

L'ouvrage *Sur les pythagoriciens* est perdu, ne fait pas allusion à Pythagore, mais à « ceux qu'on appelle pythagoriciens » (*Métaphysique*, A, 5, 985 b).

Selon Galien, Flavius Josèphe, Claudien Mamert, Lucien et Plutarque, Pythagore n'aurait rédigé aucun ouvrage. Pour Alexandre Polyhistor, cité par D. Laërce (*Vie*, VIII, 25-33), il aurait laissé des *Mémoires pythagoriques*, et selon Héraclite, sur lequel s'appuie D. Laërce (VIII, 6-7), il aurait écrit trois traités : *De l'éducation*, *De la politique*, et *De la nature*. D'après le même Diogène (III, 9), Philolaos aurait détenu les trois « livres pythagoriques » que Platon chargea Dion de Syracuse de lui acheter pour cent mines. On mentionne en outre un traité *Du monde*, un *Traité sacré*, un traité *De l'âme*, un *De la piété*, et quelques autres encore. Les célèbres *Vers d'or*, poème de 71 vers dont Hiéroclès donnera un commentaire, ne sont pas de Pythagore, mais d'un compilateur tardif du IV^e s. de notre ère qui a recueilli des fragments du *Discours sacré* attribué à Pythagore.

On ne connaît pas les découvertes exactes liées au nom de Pythagore en matière d'arithmétique, de géométrie, d'acoustique et d'astronomie. Il n'est pas certain que la démonstration du célèbre théorème qui porte son nom, et que les arpenteurs égyptiens connaissaient de façon empirique, lui soit due. Mais il semble bien, selon la tradition, qu'il ait le premier établi la relation constante entre les trois intervalles musicaux, l'octave (2/1), la quinte (3/2) et la quarte (4/3) à partir des sons de divers marteaux sur des enclumes ou des vibrations de cordes de diverses longueurs, pour former la gamme naturelle qui porte son nom. Ce serait là l'origine de l'hypothèse selon laquelle tout l'univers, ou *kosmos*, tient dans la puissance des nombres, en premier lieu dans les quatre premiers nombres ou *tétraktys*, dont la somme, disposée en un triangle équilatéral, équivaut au nombre parfait de la Décade. Platon fera un large usage de ces spéculations mathématiques, cosmiques et musicales dans le *Timée*, dialogue mis dans la bouche d'un penseur pythagoricien.

► BURKERT W., *Weisheit und Wissenschaft. Studien zu Pythagoras, Philolaos und Platon*, Nuremberg, Carl, 1962 (trad. angl. E.L. Milnar, *Lore and Science in Ancient Pythagoreanism*, Cambridge [Mass.], Harvard Univ. Press, 1972). — DIOGÈNE LAËRCE, *La vie de Pythagore*, éd. A. Delatte, Bruxelles, 1922 ; repr. Hildesheim, Olms, 1988. — JAMBLIQUE, *Vie de Pythagore*, introd., trad et notes L. Brisson & A.Ph. Segonds, Paris, Les Belles Lettres, 1966. — MATTÉI J.-F., *Pythagore et les pythagoriciens*, Paris, PUF, 1993 ; 2^e éd. revue et corrigée, 1996. — MICHEL P.-H., *De Pythagore à Euclide*, Paris, Les Belles Lettres, 1950. — MILHAUD G., *Les philosophes géomètres de la Grèce*, Paris, 1900. — PHILIP J.A., *Pythagoras and early Pythagoreanism*, Toronto, 1966. — PORPHYRE, *Vie de Pythagore*, éd. et trad. É. des Places, Paris, Les Belles Lettres, 1982. — RAVEN J.E., *Pythagoreans and Eleatics*, Cambridge Univ. Press, 1958. — TIMPANARO-CARDINI M., *Pitagorici. Testimonianze e frammenti*, Florence, La nuova Italia, 3 vol., 1958-1964 (texte grec et trad. it. annotée).

Jean-François MATTÉI

→ Géométries ; Héliocentrisme ; Platon ; Pythagorisme.

PYTHAGORISME

Nous devons au pythagorisme l'idéal de cette connaissance démonstrative que l'Occident entend par « science ». L'orphisme, dont on l'a parfois rapproché, n'a jamais connu de dimension mathématique, astronomique ou physique, alors que le pythagorisme est demeuré vivant dans l'histoire de la rationalité à travers les diverses résurgences du substantialisme mathématique.

L'influence de l'école pythagoricienne fut considérable en Italie du Sud et en Sicile dans la première moitié du V^e s. avant J.-C. Cette *hetairia* originale était régie par des règles rigoureuses qui l'ordonnaient à l'image du monde. Le novice était d'abord reçu en qualité de disciple exotérique : pendant cinq années de silence (*l'échémythie*), il écoutait les leçons sans voir le Maître qui parlait derrière un rideau. Il devenait ensuite un disciple esotérique pleinement intégré dans la fraternité. Elle était constituée essentiellement de deux groupes qui se réunissaient dans l'*homakoeion*, l'« auditorium commun » : les « Acousmatiques » (« Auditeurs »), dirigés par Hippasos de Métaponte, et les « Mathématiciens », qui travaillaient à la « connaissance » véritable (*mathema*) sous la conduite du Maître. L'ensemble de la communauté était ordonnée autour de la personne de Pythagore dont nul ne prononçait le nom, comme l'atteste la fameuse formule : *Autos epha*, « Il [le Maître] l'a dit ».

L'arithmétique

Le trait originel du pythagorisme tient à la souveraineté du nombre entier positif. Pour les pythagoriciens, selon Aristote, « les choses sont des nombres », « les nombres se trouvent dans les choses », ou « les nombres sont les causes et les principes des choses » (*Mét.*, A, 986 a, 987 a ; M, 1083 b ; 1090 a, etc.). Cette conception arithmologique s'avère inséparable de spéculations géométriques, physiques et cosmologiques liées à des préoccupations morales, politiques et religieuses. Les nombres étaient rangés dans des catégories déterminées qui faisaient apparaître ce que nous nommons aujourd'hui des propriétés de classes. La première classe contient les nombres qui donnent 1 comme reste quand on les divise par 10 : la deuxième classe, ceux qui donnent 2 comme reste quand on les divise par 10 et ainsi de suite jusqu'à la dixième classe, celle de la Décade, qui contient les nombres naturels divisibles par 10 sans aucun reste. Les pythagoriciens divisaient ensuite le nombre, dont l'essence est l'unité, selon la dualité constitutive de l'impair (*perissos*) et du pair (*artios*) : les nombres impairs sont limités, finis et déterminés, les nombres pairs, illimités, infinis et indéterminés. L'impair, nombre « mâle », ne pouvait être divisé en parties égales par le Deux, nombre « femelle », puisqu'un nombre impair divisé par deux donne un reste qui n'est pas un entier ; mais on peut le décomposer en deux nombres égaux de part et d'autre d'une unité centrale ($3 = 1 + 1 + 1$; $5 = 2 + 1$

+ 2 ; $7 = 3 + 1 + 3$, etc.). L'impair voit donc l'unité prédominer, bien que l'Un ne soit pas lui-même impair ou pair, en tant que principe des deux classes de nombres. En conséquence, la division se limite à l'unité dans le cas de l'impair, associé à la limite et au mâle, alors que la constitution du pair n'est pas limitée par l'unité et se reproduit indéfiniment : $4 = 2 + 2$, $6 = 3 + 3$, $2n = n + n$, ce qui assure son caractère infini et femelle.

Si tout est nombre, on peut montrer que les trois dimensions de l'espace ont une structure numérique finie : il suffit d'assimiler les nombres à des points géométriques, chaque classe étant construite à l'aide d'une équerre (*gnomon*). En emboîtant une série de *gnomons* composés d'un nombre pair ou impair de points, on voit que la somme des nombres impairs consécutifs, à partir de l'Un, forme toujours des carrés (selon l'équation $1 + 3 + 5 + \dots + [2 - 1] = n^2$), alors que la somme des nombres pairs, à partir du Deux, forme toujours des rectangles (selon l'équation $2 + 4 + 6 + \dots + 2n = n[n + 1]$). Le nombre impair ou « carré » (*tetragonos*), aligné selon un angle impair, est représenté par une figure finie, et parfaite, là où le nombre pair ou « oblong » (*heteromékeis*), aligné selon un angle pair, est représenté par une figure indéfinie, « hétéromèke », donc imparfaite, dont les côtés dissemblables n et $n + 1$ ont un rapport changeant avec la valeur de n . Les pythagoriciens distinguaient encore les nombres linéaires (ou premiers), composés, abondants ou déficients, parfaits (égaux à la somme de leurs diviseurs) et amis (chacun est égal à la somme des diviseurs de l'autre).

Dès lors que le nombre est identifié au point, et que le point se définit par sa position, ces unités-points, séparées par des intervalles — ce qui souligne le caractère discontinuiste du pythagorisme — engendrent l'espace géométrique et physique. Les pythagoriciens, identifiant la ligne droite à un segment fini, bornaient ses extrémités par deux points et assimilaient ainsi la droite au 2. Le point 1 et la ligne 2 n'étant pas encore de l'espace, il fallait faire intervenir le 3 pour obtenir la surface ; trois points quelconques non alignés suffisent en effet pour déterminer n'importe quel plan. On peut induire que le volume sera le 4 : le premier solide régulier, le tétraèdre (ou pyramide), est un corps dont les sommets et les faces sont au nombre de quatre. Ainsi l'élément premier de l'espace, le point, limite le deuxième élément, la droite, laquelle, à son tour, limite le troisième élément, le triangle ; celui-ci enfin limite le quatrième et dernier élément, le solide régulier. Les quatre premiers nombres constituent le triangle sacré de la Tétrade, ou *Tétraktys*, dont la somme est la Décade, chiffre parfait du Tout. Représentée sous la forme d'un nombre triangulaire, la *Tétraktys* faisait l'objet d'un véritable culte : elle correspond à la progression $1 + 2 + 3 + 4$ et renferme autant de nombres pairs que de nombres impairs, de nombres premiers que de nombres composés. Elle était invoquée dans le célèbre serment prêté en l'honneur de Pythagore : « Non, par celui qui a trouvé la *Tétraktys* de notre

sagesse/Source qui contient en elle les racines de la nature éternelle » (Jamblique, *YP*, 150, 162).

La géométrie

Dans son *Commentaire sur le premier livre des Éléments d'Euclide*, Proclus avance que « Pythagore donna à la philosophie géométrique la forme d'une éducation libre, en reprenant les choses au commencement pour découvrir les principes par un examen des théorèmes mettant en œuvre une méthode non empirique et purement intellectuelle ». Voici ces découvertes majeures : 1) Le point est une unité définie par sa position. 2) Le point est identifié à la Monade, la ligne à la Dyade, la surface à la Triade, le solide à la Tétrade. 3) Trois figures régulières et égales, assemblées par le sommet, remplissent les quatre angles droits : six triangles équilatéraux, quatre carrés et trois hexagones. 4) Le triangle a ses angles intérieurs égaux à deux angles droits. 5) Le « théorème de Pythagore », appelé encore le « théorème des trois carrés », s'énonce ainsi : « Dans les triangles rectangles, le carré décrit au moyen du côté qui sous-tend l'angle droit [l'hypoténuse] est égal aux carrés décrits au moyen des côtés qui entourent l'angle droit » (Proclus, *Comm. Eucl.*, 426, 6). Les pythagoriciens n'ont pas connu la démonstration d'Euclide (I, 47) qui fait appel à une méthode géométrique de construction ; ils ont trouvé pour la formule $z^2 = x^2 + y^2$, dans laquelle z est la diagonale, x et y les côtés de l'angle droit, une solution arithmétique du type $z = 2n(n + 1) + 1$; $x = 2n(n + 1)$; $y = 2n + 1$. Pour généraliser le résultat du théorème de Pythagore, limité au triangle de côtés 3, 4 et 5, tel que nous ayons l'égalité $3^2 + 4^2 = 5^2$, il faut résoudre en nombres entiers l'équation $x^2 + y^2 = z^2$ qui possède une infinité de solutions. 6) Les pythagoriciens savaient construire le pentagramme formé de trois triangles entrelacés. 7) Ils pouvaient trouver une figure équivalente à une figure donnée. 8) Eudème attribuait aux pythagoriciens la découverte de la parabole des aires, de leur hyperbole et de leur ellipse. Le problème consiste à appliquer suivant une droite donnée, dans un angle rectiligne donné, un parallélogramme équivalent à un triangle donné ; il deviendra plus tard celui des sections coniques. Hipparque de Chios, dans son travail sur les lunules, connaissait déjà le rapport des aires de deux figures semblables étendu à des segments de cercle. 9) Les pythagoriciens auraient essayé, sans succès, de résoudre le problème de la quadrature du cercle. 10) Philolaos aurait démontré que les cinq polyèdres réguliers, attribués aux éléments cosmiques, sont inscriptibles dans la sphère. 11) Enfin, d'après Aristote (*Prem. Analyt.*, I, 23, 41 a), les pythagoriciens avaient démontré l'irrationalité de la diagonale du carré, c'est-à-dire la première grandeur irrationnelle $\sqrt{2}$ que l'on obtient en appliquant le théorème de Pythagore à un triangle rectangle isocèle de côté 1. Ce terme d'« irrationnel », en grec *arrêton*, « indicible », ou *alogon*, « privé de raison », implique que deux nombres donnés ne possèdent pas de « raison »

commune, c'est-à-dire ne sont pas « exprimables » à partir de la même unité. Théodore de Cyrène avait construit avec Théétète la suite des racines jusqu'à la 17^e puissance (*Théét.*, 147 d); Euclide parachèvera cette théorie au livre X des *Éléments*. Cette découverte constitua un scandale pour les pythagoriciens puisque l'existence de $\sqrt{2}$ ébranlait leur conception numérique de l'espace : il est impossible de trouver un nombre égal à $\sqrt{2}$ et de figurer cette grandeur par des points ; mais on peut la représenter par une longueur, celle de la diagonale du carré dont le côté est l'unité de mesure.

Ces analyses aboutissent à l'intuition d'une convergence des nombres arithmétiques, des figures géométriques et des éléments physiques en tant que le nombre-point-élément incarne la nature profonde des choses sur le modèle d'un jeu permanent d'oppositions. L'École italique construisit, selon Aristote (*Mét.*, A, 5, 986 a), une table des catégories fondée sur les principes de la Limite (*péras*) et de l'Illimité (*apeiron*) qui commandaient deux séries parallèles de termes opposés par ligne et associés par colonne :

1. Limite	Illimité	6. En repos	En mouvement
2. Impair	Pair	7. Rectiligne	Courbe
3. Un	Multiple	8. Lumière	Obscurité
4. Droite	Gauche	9. Bien	Mal
5. Mâle	Femelle	10. Carré	Oblong.

Si le nombre est le principe des choses, l'origine de la distinction en impair et pair est logiquement antérieure à ce principe numérique puisque son fondement est celui de la Limite et de l'Illimité. On ne peut distinguer l'impair du pair qu'à l'aide des catégories opératoires de la limite et de l'illimité, comme le note Aristote (*Phys.*, III, 4, 203 a) : « L'illimité, c'est le pair puisque c'est lui qui, embrassé et limité par l'impair, confère aux êtres leur illimitation. La preuve en est donnée par ce qui se produit en arithmétique : en effet si l'on ajoute les *gnomons* autour de l'unité on obtient toujours une figure identique, tandis que si on les ajoute sans partir de l'unité, la figure sera toujours autre. » Si l'idée de construction opératoire est présente dans l'opposition Limite/Illimité, il ne faut pas assimiler une telle construction aux opérations du mathématicien, mais à celles du monde lui-même qui s'engendre sans cesse à partir de ce jeu d'oppositions. Construire l'édifice mathématique, pour un pythagoricien, ce n'est rien d'autre qu'imiter la construction de la maison cosmique édifiée à partir du « foyer de l'univers » de Philolaos. Aussi Aristote peut-il avancer à propos des pythagoriciens qu'« ils construisent la totalité du ciel à partir des nombres » (*Mét.*, M, 6, 1080 b) et, parallèlement, qu'« ils disent que les êtres existent par imitation des nombres » (*Mét.*, A, 6, 987 b). La construction d'un théorème par une démonstration universelle n'est que l'imitation de la construction des êtres par l'univers lui-même à partir de l'opposition de la Limite et de l'Illimité.

En posant les premiers la question de l'essence des choses, les pythagoriciens ont préparé la métaphysique ultérieure sans instaurer encore la séparation

platonicienne entre l'intelligible et le sensible. Car le nombre n'existe pas séparément, en dehors des réalités de l'expérience ; il est immanent aux choses et engendre l'espace et le temps à partir d'un processus opératoire dont la démonstration mathématique est l'analogue dans l'ordre de la connaissance.

La musique et la cosmologie

Pythagore aurait reconnu les accords de quarte, de quinte et d'octave, en entendant les coups portés sur l'enclume d'un forgeron. Supposant que les différences de sons étaient liées aux poids des marteaux, il trouva que celui qui rendait le son d'octave pesait la moitié du plus lourd, celui qui produisait la quinte en pesait les deux tiers, et celui qui donnait la quarte en pesait les trois quarts. Il renouvela l'expérience en fixant une corde tendue sur un chevalet et en la divisant en quatre parties égales : le son produit par trois parties de la corde et la moitié donnait l'accord de quinte (*dia pente* = 3/2) ; par la corde entière et la corde tendue aux trois quarts, l'accord de quarte (*dia tessarôn* = 4/3) ; par la corde et sa moitié, l'accord d'octave (*dia pasôn* = 2/1). Il constitua de cette façon la gamme naturelle ou « gamme de Pythagore », par quintes justes ascendantes, selon les rapports croissants 1/2, 2/3, 3/4 (mode Doristi : Mi, Ré, Do, Si, La, Sol, Fa, Mi), sur des cordes de différentes longueurs ; aujourd'hui nous mesurons le nombre de vibrations 2/1, 3/2, 4/3, selon une gamme descendante (notre mode majeur est le renversement du mode Doristi : Do, Ré, Mi, Fa, Sol, La, Si, Do). En fixant la correspondance des rapports numériques aux sons, donc en quantifiant l'harmonie, le pythagorisme mit en place la théorie mathématique qui fonde la musique occidentale.

On notera que la *Tétraktys* renferme les trois consonances initiales, la quarte (4/3), la quinte (3/2), l'octave (2/1), et, au-delà, la double-octave (4/1). L'unité de mesure musicale, le ton, est l'excès d'intervalle entre la quarte et la quinte, soit 3/2 : 4/3 = 9/8, le ton majeur de la gamme moderne seul connu des Grecs qui n'étudièrent pas le ton mineur, c'est-à-dire le rapport 10/9 correspondant à l'intervalle Mi - Ré dans la gamme d'Ut. La constitution de la gamme naturelle provenait des rapports attribués à chaque note jusqu'à l'octave supérieure :

Tonique	Sus-tonique	Médiate	Sous-dominante
1	9/8	81/64	4/3
Dominante	Sus-dominante	Sensible	Octave
3/2	27/16	243/128	2

Archytas de Tarente découvrit la juste proportion entre les éléments de l'accord comme entre les divisions des deux tétracordes de la gamme naturelle, car « le propre de la musique est la commensurabilité des intervalles » (Ptolémée, *Harmoniques*, I, 13). Il établit ainsi trois genres, « le premier enharmonique, le deuxième chromatique et le troisième diatonique », en

divisant le tétracorde de chacun d'eux de telle façon que les intervalles ultimes, moyens et initiaux entre les notes La, Sol, Fa, Mi, de l'aigu au grave, aient une valeur de 5/4 (La-Sol), 36/35 (Sol-Fa), 28/27 (Fa-Mi) dans le genre enharmonique ; de 32/27 (La-Sol), 243/224 (Sol-Fa), 28/27 (Fa-Mi) dans le genre chromatique ; de 9/8 (La-Sol), 8/7 (Sol-Fa), 28/27 (Fa-Mi) dans le genre diatonique. Si l'on représente les sons les plus aigus des trois tétracordes (= La) par le nombre 1512 et les sons les plus graves par le nombre 2016 (= Mi), on obtient le rapport de 4/3. Multiplions chacun des rapports obtenus par les autres rapports dans chaque gamme, nous obtenons, à partir des rapports les plus hauts :

$$5/4 \times 36/35 \times 28/27 = 4/3 \text{ dans la gamme enharmonique,}$$

$$32/27 \times 243/224 \times 28/27 = 4/3 \text{ dans la gamme chromatique,}$$

$$9/8 \times 8/7 \times 28/27 = 4/3, \text{ dans la gamme diatonique.}$$

La commensurabilité des intervalles est ainsi reconnue à partir d'une suite de calculs qui assure l'harmonie de l'ensemble des rapports considérés. Dans son *Institution musicale* (III, 5), Boèce indique la manière complexe dont Philolaos divisait le ton à partir du premier nombre qui est « le cube du premier nombre impair ». Le premier impair est 3 ; en multipliant trois fois 3 par lui-même, on obtient 27 qui forme avec 24 un intervalle d'un ton (27/24 = 9/8). En partant de ce cube, Philolaos distinguait deux parties dans le ton, l'une, supérieure d'un demi-ton, qu'il nommait *apotonmé* (« coupure »), l'autre, inférieure d'un demi-ton, qu'il appelait *dièse* (« passage ») ; l'intervalle qui sépare ces deux parties de ton était appelé *comma* (« incisive »). Il attribuait au dièse treize unités pour mesurer le demi-ton parce que telle est la différence entre 256 et 243, et que « ce même nombre 13 se décompose en 9, 3 et 1, où 1 représente le point, 3 la première ligne impaire et 9 le premier carré impair ». On voit comment les pythagoriciens articulaient le calcul mathématique imposé par leurs préoccupations musicales, et leurs spéculations cosmiques sur le point, la ligne, la surface et le volume.

Cette conception de l'harmonie était fondée sur des calculs numériques qui permettaient d'unifier les forces antagonistes à l'œuvre dans l'univers. Aussi Nicomaque de Gêrèce attribue-t-il à Philolaos la définition de l'harmonie comme « unification des complexes et accord des opposés » (*Introd. arithm.*, II, 19). Les pythagoriciens s'attachaient à la découverte des analogies (ou médiétés), ces proportions continues utilisées en mathématiques et en musique. Selon la définition d'Euclide (*Éléments*, V, 4), « la proportion (*analogia*) est une identité de raison » ; elle comporte au minimum trois termes *a, b, c*, avec lesquels on peut constituer deux rapports égaux selon une proportion à quatre termes. On attribue à Pythagore la découverte des médiétés arithmétique, géométrique et harmonique, avant que ses successeurs ne découvrent sept

autres médiétés. Archytas définissait en ces termes les trois premières proportions découvertes par Pythagore : « On parle de moyenne arithmétique quand trois termes entretiennent entre eux une proportion selon un excès donné et que l'excès du premier par rapport au deuxième est celui du deuxième par rapport au troisième [3, 2, 1, où 3 - 2 = 2 - 1 = 1]. Dans cette proportion, l'intervalle des deux plus grands termes [3/2] est plus petit, tandis que celui des deux plus petits [2/1] est plus grand [puisque 3/2 = 1, 5 est plus petit que 2/1 = 2]. On parle de moyenne géométrique quand le rapport des trois termes est tel que le premier est au deuxième ce que le deuxième est au troisième [4, 2, 1] ; dans ce cas, l'intervalle des deux plus grands termes [4/2] est égal à celui des deux plus petits [4/2 = 2/1 = 2]. On parle de moyenne harmonique quand le rapport des trois termes [6, 4, 3] est le suivant : le premier terme dépasse le deuxième d'une fraction de lui-même [6 dépasse 4 du tiers de 6] et le moyen dépasse le troisième de la même fraction du troisième [4 dépasse 3 du tiers de 3]. Dans une telle proportion, l'intervalle des plus grands termes est plus grand et celui des plus petits termes plus petit [6/4 = 1, 5 est plus grand que 4/3 = 1, 33] » (Porphyre, *Comm. Harmon. Ptol.*, 92).

La dixième médiété est le principe de formation de la série de Fibonacci, dans laquelle chaque nombre est la somme des deux précédents : 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144... Polyclète de Sicyone avait utilisé cette proportion dans ses sculptures majeures : le *Canon* ou le *Doryphore* et le *Diadumène*. Luca Pacioli, dans son *De divina proportione* (1509), illustré par Léonard de Vinci, rendra célèbre cette *sectio aurea* ou *proportio divina*. Le nombre d'or est en effet issu de la série de Fibonacci : deux termes successifs quelconques de cette série ont des rapports mutuels tels qu'ils tendent vers deux limites : 0, 618 033 98875... et 1, 618 033 98875... La formule du nombre d'or s'obtient par l'équation

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,618 \text{ et } \frac{1 - \sqrt{5}}{2} = 0,618...$$

La réduction des intervalles des sons et des mouvements des astres à des rapports numériques fixes amena les pythagoriciens à formuler l'hypothèse de l'« harmonie des sphères » dont parle Platon (*Répub.*, X, 617 b ; cf. Aristote, *Du ciel*, II, 9). Puisque les corps célestes se déplacent dans l'air selon des lois régulières, ils doivent produire des sons qui consonnent selon leurs distances et leurs vitesses respectives à l'intérieur de l'octave. La correspondance entre les intervalles des 7 notes de la gamme de Pythagore jouées sur les 7 cordes de la lyre, et les distances des 7 corps à la Terre sur l'heptacorde cosmique (les cinq planètes connues, le Soleil et la Lune) renforçait l'intuition selon laquelle les nombres commandent tous les ordres de réalité.

Le pythagorisme dépasse ici le jeu des apparences sensibles et substitue à la cosmologie traditionnelle, qui faisait de la Terre le centre du monde, une cosmologie

mathématique qui prépare les voies de l'héliocentrisme. Pythagore enseignait la sphéricité de la Terre et du monde, non pour des raisons empiriques (les contours des ombres durant les éclipses), mais pour des raisons théoriques, le plus beau des solides étant la sphère. Philolaos proposera, pour sa part, une conception pyrocentrique de corps célestes circulaires faisant procession autour d'un feu central invisible nommé « le Foyer (*Hestia*) du monde » (Aristote, *Du ciel*, II, 13, 293). Bien que ce feu central ne soit pas le Soleil, c'est cette intuition qui conduira Copernic à émettre l'hypothèse révolutionnaire de l'héliocentrisme, ainsi qu'il l'affirme dans sa dédicace au pape Paul III.

Autour du feu central circule le dixième corps céleste invisible, l'Anti-Terre, dont les pythagoriciens supposaient l'existence pour achever la Décade des sphères. Au deuxième rang venait la Terre qui décrivait en vingt-quatre heures un cercle plus grand sur le plan de l'écliptique, en présentant la même face vers l'extérieur, ce qui explique que nul n'ait pu voir le feu central et l'Anti-Terre qu'un observateur des antipodes aurait pu contempler. Ce mouvement accordé à la Terre, bien avant Galilée, consistait en un cercle orbital autour du Feu et non en une rotation de la Terre sur elle-même ; si l'hypothèse était fautive, elle se trouvait cependant en accord avec les observations de l'époque sur le lever et le coucher des astres. Venaient ensuite, sur des cercles de plus en plus lointains, la Lune, le Soleil, et les cinq planètes connues : Vénus, Mercure, Mars, Jupiter et Saturne. Fermant la marche, la sphère des étoiles fixes, puis un feu extérieur constituant l'enveloppe de l'univers. Au-delà s'étendait l'infini, *to apeiron*, ce vide que le monde respire au rythme du temps et qui vient séparer les êtres (Aristote, *Phys.*, IV, 6, 213 b). On peut admirer cet étrange système de Philolaos qui eut peu de succès, et dont les hypothèses majeures attendront deux mille ans pour se voir réalisées : 1) la Terre et les astres ont une forme sphérique ; 2) la Terre est un corps céleste de second plan ; 3) la Terre n'est pas en repos et n'occupe pas le centre du monde.

La théorie physique des cinq éléments, rapportée à Phérécyde de Syros, Pythagore, Philolaos, au Platon de *Timée* et de l'*Épinomis*, et à Aristote (*Du ciel*, I, 2-4), justifiait la genèse du cosmos à partir de considérations géométriques, arithmétiques, harmoniques et mystiques. Aétius attribuait en effet à Pythagore cinq volumes : « Le cube [l'hexaèdre] qui a produit la terre, la pyramide [le tétraèdre], qui a produit le feu ; l'octaèdre, qui a produit l'air ; l'icosaèdre, qui a produit l'eau, et le dodécaèdre, qui a produit la sphère de l'univers » (*Opinions*, II, 6, 5). La physique pythagoricienne ne peut se comprendre qu'en faisant intervenir la théorie arithmétique des proportions associée à la considération géométrique des volumes. Comme nous n'avons aucun texte, nous devons nous fier au *Timée* de Platon. Pour expliquer la genèse du solide et préparer la naissance de la stéréométrie, Platon ne se satisfait pas de la seule présence du feu et de la terre ; il leur ajoute la proportion géométrique des deux médiétés de l'eau

et de l'air pour harmoniser leurs composants : « De leurs rapports mutuels, dans la mesure du possible, il réalisa une proportion, ce que le feu est à l'air, l'air l'étant à l'eau, et ce que l'air est à l'eau, l'eau l'étant à la terre ; les unissant d'un tel lien, il constitua un Ciel visible et tangible » (32 b). L'harmonie recherchée, dérivée du problème de Délos sur la duplication du cube, offre une proportion continue entre les quatre corps empédocléens.

Les pythagoriciens découvrirent parallèlement que cinq polyèdres réguliers seulement pouvaient être construits dans notre espace tridimensionnel, alors qu'il existe une infinité de polygones réguliers. Platon formera à partir de triangles élémentaires les cinq polyèdres que la tradition appellera « corps platoniciens » : le tétraèdre, l'octaèdre, l'icosaèdre, le cube, le dodécaèdre. Ce dernier se distingue des quatre autres polyèdres en ce que chacune de ses douze faces est formée d'un pentagone irréductible aux triangles dont les autres corps sont composés. En joignant les cinq sommets du pentagone, on fait apparaître cinq triangles isocèles formant une étoile à cinq branches dont les côtés, recoupés, forment un petit pentagone inversé : il s'agit du Pentagramme ou *Pentalpha* (les cinq A) formé de trois triangles enlacés que l'on peut dessiner d'un seul trait.

On notera, pour terminer, que la correspondance du feu avec le tétraèdre, de l'air avec l'octaèdre, de l'eau avec l'icosaèdre et de la terre avec le cube s'avère tellement satisfaisante pour le mode de pensée analogique du pythagorisme que Kepler, vingt siècles plus tard, s'y railiera en identifiant la terre à la stabilité du cube, l'air à l'instabilité de l'octaèdre, le feu au petit volume du tétraèdre et l'eau au grand volume de l'icosaèdre. Le but du *Mysterium cosmographicum*, en 1595, sera ainsi d'associer les distances du système planétaire aux cinq polyèdres réguliers, alternativement inscrits et circonscrits à des sphères. Cette idée incitera Kepler à devenir l'assistant de Tycho Brahé et le conduira à la découverte scientifique des trois lois sur les orbites des planètes. On voit que l'« harmonie » comprise comme la juste consonance des parties au Tout en une céleste octave n'était pas un vain mot pour les pythagoriciens. Aussi levaient-ils souvent la tête vers le ciel étoilé pour tenter d'entendre ce chœur des astres que les hommes ne perçoivent plus du fait de leur accoutumance.

► ANATOLIUS, *Sur la Décade*, éd. Heiberg, *Annales internationales d'histoire*, Paris, A. Colin, 1901. — ARISTOTE, *De Pythagoreis*, in *Aristotelis Opera*, III, éd. O. Gigon, Berlin/New York, De Gruyter, 1987, 408-419 (trad. angl. d'après *Aristotelis fragmenta*, 1886, éd. V. Rose, Leipzig, in *The complete Works of Aristotle*, éd. J. Barnes, Princeton, Princeton Univ. Press, 1984, 2441-2446). — BRUNSCHVIG L., *Le rôle du pythagorisme dans l'évolution des idées*, Paris, Hermann, 1937. — BURKERT W., *Weisheit und Wissenschaft. Studien zu Pythagoras, Philolaos und Platon*, Nuremberg, Carl, 1962 (trad. angl. E.L. Milnar Jr., *Lore and Science in Ancient Pythagoreanism*, Cambridge [Mass.], Harvard Univ. Press, 1972). — DE VOGEL C.J., *Pythagoras and Early Pythagoreanism*, Assen, Van Gorcum, 1966. — DIELS H. & KRANZ W., *Die Fragmente*

der Vorsokratiker (1934-1937), 7^e éd. Berlin, 3 vol., 1954, I, 96-113, 397-480 (trad. fr. des textes pythagoriciens D. Delattre, *Les Présocratiques*, éd. J.-P. Dumont, Paris, Gallimard « Bibliothèque de La Pléiade », 1988). — JAMBLIQUE Ps., *Théologoumena arithmeticae*, éd. V. De Falco, Leipzig, Teubner, 1922. — KIRK G.S. & RAVEN J., *The Presocratic Philosophers. A critical history with a selection of texts*, Londres/New York, Cambridge Univ. Press, nouv. éd. augm. Kirk-Raven-Scofield, 1983. — MATTÈI J.-F., « Pythagore » (1984), *Dictionnaire des Philosophes*, dir. D. Huisman, Paris, PUF, 1993 ; « Pythagore », *Encyclopédie philosophique universelle*, vol. III, *Les Œuvres philosophiques*, 2 t., dir. J.-F. Mattèi, Paris, PUF, 1992 ; *Pythagore et les pythagoriciens* (1993), Paris, PUF, 1996. — MICHEL P.-H., *De Pythagore à Euclide*, Paris, Les Belles Lettres, 1950. — MILHAUD G., *Les philosophes géomètres de la*

Grèce (1900), Paris, Vrin, 1934. — NICOMACHE DE GERASE, *Theologoumena arithmeticae* in Photius, *Bibliothèque*, trad. R. Henry, Paris, Les Belles Lettres, 1959. — PHILIP J.A., *Pythagoras and early Pythagoreanism*, Toronto, 1966. — PROCLUS, *Commentaires sur le premier livre des Éléments d'Euclide*, trad. fr. P. Ver Eecke, Paris, A. Blanchard, 1948. — RAVEN J.E., *Pythagoreans and Eleatics*, Cambridge Univ. Press, 1958, repr. Amsterdam, Hakkert, 1966. — SNEUSIPPE, *Sur les nombres pythagoriciens*, trad. Tannery, *Pour l'histoire de la science hellène*, Paris, 1887. — TAMPANARO CARDINI M., *Pythagorici. Testimonianze e frammenti*, Florence, La nuova Italia, texte grec et trad. it. annotée, 3 vol., 1958-1964.

Jean-François MATTÈI

→ Géométries ; Héliocentrisme ; Platon ; Pythagore.

Q - R

QUANTIQUE

La théorie quantique, née au début du xx^e s., présente un curieux paradoxe. Son champ d'application n'a cessé de s'étendre, sans qu'elle rencontre jusqu'à présent ses limites de validité. Elle a montré sa fécondité dans des domaines allant de la physique subnucléaire à l'astrophysique stellaire, et connaît d'importantes applications techniques (lasers, supraconducteurs, etc.). Pourtant, malgré la sophistication de ses développements formels, sa maîtrise conceptuelle reste limitée. Le retard épistémologique dont elle est victime se marque dans une terminologie souvent archaïque et inadaptée qui obère sa pleine compréhension. Ainsi, dans sa forme la plus simple est-elle encore généralement présentée sous la dénomination « mécanique quantique », remontant à sa formulation des années 1920. La physique quantique se caractérise pourtant par un dépassement radical de la « mécanique » classique, et n'a évidemment plus rien à voir avec les machines simples. Aussi paraît-il raisonnable de suivre et de fixer un usage émergent qui, substantivant l'adjectif, dénomme simplement « quantique » la théorie — sur le modèle éprouvé des termes désignant les domaines de la physique, comme mécanique justement, acoustique, électronique, etc.

Une théorie conquérante

La quantique est née de l'incapacité que montra la physique classique, vers la fin du xix^e s., à résoudre un problème majeur : la description du rayonnement électromagnétique en équilibre thermique avec la matière, ou, en termes plus concrets, la compréhension de l'émission de lumière par un corps chauffé à haute température — comme le fer porté au rouge par le forgeron (problème dit, curieusement, du « corps noir »). La mise en jeu des deux grandes synthèses théoriques du xix^e s., l'électrodynamique et la thermodynamique, fournissait une solution physiquement absurde, prévoyant une émission d'énergie infinie. Plus que d'un désaccord expérimental, il s'agissait d'un véritable paralysisme. C'est en 1899 que Max Planck montre comment sortir de cette impasse en faisant l'hypothèse audacieuse, en rupture totale avec les cadres conceptuels classiques, d'une discontinuité des échanges d'énergie entre matière et rayonnement. Cette discrétisation, sous

forme de *quanta* d'énergie, est à l'origine du nom donné à la théorie dont débutait ainsi la gestation. Le raisonnement de Planck, non seulement élimine l'aporie, mais fournit une formule en parfait accord avec les données expérimentales.

Einstein, dans l'un de ses fulgurants articles de 1905, explique alors l'« effet photoélectrique », jusque-là paradoxal, comme dû à l'éjection des électrons atomiques par les quanta d'énergie du rayonnement. Il avance un peu plus tard (1912) l'idée radicale que la discrétisation ne concerne pas le seul échange d'énergie, mais caractérise la nature intrinsèque du champ électromagnétique, constitué de ces quanta qui seront plus tard baptisés « photons ». Dès 1907, Einstein encore montre comment la quantification des vibrations des réseaux cristallins permet d'interpréter les résultats expérimentaux jusque-là incompris sur la chaleur spécifique des solides à basse température. La physique statistique quantique naissait ainsi. Il vaut la peine d'insister sur le fait, trop souvent négligé, qu'aux origines de la quantique se trouvent ainsi deux problèmes manifestement macroscopiques (la thermodynamique du corps noir et celle des solides), montrant clairement que la vocation de la théorie ne se limite en rien à l'échelle atomique.

C'est pourtant dans la physique du microcosme que la quantique va trouver à se déployer pleinement ; en 1913, Bohr explique comment comprendre le spectre atomique de l'hydrogène (émission de lumière de fréquences bien définies) en imposant une règle de quantification au mouvement des électrons autour du noyau atomique (dont Rutherford venait de révéler l'existence). Sommerfeld, en 1918, perfectionne le modèle de Bohr sur la base de la relativité einsteinienne, suggérant la probable compatibilité entre la nouvelle conception de l'espace-temps et la quantique. Mais la « théorie des quanta », comme on dit alors, n'est encore qu'un ensemble de règles *ad hoc*, sans cohérence d'ensemble, et d'application limitée à des systèmes très simples. Il faut que de Broglie, en 1924, propose l'attribution à l'électron de certaines caractéristiques ondulatoires, symétriquement au geste de Planck et d'Einstein dotant la lumière de caractéristiques corpusculaires, pour que la voie soit ouverte à une synthèse théorique.

Rapidement, Schrödinger et Heisenberg, par deux voies différentes (proposant respectivement une

« mécanique ondulatoire » et une « mécanique des matrices ») dont le premier prouvera l'équivalence, construisent la théorie quantique dans toute sa généralité. Born apporte en 1927 une contribution majeure en introduisant une interprétation probabiliste qui assure la cohérence de l'ensemble et son raccord sans contradictions avec les théories classiques. Dirac formalise et élucide le cadre mathématique, qui sera plus tard rigorisé par von Neumann. À la fin des années 1920, la quantique est au point, tout au moins en ce qui concerne sa capacité à rendre compte des phénomènes dans le cadre spatio-temporel galiléen. Immédiatement, elle connaît des succès fulgurants dans l'élucidation des spectres atomiques d'atomes complexes (Hartree en 1928 pour l'hélium), de la liaison chimique (Heitler et London, 1927), établissant sa domination entière sur le monde atomique et moléculaire. Mais simultanément, de premières tentatives réussies d'application à la physique nucléaire (radioactivité alpha : Gamow, 1925) laissent penser que la validité de la quantique s'étend jusqu'au noyau, à une échelle cent mille fois inférieure à celle de l'atome.

Les années 1930 voient la quantique, arrivée à maturité, mise en œuvre de façon intensive en physique atomique, moléculaire, mais aussi dans l'étude de la matière condensée (cohésion des solides, conduction électrique, magnétisme). Il lui faut pourtant connaître de nouveaux développements fondamentaux pour pouvoir s'intégrer au cadre spatio-temporel einsteinien, où l'équivalence masse-énergie permet de complexes réactions de transformations au cours desquelles le nombre même des objets concernés ne reste pas constant. Après la découverte par Dirac (1930) d'une équation décrivant l'électron en termes à la fois quantiques et einsteiniens, beaucoup d'efforts sont déployés pour mettre au point la « théorie quantique des champs », comme on appelle la quantique einsteinienne, dans la mesure où elle prend appui sur la théorie (classique) des champs. Ces travaux (Dirac, Heisenberg, Pauli, Jordan, Fock, etc.) débouchent dans les années 1940 sur la mise au point de l'électrodynamique quantique, ou théorie des interactions entre électrons et photons (Feynman, Tomonaga, Schwinger, Dyson). À partir des années 1950, la bonne compréhension quantique du rayonnement électromagnétique se concrétisera en pratiques expérimentales et en innovations techniques dont la plus importante, de par son impact désormais industriel, est le laser.

L'étude quantique du noyau rencontre aussi d'importants succès, débouchant sur la compréhension de la structure nucléaire et des diverses formes de radioactivité, qui permettra, pendant la Seconde Guerre mondiale, la mise en jeu de l'énergie nucléaire. Fermi (1932) développe une nouvelle application de la théorie quantique des champs aux phénomènes de désintégration nucléaire par radioactivité bêta (interactions « faibles »). Yukawa, en 1935, s'inspire de l'électrodynamique quantique où les forces (électriques et magnétiques) entre corps chargés sont dues à l'échange des photons, et interprète les forces

proprement nucléaires en terme d'un processus similaire d'échange de quantons, prédisant l'existence de médiateurs spécifiques de ces forces, les « mésons » jusque-là inconnus. Leur découverte, immédiatement après la guerre, inaugure le développement de la « physique des particules ». Si la quantique reste sans concurrence théorique dans ce domaine subnucléaire, où elle ne semble pas avoir pour l'instant rencontré ses limites de validité, sa mise en œuvre concrète se heurte toujours, après plusieurs décennies, à de très redoutables difficultés techniques dues à l'intensité des interactions : la « chromodynamique quantique », qui concerne le domaine des quarks, n'est que très partiellement aboutie, et les nouveaux avatars de la théorie quantique des champs (« supercordes ») restent, à la fin du XX^e s., en chantier. La même appréciation est valable quant à la théorie quantique de la gravitation.

Après de premières applications pratiques à partir des années 1950 (microscopie électronique, masers et lasers), c'est dans la physique de la matière condensée que la quantique a connu au cours des dernières décennies ses mises en œuvre les plus importantes quant à leurs implications technologiques et économiques. Toute l'électronique moderne (transistors, puces et maintenant hétérojonctions) découle de notre compréhension, au niveau quantique, de la physique des solides. Bien d'autres phénomènes spécifiquement quantiques sont actuellement en passe de pénétrer en force dans le monde technique et industriel : superfluidité et supraconductivité, effet tunnel (microscopie), etc. Les nanotechnologies en cours de développement, opérant à l'échelle atomique, sont nécessairement fondées sur la quantique. Il n'est pas jusqu'aux principes théoriques les plus abstraits de la quantique qui ne trouvent peut-être bientôt des applications pratiques (cryptographie, informatique quantique). Mais le champ d'application de la quantique s'étend jusqu'aux plus vastes échelles du macrocosme : si les étoiles sont de gigantesques réacteurs nucléaires où les phénomènes élémentaires sont régis par la quantique, leur évolution les conduit, une fois leur énergie nucléaire épuisée, à des formes condensées (naines blanches, étoiles à neutrons) dont la structure globale même est de nature quantique ; il n'est pas jusqu'aux trous noirs où les effets quantiques ne jouent un rôle crucial. Enfin, la cosmologie travaille désormais à l'« échelle de Planck », où devient cruciale la synthèse (encore inaccomplie) de la quantique et de la gravitation einsteinienne.

Ainsi, en un siècle, la quantique a démontré une fécondité sans freins, une exactitude sans failles et une validité sans limites – pour l'instant.

Une conceptualisation originale

Pour comprendre la transformation radicale qu'apporte la quantique à notre conception des objets physiques et de leurs propriétés, il suffit de revenir à la relation de Planck-Einstein qui introduisit, au début du siècle, la quantification du rayonnement, en

déterminant l'énergie E d'un « quantum » de rayonnement de fréquence ν selon l'équation $E = h\nu$, où h est la « constante de Planck ». Cette relation apparaît de nos jours comme exprimant une équivalence universelle entre les deux concepts classiques d'énergie et de fréquence, qui les lie en un seul concept au sein de la théorie quantique. Une telle synthèse transcende les notions séparées de corpuscule en mécanique (caractérisé par son énergie) et d'onde en théorie des champs (caractérisée par sa fréquence). Au dualisme classique succède ainsi un monisme quantique : tous les objets individuels tels que les décrit la quantique (photons, électrons, etc.), désormais baptisés génériquement « quantons », relèvent de cette même unification conceptuelle. Mais les quantons allient un caractère discret quant au nombre – on peut les compter individuellement, tels des corpuscules –, à un caractère continu quant à leur spatialité – leur extension dans l'espace est indéfinie, comme pour une onde. On voit donc qu'il serait erroné de prendre pour absolue la discrétisation qu'indique le terme même de « quantique » et de l'interpréter comme imposant un discontinuisme généralisé. C'est plutôt à une redistribution de l'antimonomie continu/discontinu que procède la quantique. Cette spatialité continue d'objets individuels discrets est à l'origine des difficultés conceptuelles qu'ont dû affronter les fondateurs de la quantique. Ainsi se comprend historiquement l'idée formulée alors d'une « dualité onde-corpuscule », dont on voit aujourd'hui qu'elle caractérise, non pas la quantique, mais sa, ou plutôt ses, limite(s) classique(s) : un ensemble de quantons peut, dans certaines circonstances, montrer (approximativement) le comportement de corpuscules classiques, dans d'autres celui d'une onde classique ; mais un quanton, en général, ne se comporte ni comme les uns, ni comme l'autre, et le développement de pratiques expérimentales fort sophistiquées dans le domaine quantique met bien en évidence désormais l'insuffisance des descriptions classiques alternatives.

Les fameuses inégalités de Heisenberg (1927) ont explicité la rupture avec la mécanique classique, en montrant qu'un quanton ne saurait être caractérisé à la fois par des valeurs bien définies de sa position et de sa vitesse. Traditionnellement formulées en termes d'« incertitudes » sur ces grandeurs, les inégalités de Heisenberg ont fait l'objet d'innombrables exégèses philosophiques tendant en général à interpréter la quantique comme imposant des limites intrinsèques à notre connaissance de la nature. À la vérité, comme Languevin l'avait déjà bien compris, il s'agit simplement de limites à l'applicabilité des concepts classiques, signalant la nécessité d'un formalisme original pour les grandeurs quantiques. On peut d'ailleurs penser que l'impossibilité d'attribuer aux quantons une localisation définie a paru d'autant plus paradoxale que la notion classique de champ, déjà dotée d'une telle extensivité spatiale, n'était pas vraiment intégrée à l'ontologie implicite des physiciens du XX^e s. commentant. Témoigne de ce retard l'explicitation relativement récente de cet aspect de la quantique, en terme de

« non-localité » ; une telle formulation cependant n'est guère satisfaisante par sa négativité, qui, au fond, se borne à reconnaître que les quantons ne sont pas des corpuscules localisés. Sans doute un néologisme vaudrait-il mieux, qui mettrait l'accent sur le caractère spécifique et intrinsèque de la situation : on pourrait parler, par exemple, de la « pantopie » quantique, ou encore de l'« ondiquité » des quantons (d'après le latin *undique* = de toute part, de tout côté), où l'homophonie avec « onde » ne saurait être boudée. Par-delà le cas particulier de la position spatiale, ce sont en vérité toutes les grandeurs physiques dont il s'agit de reconnaître que, dans le domaine quantique, elles ne sont pas, en règle générale, caractérisées par une valeur numérique unique et bien déterminée, mais par un spectre de valeurs – à l'instar déjà de la fréquence pour une onde classique.

La conceptualisation quantique n'offre d'ailleurs un caractère paradoxal que dans la mesure où elle hésite à se donner une formalisation propre et tente de rester au plus près des schèmes classiques qu'elle invalide pourtant. Mais la cohérence de la quantique apparaît pleinement dès lors qu'elle est formulée dans un cadre mathématique spécifique, par exemple celui de la théorie de l'espace de Hilbert et des opérateurs linéaires. Dans un tel cadre apparaît au surplus naturellement un aspect essentiel de la quantique, la puissance qu'elle confère à la notion de symétrie ou d'invariance. Dès les années 1930, Wigner avait montré comment la théorie mathématique des groupes, qui exprime l'essence même de l'idée de symétrie, trouvait un champ d'application considérable dans la quantique. Tant pour la compréhension de phénomènes spécifiques (transitions atomiques et nucléaires, liaisons moléculaires, conduction dans les solides) que pour la classification des constituants fondamentaux de la matière, l'étude des groupes d'invariance et de leurs représentations est devenue un outil primordial. Au niveau le plus général, c'est dans ce contexte qu'a pu être comprise l'existence de deux classes de quantons, les « bosons » et les « fermions », ainsi nommés selon que, en grand nombre, ils obéissent à la statistique de Bose-Einstein ou à celle de Fermi-Dirac. Cette distinction résulte des deux modalités, spécifiquement quantiques, par quoi peut s'exprimer la symétrie de l'état collectif d'un système de quantons identiques. Un tel état collectif, pour des fermions, ne peut comprendre que des états individuels différents (« principe d'exclusion » de Pauli), alors que pour des bosons, des états individuels homologues sont privilégiés. La différence entre les comportements résultants – grégairisme des bosons, exclusivisme des fermions – éclaire nombre des propriétés essentielles de la matière ordinaire : le caractère fermionique des électrons rend compte de la constitution des atomes, de la liaison chimique, de la structure des solides, alors que le caractère bosonique des photons explique la nature du rayonnement lumineux. C'est encore un argument de symétrie, qui, dans le cadre de la théorie quantique, explique la très

profonde dualité potentielle entre matière et « anti-matière » (théorème TCP).

Une formulation problématique

Avant que n'émerge un formalisme autonome, la construction initiale de la quantique, largement due à Bohr et à ses collaborateurs, fut fondée sur le « principe de correspondance » exigeant que les résultats de la nouvelle théorie coïncident, dans une limite convenable, avec ceux de la physique classique. Bohr alla jusqu'à ériger cette idée en norme épistémologique et même terminologique, imposant à la quantique de faire appel au seul vocabulaire classique, au motif que toute expérimentation est en dernière analyse macroscopique et met en jeu des phénomènes relevant de la physique classique. Cet agnosticisme épistémologique dont l'énonciation, connue sous le nom de « point de vue de Copenhague » est d'ailleurs variée et ambiguë, eut sans doute la vertu de protéger la théorie naissante contre des formulations ou même des ontologisations prématurées. L'idée vague d'une « complémentarité » entre des représentations (classiquement) antinomiques, comme les points de vue corpusculaires et ondulatoires, fut ainsi invoquée pour éviter tout conflit conceptuel et vite jugée suffisante. Dans cette perspective, et après d'intenses discussions dans les années 1930, en particulier au cours de célèbres affrontements entre Bohr et Einstein, le recours de la quantique à des prédictions probabilistes fut mis au compte d'un « indéterminisme » fondamental du niveau quantique. La coupure ainsi acceptée comme irrémédiable entre le niveau classique et le niveau quantique permettait d'évacuer la question cruciale de leur rapport, telle qu'elle se manifeste par exemple dans le cas de la mesure, par un appareil macroscopique, d'une grandeur physique : comment régler la contradiction apparente entre, d'une part, la caractérisation théorique d'un état quantique quelconque, non par une valeur numérique déterminée de telle ou telle grandeur (mettons, l'énergie), mais par un spectre, comprenant plusieurs valeurs (et même une infinité si ce spectre est continu), et, d'autre part, le fait empirique que la mesure ne fournit qu'un seul résultat ? L'interprétation traditionnelle (« de Copenhague ») de la quantique considère comme non pertinente la question du pourquoi de cette réduction des potentialités numériques multiples à une valeur unique (le résultat effectif de la mesure), et se contente d'une règle canonique permettant d'évaluer la probabilité d'obtention de telle ou telle valeur. La cohérence de cette règle et son plein accord avec les observations expérimentales ont pendant des décennies suffi aux besoins pratiques des physiciens et ont amené la plupart d'entre eux à penser que le temps des interrogations fondamentales sur la signification des concepts quantiques était passé.

Une minorité pourtant, avec Bohm au premier plan (dans les années 1950), s'appuyait sur l'« argument EPR » (avancé dans un article fameux d'Einstein,

Podolsky et Rosen, en 1935) qui prétendait établir l'incomplétude essentielle de la quantique, pour maintenir l'espoir d'un retour à un déterminisme de type classique, à un niveau sous-jacent à celui de la quantique (théories « à variables cachées »). Mais avait fini par s'imposer un néopositivisme largement majoritaire, conforté par les développements empiriques de la théorie dont les succès considérables ne portaient guère les physiciens à l'analyse critique des fondements. Aussi fut-ce une surprise générale quand, en 1964, Bell réouvrit le débat sur la signification fondamentale des idées quantiques en montrant qu'une éventuelle théorie néoclassique ne se limiterait pas à fournir une « interprétation » alternative, mais (pourvu qu'elle respectât certaines exigences naturelles de localité), conduirait à des résultats différents de ceux de la théorie quantique. Certaines inégalités discriminantes ainsi établies par Bell firent l'objet de vérifications expérimentales, dont les plus connues sont celles d'Aspect (1982); elles tournèrent au triomphe incontesté de l'orthodoxie quantique sur les hérésies néoclassiques.

Mais la discussion ainsi relancée eut l'immense mérite de mettre en évidence une caractéristique essentielle de la quantique, la distinguant des conceptions antérieures d'une façon finalement bien plus radicale que la plupart des aspects discutés jusque-là. Classiquement, l'état d'un ensemble de corps est spécifié par l'ensemble des états individuels de ces corps : autrement dit, on peut toujours considérer un système collectif comme composé de constituants séparés (même s'ils sont en interaction). Comme souvent, une idée aussi banale n'est formulée et explicitée qu'au moment où sa validité est mise en cause : précisément, l'état collectif, au sens quantique maintenant, d'un système composé n'est en rien équivalent à un ensemble bien déterminé d'états individuels des composants. Dès 1935, Schrödinger avait insisté sur cet aspect essentiel de la quantique, dont il donnait une formulation brillamment compacte : « La meilleure connaissance possible d'un tout n'implique pas la meilleure connaissance possible de ses parties – et c'est ce qui ne cesse de nous hanter. » De façon générale, l'état d'un système implique plusieurs ensembles d'états individuels pour chacun de ses sous-systèmes, et, loin de les définir de façon unique, se borne à corrélérer entre eux les états de ces différents sous-systèmes. Il n'est donc pas possible de spécifier séparément l'état de chaque sous-système; aussi désigne-t-on souvent par « non-séparabilité » quantique cet aspect spécifique. Sans doute le terme n'est-il pas le mieux choisi, pour les mêmes raisons que celui de « non-localité », avec lequel il risque d'ailleurs d'être confondu à tort. Schrödinger avait proposé le terme de *Verschränkung*, soit entrelacement, intrication (en anglais *entanglement*), pour désigner cet état de chose. Là encore, un vocabulaire nouveau serait sans doute plus approprié, insistant sur le caractère à la fois non intuitif et primitif de cette notion; et pourrait, par exemple, la dénommer « implexion » (du latin *implexio* = entrelacement), et

parler de l'« implexité » quantique. C'est en tout cas ce point capital, mais trop longtemps sous-estimé, que Bell remit en évidence, et sur lequel se fondent les discussions modernes.

Ce qui finalement apparaît, après bientôt un siècle de quantique, est le paradoxe suivant : c'est moins la quantique en tant que telle qui pose aujourd'hui des problèmes conceptuels, que la physique classique, dont il s'agit de comprendre la validité approximative. Autrement dit, si les objets macroscopiques sont bien composés de quantons, comment se fait-il qu'ils puissent sembler obéir à des théories classiques ? Que ce problème soit hautement non trivial est attesté sur le plan théorique d'une part, par l'existence de deux limites classiques (mécanique et théorie des champs), et sur le plan pratique d'autre part, par l'observation – et la production – de phénomènes quantiques macroscopiques (rayonnement laser, supraconductivité, etc.). C'est dans ce cadre élargi que la question de la mesure se pose désormais, puisqu'aussi bien les appareils de mesure usuels, ceux pour lesquels vaut la règle de réduction, sont précisément des systèmes macroscopiques obéissant aux lois de la physique classique. Ainsi peut-on reprendre à nouveaux frais la question du déterminisme, puisqu'il apparaît désormais clairement que le formalisme quantique, considéré de façon intrinsèque (l'équation de Schrödinger), est parfaitement déterministe, et que les considérations statistiques n'interviennent (parfois) que lors de la comparaison entre analyse théorique d'un système individuel et mesures expérimentales sur un ensemble de systèmes. Ces nouvelles considérations sont devenues d'autant plus nécessaires que l'expérience elle-même permet désormais la manipulation individuelle des quantons (électrons, neutrons, etc.) et l'émergence d'une véritable « intuition quantique ». Aussi de réels progrès ont-ils été accomplis au cours des années 1990 dans la direction d'une meilleure compréhension du rapport entre la théorie quantique et ses approximations classiques. Un rôle majeur est joué dans ces développements par l'idée de « décohérence », qui désigne le découplage entre les diverses déterminations classiques potentiellement contenues dans un état quantique. Cette décohérence est maintenant comprise comme résultant de l'interaction permanente d'un système quantique avec un environnement dont la complexité brouille la cohérence interne de l'état du système. Dans le cas d'une mesure, c'est cette intervention, inéluctable, de l'environnement commun au système mixte formé du système mesuré et de l'appareil de mesure, qui permet à ce dernier de simuler un comportement de type classique.

Il semble enfin que, près d'un siècle après sa naissance, et quelques décennies de fécondes mises en œuvre, nous puissions commencer à comprendre la quantique.

► BELL J.S., *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge Univ. Press, 1987. – BITBOL M., *Méca-*

nique quantique, une introduction philosophique, Paris, Flammarion, 1996. – BITBOL M. & LAUGIER S. dir., *Physique et réalité (B. d'Espagnat)*, Paris, Diderot, 1998. – BELTRAMETTI E. & LÉVY-LEBLOND J.-M. dir., *Advances in Quantum Phenomena*, New York, Plenum Press, 1995. – BOHM D. & HILEY J., *The Undivided Universe*, Routledge, 1993. – BOHR N., *Physique atomique et connaissance humaine*, C. Chevalley éd., Paris, Gallimard, 1991. – BORN M., *Structure atomique de la matière*, Paris, A. Colin, 1971. – CHEVALLEY C., *La physique quantique et la fin de la philosophie classique de la nature*, Nanterre, Univ. Paris X, 1997 (thèse). – CINI M. & LÉVY-LEBLOND J.-M. dir., *Quantum Theory without Reduction*, Londres, Adam Hilger, 1990. – DELIGEORGES S. dir., *Le monde quantique*, Paris, Le Seuil, 1985. – DIRAC P.A.M., *Les principes de la mécanique quantique*, Paris, Gabay, 1990. – EINSTEIN A., *Quanta (Œuvres choisies, t. 1)*, Paris, Le Seuil, 1989. – EINSTEIN A. & BORN M., *Correspondance 1916-1955*, Paris, Le Seuil, 1972. – ESPAGNAT B. D., *Le réel voilé, analyse des concepts quantiques*, Paris, Fayard, 1994. – FEYNMAN R., *Matière et lumière*, Paris, Le Seuil, 1992; *Mécanique quantique (Cours de physique, t. 3)*, Paris, InterEditions, 1979. – HERMANN G., *Les fondements philosophiques de la mécanique quantique*, Paris, Vrin, 1996. – HOFFMANN B. & PATY M., *L'étrange histoire des quanta*, Paris, Le Seuil, 1981. – JANMER M., *The Philosophy of Quantum Mechanics*, New York, Wiley, 1974. – KLEIN E., *La physique quantique*, Paris, Flammarion, 1996. – LANGEVIN P., « La physique moderne et le déterminisme », *La Pensée*, n° 1, avril-mai-juin 1939, p. 1-14. – LEITE LOPES J. & ESCOUBÈS B. dir., *Sources et évolution de la physique quantique*, Paris, Masson, 1994. – LÉVY-LEBLOND J.-M. & BALIBAR F., *Quantique (I. Rudiments)*, Paris, Masson, 1997. – LÉVY-LEBLOND J.-M., BALIBAR F., LAVERNE A. & MOUHANNA D., *Quantique (II. Éléments)*, Paris, Masson (à paraître). – MESIAH A., *Mécanique quantique*, Paris, Dunod, 1995. – OMNES R., *Understanding Quantum Mechanics*, Princeton Univ. Press (à paraître). – POPPER K., *La théorie quantique et le schisme en physique*, Paris, Hermann, 1996. – SCHRODINGER E., *Physique quantique et représentation du monde*, Paris, Le Seuil, 1992. – STENGERS I., *Mécanique quantique, la fin du rêve (Cosmopolitiques, t. 4)*, Paris, La Découverte-Synthelabo, 1997. – WHEELER J.A. & ZUREK W.H. dir., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton Univ. Press, 1983.

Jean-Marc LÉVY-LEBLOND

→ Champ; Complémentarité; Constantes physiques; Controverse Bohr-Einstein; Corps noir; Correspondance (Principe de); Déterminisme; Élémentarité; Espace-temps; Feynman; Indiscernabilité; Invariance de jauge; Irréversibilité; Liaison; Masse; Matière [PHYSIQUE]; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre); Mesure en mécanique quantique; Observable; Pauli; Planck; Probabilité [PHYSIQUE]; Quantique; Réel; Renormalisation; Schrödinger; Sommerfeld; Temps; Théorie; Trou noir; Univers; Virtuel; Weizsäcker.

QUINE Willard VAN ORMAN, né en 1908

Philosophe et logicien américain. Willard van Orman Quine, né en 1908 à Akron (Ohio), a accompli toute sa carrière à Harvard University où il fut successivement étudiant et professeur, et exerça une influence décisive sur le développement de la philosophie américaine. Quine, dès son Ph.D en 1932, a entrepris un voyage en Europe qui le conduisit à Vienne et à Prague, puis a introduit l'empirisme logique du cercle de Vienne en

Amérique. C'est en effet Quine et Carnap qui ont créé, suite à l'immigration des philosophes et logiciens européens chassés par le nazisme, l'institution philosophique analytique, devenue dominante à partir des années 1940. C'est pourtant Quine qui, dès 1951, publia la critique la plus radicale de l'empirisme viennois dans « Two dogmas of empiricism », où il conteste, généralisant un argument de Duhem, la distinction entre énoncés analytiques et synthétiques. On ne peut déterminer, dans un énoncé individuel, une part théorique et une part empirique : la connaissance affronte l'expérience en tant que corps organisé. Quine va plus loin dans son ouvrage majeur, *Le mot et la chose* (1960), avec sa célèbre thèse de l'indétermination de la traduction radicale et sa critique de la signification, dont les conséquences constituent, jusqu'à aujourd'hui, la toile de fond du débat analytique (par ex. chez Davidson, Putnam, Rorty). La thèse de la relativité ontologique et le projet de naturalisation de l'épistémologie (1969) systématisent une redéfinition de l'empirisme qui se poursuit jusqu'à ses derniers livres (*La poursuite de la vérité*, 1990), et une œuvre qui allie rigueur logique, élégance de l'écriture et radicalité philosophique.

© « Two dogmas of empiricism » (1951), trad. fr. in JACOB P., *De Vienne à Cambridge*. Paris, Gallimard, 1980. — *The time of my life*. Cambridge (Mass.). MIT Press, 1985. — *Quine du point de vue logique : neuf essais logico-philosophiques*, traduit sous la direction de S. Laugier. Paris, Vrin, 2003.

Sandra LAUGIER

→ Abduction ; Abstraction ; Conventionnalisme ; Duhem ; Expérience ; Expérience cruciale ; Fait ; Nécessité ; Objectivité ; Pragmatisme ; Réalisme ; Test ; Théorie ; Vérification ; Vérité.

RACE

Publiée en 1952 sous l'égide de l'UNESCO, une brochure intitulée *Qu'est-ce qu'une race ? des savants répondent...* (Paris, UNESCO, 1952) entendait rendre accessibles les découvertes récentes des généticiens et des anthropologistes sur l'origine des races et sur la nature de leurs différences. Dans sa conception et sa rédaction, cette brochure illustre une thèse répandue : la « science » est innocente. Elle nous apporte ses lumières, donne des arguments fermes qui permettent de lutter efficacement contre les préjugés racistes. Les faits biologiques nous donnent les moyens de lutter contre le « mythe de la race », qui « a fait un mal immense sur le plan social et moral ». Ces louables intentions s'expriment dans le plan de l'ouvrage, destiné à souligner à quel point sont infondés les préjugés relatifs à l'existence d'une race pure, d'une race supérieure et de différences raciales immuables.

La philologie autorise l'originalité à bon compte, jureait Bachelard, opposant ainsi le modeste travail collectif des savants aux prétentions souvent exorbitantes des philosophes. En matière de « race », n'est-il

pas souhaitable de s'en tenir à ces modestes mises au point qui vulgarisent honnêtement, à des fins pédagogiques, des résultats aujourd'hui bien connus ?

La Science parle, et nous aurions à l'écouter. Est-ce si simple ? Dans la brochure de l'UNESCO, publiée en 1952, figure une bibliographie. Le plus ancien des ouvrages cités, celui de Gunnar Dalberg, *Race, Reason and Rubbish*, a été publié à New York en 1942, dix ans auparavant. Ce détail a valeur d'indice. Il signifie, comme l'ensemble du texte le confirme, que la science congédie sa propre histoire dans l'exposé qu'elle propose de ses résultats. Cette exclusion institue une séparation radicale entre le discours scientifique et l'ensemble des autres discours, idéologiques, politiques, religieux, philosophiques. En définitive la science ne s'inscrit donc plus dans un contexte culturel, elle n'appartient pas à l'histoire des hommes. Elle-même, d'ailleurs, n'a pas d'histoire qui lui soit propre, puisque les faits qu'elle rapporte ne sont pas reliés aux problèmes qu'elle affronte et dont elle rectifie périodiquement les énoncés. S'instruire auprès des « savants », ce n'est donc pas lire Buffon (1707-1788) qui cherchait à expliquer les « variations dans l'espèce humaine » par le climat, étant entendu que les hommes se sont peu à peu distingués de l'homme blanc pour « dégénérer » au fur et à mesure qu'ils s'éloignaient de la zone tempérée. De même Linné (1707-1778), associant à la couleur noire de la peau un « tempérament flegmatique, dissolu, fourbe, paresseux, négligent... régi par l'autorité », peut être laissé de côté. Que le nombre des races ait oscillé de quelques unités à près de 400 selon les méthodes utilisées n'a plus droit de cité. Ce sont là, dit-on, des anecdotes dénuées d'intérêt. Elles expriment pourtant les convictions partagées par la plupart des auteurs du siècle des Lumières, convaincus que l'Europe devait apporter les bienfaits de la Civilisation à l'homme sauvage. Elles rappellent quelques-unes des « justifications scientifiques » du racisme, promises à un bel avenir au XIX^e s. Elles traduisent enfin le problème fondamental que les scientifiques se sont posé, celui de déterminer les traits de morphologie qui permettraient de reconnaître des groupements à l'intérieur de l'espèce humaine avec la même validité que dans les espèces animales. Or ce problème, en 1952, n'est pas pleinement résolu. Tout en tenant compte des premiers résultats de l'analyse génétique, tout en précisant que les groupes raciaux sont susceptibles de croisements les uns avec les autres, de sorte que les classifications ont un caractère dynamique et non statique, les auteurs ne renoncent pas à recourir à la notion de race et affirment que l'espèce humaine se divise en trois grands groupes, le groupe mongoloïde, le groupe négroïde et le groupe euro-péide. Quarante ans plus tard, Charles Devillers (Tort, 1996), zoologue, résume des positions répandues en assurant que l'introduction des méthodes de l'analyse génétique, biochimique et immunologique nous renseigne beaucoup mieux sur la diversité du patrimoine génétique que ne peuvent le faire les caractères

physiques (couleur de peau, morphologie faciale, etc.), et en concluant que « la race n'a plus de réalité biologique définissable puisque le polymorphisme entre individus de même "race" peut surpasser le polymorphisme entre individus de "races différentes" ». Ainsi, à l'aune des connaissances actuelles, la brochure de 1952 prête le flanc à l'accusation de racisme, qu'elle entend pourtant combattre. L'« innocence » de la « science » serait-elle une quête indéfinie ?

Cette brochure contient, en annexe, deux déclarations qui rassemblent les conclusions de l'ouvrage. Pourquoi ajouter, après la « Déclaration sur la race. 1950 », une « Déclaration sur la nature de la race et les différences entre races ; rapport sur la réunion d'anthropologues et de généticiens tenue à la maison de l'UNESCO, du 4 au 8 juin 1951 » ? Ce dernier texte nous donne la réponse : « [...] au cours de la première réunion, ce sont surtout les sociologues qui avaient exposé leurs vues et rédigé les grandes lignes de la "DÉCLARATION SUR LA RACE" ; cette déclaration devait faire une forte impression, mais elle n'avait pas l'autorité que seuls pouvaient lui conférer les spécialistes d'anthropologie physique et de génétique humaine, particulièrement compétents en ce qui concerne l'aspect biologique du problème de la race. De fait, cette première déclaration n'a pas obtenu sur tous les points l'adhésion des représentants autorisés de ces disciplines. »

Ce préambule contient, on le voit, un aveu : la « Science » est une fiction commode, et non une réalité. L'autorité de la science paraîtrait sans doute plus grande si elle parlait d'une seule voix, mais il faut se rendre à l'évidence : de multiples sciences tiennent sur un même objet des discours distincts, parfois complémentaires, et souvent concurrents. S'agissant de la notion de race, sociologues et biologistes sont susceptibles d'émettre des positions contrastées. Quelles divergences les auteurs de cette seconde déclaration ont-ils tenu à souligner ? « Quelle que soit la classification qu'un anthropologiste propose, assurait-on dans la première version, il n'y fait jamais intervenir les caractères mentaux. » « La plupart des anthropologistes, relève-t-on dans la seconde version, ne tiennent pas compte des caractères mentaux dans leur classification des races humaines. » Il y a donc des anthropologistes qui tiennent compte des caractères mentaux dans leur classification des races humaines... Poursuivons. « [...] les tests ont démontré la ressemblance fondamentale des caractères intellectuels entre les différents groupes humains » lit-on dans le premier texte, alors que le second mentionne « les psychologues qui déclarent avoir trouvé les plus grandes différences d'intelligence entre groupes d'origine raciale différente, et qui soutiennent que ces différences sont héréditaires [...] ». Voilà qu'à la belle unanimité du monde scientifique se substituent les débats entre spécialistes de différentes disciplines et les controverses entre les différents courants de pensée. Le terrain de ces affrontements n'est pas neutre. Les tests psychologiques,

censés déterminer les aptitudes intellectuelles innées, en dessinent les limites. Quelle est la signification de cette irruption de la question des tests au sein d'un exposé consacré à la notion de race ?

En 1996, *The Bell Curve*, de Murray et Herrnstein, développait la thèse selon laquelle la moyenne des résultats aux tests d'intelligence des écoliers de race noire était inférieure à celle des écoliers blancs des États-Unis. L'ouvrage s'inscrivait en fait dans une tradition séculière. Lewis Terman, l'homme qui est le principal responsable de l'utilisation des tests aux États-Unis, passait en effet aisément des individus aux classes sociales et aux races. En 1916, dans *The Measurement of Intelligence*, il tentait déjà de rassembler toutes les cotations en une courbe normale, et il relevait la fréquence des QI entre 70 et 80 dans les classes et races « inférieures ».

Or Terman empruntait à Francis Galton, qu'il admirait, son héréditarisme. Le fondateur de l'eugénisme avait voulu établir le caractère héréditaire de l'intelligence dans sa première œuvre importante, *Hereditary Genius*, en 1869. Loin d'être anodine, la référence aux tests psychologiques dans la brochure de l'UNESCO renvoie au contraire à l'eugénisme, cette idéologie scientifique greffée sur le darwinisme, dont les connexions théoriques éclairent la persistance du racisme, voire sa résurgence sous des formes inédites.

L'eugénisme est « la science de l'amélioration des lignées ». Galton distinguait deux voies possibles pour entraver la marche rétrograde de la civilisation, accroître « la productivité des meilleures souches », ou réprimer « la productivité des souches les pires » (Galton, 1901). Que Galton ait été raciste n'est pas contestable, mais les différences entre les races n'occupent qu'une faible partie de ses études sur l'hérédité. L'originalité de l'eugénisme devient au contraire évidente lorsqu'on s'attache aux convictions sociales de Galton, et plus encore à la stratégie eugéniste pour légitimer les inégalités sociales. Les hommes ne connaissant pas tous la même destinée sociale, certains réussissent, d'autres non... Les réputations ne sont pas surfaites, elles se fondent sur les capacités. Et celles-ci sont héréditaires, aussi faut-il veiller à des unions qui assurent la pérennité de ces hommes de qualité. L'idée de Galton est donc celle-ci : les membres des différentes classes sociales ne sont pas biologiquement assimilables, ils appartiennent à des « races », à des lignées différentes, et il faut lutter contre les effets néfastes des promotions et des déclassements sociaux, c'est-à-dire du brassage des sangs.

La caractéristique majeure de l'eugénisme, de ce point de vue, est moins d'affirmer que les Noirs ou les Jaunes appartiennent à des races inférieures et sont dignes d'être colonisés par les Blancs — ce dont pourtant les premiers eugénistes ne se privent pas — que de traduire en termes biologiques les conflits sociaux pour les dénier. Ramener les problèmes sociaux à des problèmes biologiques comme on a pu le réduire à des problèmes moraux, telle est bien la démarche initiale

sur laquelle se construit l'eugénisme. Est-ce du racisme ? Oui, puisqu'il s'agit de stigmatiser ou de promouvoir des groupes de personnes en les hiérarchisant selon des critères biologiques (cf. Tort). Un racisme généralisé, plus subtil et plus délicat à éradiquer que le racisme ordinaire.

Le racisme commun s'alimente aux apparences. Perçus à travers le prisme des préjugés raciaux qu'ils sont destinés à soutenir, des traits morphologiques sont tangibles, et le racisme ordinaire consiste à les réifier et à leur associer des caractéristiques mentales, morales et affectives pour conclure à l'infériorité des uns et à la supériorité des autres. Il n'en est pas de même lorsque les populations concernées appartiennent à des couches sociales distinctes. Certes, par le vêtement ou l'éducation du geste, on tente souvent de compenser cette absence des indices d'appartenance à une même lignée. Mais il faut se rendre à l'évidence : les différences physiques entre les membres de couches sociales distinctes ne sont pas flagrantes. En revanche, les différences de réussite sociale sont bien visibles. Tout l'effort de l'eugénisme sera alors de référer ces distinctions socialement visibles à leurs motivations biologiques héréditaires, invisibles mais tenues pour bien réelles. Là où il n'y a pas de différences perceptibles, il nous avertit de leur existence. Aussi est-ce un racisme « savant », qui détecte l'imperceptible. Il fait voir les différences biologiques cachées, au lieu de surestimer la portée des distinctions physiques apparentes.

Sommes-nous menacés par un nouvel eugénisme, de sorte qu'il faudrait repérer, derrière la référence aux tests psychologiques, la logique toujours agissante d'une doctrine séculaire ? Répondre à cette question passe par trois remarques. En premier lieu l'idéologie eugéniste, qui repose sur une mythologie de la décadence par le mélange des sanges dont certaines connexions majeures sont présentes dans l'œuvre d'Arthur de Gobineau, est porteuse d'un enseignement majeur pour la compréhension du racisme : il n'est pas nécessaire, pour être raciste, de prétendre « constater » l'existence de races pures, il suffit de nourrir le projet de les produire, par exemple en interrompant un processus de métissage ou en gérant le prétendu substrat biologique de la virtuosité intellectuelle. En second lieu l'essor de la biologie moléculaire et des biotechnologies a donné le sentiment que l'eugénisme était à l'ordre du jour. Or les biotechnologies se développent dans le contexte d'un individualisme radical. Les problèmes qu'elles soulèvent sont graves, mais différents de ceux posés par la volonté eugénique d'agir sur les caractéristiques moyennes d'une population. En revanche, sous couvert d'admiration pour la génétique, un certain biologisme renaît. Celui-ci, lorsqu'il est associé au thème de la sélection naturelle, peut fournir à l'économie libérale une justification qui va jusqu'à l'absoudre des inégalités trop voyantes qu'on lui impute ordinairement. Les inégalités physiologiques héréditaires ne sont-elles pas logiquement sanctionnées par les inégalités économiques ? La « vieille

rengaine du darwinisme social » (Prochiantz, 1991) est ainsi de retour. Sous sa forme la plus récente, celle de la sociobiologie, il connaît un vif succès. Sans doute le conservatisme revendiqué par Edward O. Wilson, fondateur de la sociobiologie, n'est-il pas partagé par tous les biologistes. Sans doute nombre d'entre eux récusent-ils le lien mécanique que les sociobiologistes établissent entre les comportements et les gènes, soulignant, à l'instar d'Alain Prochiantz, que « si les gènes sont bien responsables des potentialités propres à l'espèce considérée, le détail de l'organisation n'est pas codé par les gènes, il est le résultat d'un processus épigénétique d'apprentissage ». Reste que la volonté de mettre en évidence les fondements biologiques des comportements et la justification naturaliste des hiérarchies se mêlent assez étroitement, et assez fréquemment, dans les écrits des scientifiques eux-mêmes, pour ne pas susciter, la vulgarisation médiatique faisant le reste, les pires errements.

La coexistence, dans les mêmes magazines, de véhémentes condamnations du racisme et de l'intérêt pour la « découverte du gène de l'intelligence », associée à la justification des inégalités sociales par la sélection naturelle des plus aptes, en dit long sur la confusion régnante. Veillons à ne pas proclamer que le racisme est mort, faute de « races », tout en continuant à penser, avec Alexis Carrel, que « ceux qui sont aujourd'hui des prolétaires sont les victimes de leurs tarés héréditaires », avec Arthur de Gobineau que les civilisations étrangères l'une à l'autre « ne peuvent que se toucher à la surface, ne se pénètrent jamais et s'excluent toujours ».

- BLUMENBACH J.F., *De generis humani varietate nativa* (1803). — BOYD W.C., *Genetics and the Races of Man*, Boston (Mass.), 1950. — BROCA P., « Sur le volume et la forme du cerveau suivant les individus et suivant les races », *Bulletins de la Société d'Anthropologie*, Paris 2. — BUFFON G., *De l'homme*, Paris, 1749. — COMAS J., *Racial Myths*, rééd. New York, 1965. — DEVILLERS C., « Race », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996. — DUNN L.C. & DOBZANSKY T., *Heredity, Race and Society*, New York, 1959. — GALTON F., *Hereditary Genius : an Inquiry into its Laws and Consequences*, Londres, MacMillan, 1869. — GOBINEAU A. DE, *Essai sur l'inégalité des races humaines*, Paris, Belfond, 1967. — GOULD S.J., *La mal-mesure de l'homme*, nouv. éd., Paris, Odile Jacob, 1997. — JACQUARD A., *Éloge de la différence. La génétique et les hommes*, Paris, Le Seuil, 1981. — KLINEBERG O., *Race and Psychology*, rééd., Paris, 1965. — LEVI-STRAUSS C., *Race et histoire*, UNESCO, 1973. — LINNÉ C., *Systema Naturae* (1758). — POLIAKOV L., *Le Mythe aryen*, Paris, Calmann-Lévy, 1971. — PROCHANTZ A., « Les bases neurologiques de la manipulation épigénétique », *Bio-éthique et cultures*, textes réunis par Debru C., Paris, Vrin, 1991. — TAGUIEFF P.-A., *La Force du Préjugé*, Paris, La Découverte, 1987. — TERMAN L.M., *The measurement of intelligence*, Boston, Houghton Mifflin, 1916. — THOMAS J.-P., *Les fondements de l'eugénisme*, Paris, PUF, 1995. — TORT P., « Race/Racisme », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996.

Jean Paul THOMAS

→ Darwinisme ; Eugénisme ; Gène ; Génétique ; Sociobiologie.

RADIOACTIVITÉ

Des rayons uraniques à la radioactivité

Le terme « radioactivité », inventé par Marie Curie en 1898, désigne à l'origine aussi bien le rayonnement émis spontanément par certains éléments que l'étude de leurs propriétés physiques et chimiques. Sa découverte est attribuée à Henri Becquerel pour un ensemble de travaux initiés fin février 1896. Un mois plus tôt, le 20 janvier 1896, Henri Poincaré avait présenté les rayons X découverts par Conrad Röntgen en supposant la possible émission de tels rayonnements par d'autres corps fluorescents. Becquerel, spécialiste des phénomènes de luminescence, entreprit alors de vérifier cette hypothèse en utilisant des lamelles cristallines de sulfate double d'uranyl et de potassium. C'est le 20 février qu'il place ces sels sur une plaque photographique préalablement enveloppée de deux papiers noirs épais et expose le tout au soleil pendant plusieurs heures. Au développement de la plaque, il reconnaît la silhouette de la substance phosphorescente. La semaine suivante, faute de soleil, Becquerel ne peut recommencer ses expériences. Il entrepose ses préparations — sels d'uranium sur plaques photographiques — dans un tiroir. Au bout de plusieurs jours, il décide de développer ses plaques et, à sa grande surprise, loin d'observer des images très faibles, il constate l'apparition de taches assez nettes. Il en conclut que la lumière solaire n'est pas nécessaire pour provoquer de telles impressions photographiques : le sel d'uranium émet un rayonnement pénétrant invisible qui n'est pas dû à une phosphorescence ordinaire. Becquerel postule l'existence d'une « phosphorescence invisible de longue durée » et entreprend une série de travaux sur le sujet. Le 18 mai 1896, il annonce que l'élément uranium est le siège de cette émission qu'il baptise « rayons uraniques ».

Outre les publications de Becquerel (7 en 1896, 2 en 1897), la littérature s'enrichit tout au plus d'une douzaine de contributions sur les rayons uraniques. Ces derniers ne passionnent guère la communauté scientifique dans les deux années qui suivent leur découverte. Les publications les concernant sont le plus souvent classées dans la rubrique rayons X. Il est vrai que durant cette période, aux travaux sur les rayons X et uraniques s'ajoutent de nombreuses publications sur l'existence de nouveaux rayonnements. Fin 1897, Becquerel abandonne le sujet en ayant le sentiment de l'avoir épuisé. De nombreux historiens se sont interrogés sur l'indifférence relative des scientifiques de l'époque vis-à-vis de ce phénomène majeur que représente la découverte de la radioactivité. Cette question part de l'idée que ces rayons auraient dû davantage retenir l'attention, comme cela sera le cas par la suite. C'est là une vision rétrospective de l'histoire de la radioactivité qui ne tient pas compte du fait que les rayons de Becquerel n'ont pas à l'époque plus de raison de passionner la communauté scientifique que les

nombreux autres rayons étudiés alors (rayons cathodiques, rayons X, rayons ultraviolets...).

Peu de temps après, Marie Curie s'intéressera à la question des rayons uraniques avec une approche et des méthodes distinctes de celles de Becquerel. Tandis que ce dernier a exclusivement étudié l'uranium, elle essaye d'emblée, ce qu'avaient déjà tenté des scientifiques avant elle, de vérifier si l'activité est propre à l'uranium ou non. Elle aborde la question avec une grande rigueur. Elle utilise un montage expérimental conçu par Pierre et Jacques Curie composé d'un électromètre, d'une chambre d'ionisation et d'un quartz piézoélectrique. Rejointe par Pierre Curie, ils découvrent ensemble le polonium, puis le radium en 1898. Ces découvertes font événement et donnent une nouvelle signification aux travaux de Becquerel : les rayons uraniques ne sont pas propres à l'uranium mais sont émis par d'autres éléments. La radioactivité représente donc une nouvelle propriété de la matière.

Une discipline hétérogène

Dès 1899, de plus en plus de scientifiques travaillent sur le sujet : les Curie et Becquerel en France, Friedrich Giesel, J. Elster et H. Geitel en Allemagne, Ernest Rutherford en Grande-Bretagne puis au Canada, Stefan Meyer et Egon Ritter von Schweidler en Autriche. Très vite, les travaux sur les radioéléments s'intensifient, le nombre de publications sur le sujet ne cesse d'augmenter. La communauté scientifique a du mal à classer cette nouvelle discipline. Est-ce de la chimie, de la physique ou les deux à la fois ? La difficulté à déterminer quel prix Nobel, de physique ou de chimie, devait récompenser un travail en radioactivité témoigne de ces hésitations : doit-on attribuer à un radioactiviste un prix Nobel de chimie ou de physique ? À quelle discipline appartient donc les travaux sur les rayons et les corps radioactifs ? Les avis sont partagés, comme en témoignent les désaccords entre les comités Nobel de physique et de chimie. En 1903, le comité Nobel de chimie s'opposera un temps à l'attribution d'un prix Nobel de physique aux Curie, qualifiant ces derniers de chimistes. En 1908, le physicien Rutherford reçoit le prix Nobel de... chimie, au grand étonnement de beaucoup, en particulier du principal intéressé. Trois ans plus tard, Marie Curie reçoit un deuxième prix Nobel, de chimie cette fois. La radioactivité reste une discipline aux contours assez flous, au carrefour de la physique et de la chimie. Par la suite, elle a trop souvent été assimilée à la physique nucléaire, ou plus exactement à sa préhistoire. Certes cette dernière y trouve en partie son origine, toutefois elle s'en distingue par ses approches, ses méthodes, ses objets d'études et les concepts utilisés.

Dès le début du siècle, un groupe de scientifiques, spécialisé dans l'étude de ces corps radioactifs, se structure progressivement à travers un réseau de laboratoires dont les plus importants sont, dans les années 1920, l'Institut du radium de Paris, codirigé par Marie Curie et Claudius Regaud, celui de Vienne, dirigé par

Meyer, le laboratoire Cavendish à Cambridge avec à sa tête Rutherford, et le Kaiser Wilhelm de chimie de Berlin sous le patronage de Otto Hahn et Lise Meitner. La radioactivité est alors un ensemble hétérogène de pratiques matérielles, de programmes de recherche, d'idées et de concepts, de réseaux sociaux et de discours. Approches, objets étudiés et systèmes expérimentaux diffèrent d'un laboratoire à un autre. Chaque institution a un régime de fonctionnement propre, des activités qui la caractérisent et la structurent. Dans le laboratoire de Rutherford par exemple, on se consacre surtout à l'étude physique des transformations radioactives, des mécanismes et des produits de désintégration, puis progressivement à l'étude de la structure des atomes. A Berlin, on excelle dans l'identification de nouveaux corps radioactifs et dans l'étude physique du rayonnement. En France, au laboratoire Curie, la radioactivité représente un ensemble : étude des propriétés chimiques et physiques des radioéléments, mais aussi mise au point de méthodes de production industrielle de radioéléments, production d'instruments ou encore conseils techniques et certification d'objets pour les applications médicales. Dans le projet de Marie Curie, l'industrie des radioéléments occupe une place particulière. Peu de temps après la découverte du polonium et du radium, les Curie se sont en effet heurtés à un problème d'ordre pratique : ces éléments qu'ils voulaient extraire de la pechblende ne s'y trouvent qu'en quantité infinitésimale. Comme ils se sont engagés dans l'extraction et l'identification chimique des radioéléments, ils devaient alors traiter des quantités de plus en plus importantes de minerais, afin de concentrer suffisamment de radium et de polonium. Ils mettent alors en place une véritable stratégie d'accumulation de substances radioactives qui les pousse dès 1899 à créer, impulser et développer l'industrie des radioéléments, en particulier celle du radium. Pour Marie Curie, l'usine représente un complément indispensable au laboratoire, voire constitue une partie de ce laboratoire sans laquelle elle ne peut mener à bien son programme de recherche. C'est grâce à l'aide logistique de l'industrie qu'elle est en mesure d'accumuler suffisamment de radium pour déterminer son poids atomique. L'industrie des radioéléments est née et s'est développé grâce aux conseils techniques du laboratoire Curie, des procédés de traitement chimique qui y sont mis au point, des instruments qu'il fournit ainsi que des techniciens qui y sont formés. Plus généralement, cette industrie est capitale pour le développement de la radioactivité et de ses applications : les substances radioactives sont indispensables pour les études en physique et en chimie ou encore pour les applications médicales en pleine extension.

Une révolution pour la chimie

La radioactivité a enrichi et contribué à révolutionner bien des domaines, notamment la chimie. Les éléments radioactifs semblent pendant un temps se distinguer des éléments connus et surtout étonnent par

leurs étranges propriétés. Comment ces corps émettent-ils de l'énergie sans source identifiable ? Quelle est l'origine de leur rayonnement ? Faut-il la chercher en leur sein ou bien à l'extérieur, dans l'espace par exemple ? Ces interrogations sont renforcées par certains résultats, comme l'observation d'une radioactivité constante de certains corps et pas d'autres. Les tentatives d'explications sont nombreuses et ne manquent pas d'imagination, mais aucune n'est totalement satisfaisante. La publication de travaux menés à Montréal en 1902-1903 par Rutherford et Frederick Soddy marque un véritable tournant. Rutherford a d'abord observé que le thorium émet une sorte de vapeur radioactive qu'il a nommée « émanation ». En collaboration avec Soddy, il montre que cette émanation est un gaz de la famille des gaz rares. Puis ils séparent du thorium un nouvel élément radioactif qu'ils nomment thorium X et font état d'observations surprenantes : le thorium X perd la moitié de sa radioactivité en quatre jours, tandis que le thorium dont a été extrait le thorium X retrouve son activité initiale. En 1902, ils formulent leur hypothèse des désintégrations radioactives : le thorium se transforme en thorium X, qui à son tour se transforme en un gaz (émanation), qui lui-même se transforme en dépôt actif. Ils donnent ainsi corps, dans une certaine mesure, au vieux rêve des alchimistes, la transmutation d'un corps en un autre. L'année suivante, ils étendent leur hypothèse à l'ensemble des radioéléments alors connus et proposent la première esquisse des familles radioactives qui seraient au nombre de trois : uranium, radium, thorium. Ainsi, les atomes radioactifs ne sont pas stables mais se désintègrent spontanément en émettant un rayonnement. Chaque produit de désintégration est alors caractérisé par une période, temps au bout duquel il perd la moitié de sa radioactivité.

Si cette théorie est perçue par la suite comme une véritable révolution conceptuelle, elle est reçue sur le moment dans une relative indifférence, voire avec scepticisme en dehors des scientifiques travaillant dans le domaine de la radioactivité. Rutherford déploie alors beaucoup de temps et d'énergie, en liaison avec ses « disciples » plus chimistes que lui, tels Bertram Boltwood et Hahn, pour constituer ces différentes familles radioactives, tant pour compléter la théorie que pour convaincre de sa validité. Les difficultés sont nombreuses et les débats parfois vifs. Moyennant des changements constants, en particulier sur le nombre de familles radioactives et leur composition, cette théorie va s'imposer progressivement, probablement pour au moins deux raisons. Elle représente, d'une part, la seule véritable théorie générale de la radioactivité tentant d'englober l'ensemble des résultats de l'époque et, d'autre part, elle fournit un moyen d'investigation et d'identification de certains radioéléments. Une approche fondée uniquement sur les méthodes chimiques traditionnelles d'identification des éléments commence, en effet, à marquer ses limites et se révèle inopérante dans de nombreux cas. La chimie des radioéléments, cette « chimie de l'invisible », comme

la nomme Marie Curie, pose bien des problèmes. Les éléments radioactifs ne sont présents qu'en trop faibles quantités pour être chimiquement isolés. Seule l'analyse de leur rayonnement (le rayonnement radioactif est composé de trois types de radiations, alpha, bêta et gamma) et de la loi d'évolution de leur activité dans le temps permet de les identifier, à défaut de pouvoir les isoler.

Les nouveaux radioéléments se multiplient, mais ne viennent pas cependant remplir autant de nouvelles cases du tableau de Mendeleïev. Certains éléments découverts, comme le radium, correspondent en effet à des types chimiques nouveaux alors que d'autres, identifiés généralement par leur filiation (famille radioactive), leur période de décroissance et leur rayonnement correspondent à des éléments chimiques déjà connus dans le tableau périodique des éléments. En 1910-1911, Soddy tire les conclusions de ces observations étonnantes : chaque case du tableau de Mendeleïev peut abriter plusieurs atomes, se distinguant les uns des autres par leur période de vie (par la composition de leur noyau dirions-nous aujourd'hui) mais possédant tous les propriétés d'un même élément chimique. Cette propriété, l'isotopie (*iso-topos* : qui sont au même endroit) vaudra à Soddy le prix Nobel de chimie en 1921.

À partir de 1913, un ensemble de travaux menés par Soddy, Fajans, Hevesy et Russel conduit à la formulation de la « loi de déplacement » ou « loi de valence » : la radioactivité alpha correspond à la formation d'un nouvel élément chimique situé, par rapport à l'élément qui se désintègre, deux colonnes vers la gauche dans le tableau de Mendeleïev. La radioactivité bêta correspond, elle, à la formation d'un nouvel élément, une colonne vers la droite. Ainsi, la radioactivité a profondément transformé la signification du tableau de Mendeleïev : il est, d'une part, parcouru par une série de transformations et, d'autre part, ses occupants, les éléments chimiques, perdent chacun son identité et son individualité pour regrouper un nombre donné d'isotopes.

► BENSUADE-VINCENT B. & STENGERS I., *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte, 1993. — BOUDIA S. & ROUË X. *Science, Medicine, Industry: The Curie and Joliot-Curie Laboratories*, *History and Technology*, 13, 4, 1997. — CURIE M., *Traité de radioactivité*, Paris, Gauthier-Villars, 1910. — RUTHERFORD E., *Radioactive Substances and their Radiations*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1913. — SODDY F., *The chemistry of radio-elements*, Londres, Longmans, Green & Co, 1911.

Soraya BOUDIA

— Becquerel ; Chimie physique ; Rutherford.

RATIONALISME

Terme qui désigne une secte, une doctrine ou une attitude intellectuelle assignant à la raison ou lumière naturelle, c'est-à-dire aux seules capacités humaines de

connaissance, une valeur exclusive pour comprendre la réalité dans ses diverses manifestations et y organiser son existence.

Secte théologique. — Du point de vue de l'orthodoxie chrétienne, le rationalisme serait « l'erreur » de ceux qui récusent tout ce qui se trouve au-dessus des lumières de la raison, tel qu'il a été représenté au XVII^e s. par une secte située entre les Presbytériens et les Indépendants ; pour eux, « ce que leur raison leur dicte en ce qui concerne l'Église et l'État est tenu pour bon jusqu'à ce qu'ils soient convaincus qu'il y a mieux » (voir Lalande, *Voc. techn. et crit. de la phil.*, 1928, p. 681). À la fin du siècle, Leibniz (Lalande, *ibid.*) signale en Hollande l'existence de deux partis, « les théologiens rationaux et non rationaux » qui disputaient sur « l'usage de la raison dans l'explication de la Sainte Écriture » (*Théodicée*, Disc. Prél., § 14), dispute qui aboutit, à travers la mise en question des Mystères, au problème général des rapports entre théologie et philosophie, c'est-à-dire, de la foi et de la raison (*ibid.*, § 17) : les rationalistes font de la raison la maîtresse de la foi et non plus sa servante, à l'inverse des orthodoxes (Thomas d'Aquin, *Somme théologique*, Part. I, Q. I, art. 5) qui surimposent une « science sacrée », issue de la Révélation et accessible à l'homme par la lumière surnaturelle de la foi, à la science profane fondée sur la seule lumière naturelle.

Doctrine philosophique. — Le rationalisme pose en principe que « rien n'existe qui n'ait sa raison d'être, de telle sorte qu'en droit, sinon en fait, il n'est rien qui ne soit intelligible » (Lalande, *ibid.*). Leibniz avait formulé ce principe de la manière suivante : « [...] c'est que jamais rien n'arrive sans qu'il y ait une cause déterminante, c'est-à-dire quelque chose qui puisse servir à rendre raison pourquoi cela est existant plutôt que non existant, et pourquoi cela est ainsi plutôt que de toute autre façon » (*Théodicée*, I^{er} part., § 44), ce qui revient à lui assigner une portée ontologique. Un tel principe est *a priori*, donc sans exception, et s'applique même lorsque les « raisons déterminantes » ne nous sont pas connues. C'est pourquoi, selon Leibniz, il permet de répondre à la question suprême : pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? (voir *Principes de la Nature et de la Grâce fondés en raison*, § 7) en faisant intervenir un être nécessaire et premier. Or ce raisonnement est parfaitement circulaire parce que, d'une part, sans le principe de raison « nous ne pourrions jamais prouver l'existence de Dieu » (*Théodicée*, I^{er} part., § 44), et d'autre part, sans Dieu nous ne pourrions rendre raison « pourquoi les choses sont allées plutôt ainsi qu'autrement » (*Principes...*, § 10). Nous sommes donc en présence d'un dogme rationnellement injustifié, et il en va de même du « principe d'universelle intelligibilité », issu du platonisme et censé représenter « la foi commune, plus ou moins consciente d'elle-même, mais présente chez tous », à savoir croyants, savants et philosophes, tel qu'il a été

formulé en 1869 par M. Fouillée (Lalande, *ibid.*, p. 389). Un dogme ne relève que d'une foi.

Attitude intellectuelle. – Est rationaliste celui qui n'admet comme recevable ce qui peut être reconnu comme tel par une intelligence strictement humaine, à l'exclusion de toute révélation d'origine transcendante et de tout dogme métaphysique en retrait par rapport à une expérience des réalités accessibles aux moyens de connaissance soit naturels soit techniquement sophistiqués. Le rationalisme se définit alors par le souci de mettre au jour des raisons valables pour admettre comme vraies ou vraisemblables ou pour rejeter comme fausses ou absurdes toutes les hypothèses que l'esprit peut se forger à propos de ce qui se passe dans la nature. Il a donc pour racine un doute méthodique, à distinguer du doute sceptique qui invalide *a priori* toute connaissance et du doute hyperbolique qui invalide *a priori* toute réalité, parce que méthode signifie ici épreuve, et parce que, sans épreuve, on ne peut discerner en quoi une pensée pourrait être juste, c'est-à-dire justifiée.

Accès à la rationalité et rationalisme : Piaget

« Connaître, c'est décrire pour retrouver » (G. Bachelard, *Essai sur la connaissance approchée*, 1927, Paris, 1973, p. 9). Décrire suppose une méthode qui consiste à relever dans la réalité un certain nombre de repères, ceux à partir desquels il sera possible de reconstruire le réel de manière intelligible c'est-à-dire dans le cadre d'un discours organisé autour de notions, représentées par autant de symboles. Il y aurait alors un rapport entre l'ordre de cette reconstruction par l'esprit et l'ordre réel, ce qui ne va pas sans évoquer la célèbre définition spinoziste de la vérité : « Ordo et connexio idearum idem est ac ordo et connexio rerum » (Spinoza, *Éthique*, II, prop. 7).

Mais pour l'attitude rationaliste moderne, il ne peut plus être question d'un parallélisme ontologique à caractère statique (« [...] où est la vérité ? La vérité est dans le travail de l'expérience par l'activité rationnelle » : (Bachelard, *L'engagement rationaliste*, Paris, 1972, p. 57) en face de « l'inachèvement fondamental de la connaissance » (*Essai, in Œuvres complètes [OC]*, p. 13). Or, celle-ci ne peut se concevoir que comme approchée, et pour cette raison, comme progressive, analogue à une « création continue » (*ibid.*, p. 15) qui tourne le dos au phénomène tel qu'il est donné, c'est-à-dire aux évidences naturelles, au profit d'un univers nouménal, autrement dit d'un univers de pensées. Il s'ensuit que « le monde est alors moins notre représentation que notre vérification » (G. Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, 1934, Paris, 1987, p. 48). Le réel est donc « un cas particulier du possible » (*ibid.*, p. 62), et le rapport du réel et de la connaissance dépend des repères qui peuvent valider la théorie, repères qu'une expérience techniquement et conceptuellement sophistiquée aura permis de dégager : Bachelard définit donc le

rationalisme comme un rationalisme appliqué, corrélatif d'un matérialisme technique (*Le rationalisme appliqué*, Paris, 1949, p. 5), à distance égale de l'idéalisme et du réalisme philosophiques, que leur caractère spéculatif et statique élimine. Ceci dit, l'être humain, s'il peut accéder à une connaissance rationnelle, est aussi un être vivant dont les activités cognitives dépendent des stimulations périphériques d'un appareil psychophysiologique qui reste la condition incontournable de notre accès au réel.

Le centre de cet appareil est le cerveau : « On n'a qu'un cerveau pour penser à tout » (*Essai, OC*, p. 18). Pour l'espèce humaine, ce cerveau est le produit de l'évolution biologique et pour l'individu, il s'édifie au cours de l'ontogénèse de l'organisme. Il en va de même de ses activités. Bachelard peut donc traiter « l'assimilation intentionnelle » dans laquelle il voit la source des concepts qui sont pour lui « les atomes indestructibles d'un monde logique », comme le prolongement d'une « assimilation fonctionnelle », considérée elle-même comme « le principe le plus indiscutable de l'évolution » (*ibid.*, p. 19). Pas de rationalisme sans une psychologie génétique, ce qui n'a pas échappé non plus aux théoriciens de la science d'obédience empiristes, par exemple Quine, qui, malheureusement, n'a fait preuve sur ce point que de son ignorance (voir W.V.O. Quine, *Le mot et la chose*, 1959, Paris, 1977, chap. 3 ; critique in G. Miller & Ph Johnson-Laird, *Language and Perception*, 1976, p. 350-351). Cette nécessité reconnue d'une étude expérimentale des origines des activités cognitives chez l'enfant pour montrer l'enracinement de la raison dans la nature est à la base de l'œuvre de Piaget qui en fait la condition d'une épistémologie non fixiste (*Psychologie et Épistémologie*, Paris, 1970, p. 11-15). Cette perspective évolutionniste semble offrir le seul moyen de faire l'économie d'un monde intemporel des objets logiques et scientifiques dont la connotation reste fortement platonicienne (3^e monde de K. Popper, même s'il se défend de tout platonisme), parce que, dans ce cadre, « la logique formelle ou logistique constitue simplement l'axiomatique des états d'équilibre de la pensée, et la science réelle correspondant à cette axiomatique n'est autre que la psychologie elle-même de la pensée » (Piaget, *La psychologie de l'intelligence*, 1947, Paris, 1949, p. 7-8, 37, etc. ; voir aussi *Psychologie et épistémologie, OC*, p. 142).

Dès ses premières œuvres, Piaget comprend la psychologie de l'intelligence comme l'étude expérimentale de l'accès à la rationalité dans une optique biologique parce qu'il n'y a pas d'autre moyen scientifique de rendre raison de l'existence de l'espèce humaine et de ses performances que d'y voir le produit de l'évolution des êtres vivants, à moins de recourir à une théologie reconnue ou implicite, c'est-à-dire à un mystère comme H. Spencer l'avait reconnu au cours du siècle précédent (« The Development Hypothesis », 1852, *Essays*, vol. I, Londres, 1883, p. 381-387). Cette psychologie

constitue une « épistémologie comparée » qui confronte les stratégies caractéristiques des différents stades parcourus par l'enfant depuis sa naissance avant de parvenir à la connaissance objective dont l'adulte, sauf exception, semble capable : égocentrisme initial, avec assimilation du réel à l'activité propre du sujet, ce qui se traduit par l'irréversibilité des actions ; transformation des actions en opérations réversibles grâce à leur coordination et à leur socialisation ; constitution de systèmes opératoires ou « groupements », dont la forme achevée et le modèle est, pour Piaget, la notion mathématique de groupe telle qu'elle a été définie par H. Poincaré (Piaget, *Le langage et la pensée chez l'enfant*, 1923, 3^e éd., 1948, p. 67-68, p. 76-77). Ce développement épigénétique (c'est-à-dire non déterminé par une loi interne) est commandé par les deux processus fondamentaux, l'assimilation et l'accommodation, qui régissent les interactions de l'organisme et du milieu : l'assimilation est l'opération de digestion mentale par laquelle le sujet ramène les choses à sa structure propre (voir *La représentation du monde chez l'enfant*, 1926, 2^e éd., 1938, introd., p. XLI) ; l'accommodation (concept issu de la physiologie de l'œil) décrit l'acte par lequel le sujet modifie ses schémas antérieurs pour les ajuster à de nouvelles données. La connaissance de l'environnement qui résulte de ces deux activités mentales est décrite comme le résultat d'une équilibre mobile dont dépend l'adaptation psychologique du sujet à son univers, au même titre que la structure organique représente l'adaptation biologique, et la raison est équilibre. Le comportement rationnel est donc d'abord un comportement intelligent.

Le rationalisme de Piaget se traduit donc par une psychologie de l'intelligence qui se manifeste aussi bien par les premiers tâtonnements du nouveau-né que par les constructions les plus sophistiquées des sciences mathématiques et physiques. Les tâtonnements initiaux représentent ainsi la première apparition d'une activité rationnelle, c'est-à-dire d'une activité en prise sur le réel en vue de dégager son intelligibilité et d'en permettre la maîtrise – activité maladroite sans doute, mais située aux antipodes des rituels absurdes, tant individuels que collectifs, dont la signification symbolique ne fait que révéler le décalage de l'*homo loquax* vis-à-vis du monde dans lequel il est appelé à vivre. Un tel rationalisme semble rejoindre l'ancien culte de Métis, déesse de la Ruse que les Grecs plaçaient au principe des stratégies bien conçues et des conseils lucides qui assurent victoires et réussites, avant que Platon ne condamne les savoirs pratiques et l'intelligence technique au profit d'une raison spéculative immuable (voir M. Detienne & J.-P. Vernant, *Les ruses de l'intelligence. La Métis des Grecs*, Paris, 1974, p. 303-305). En réhabilitant l'intelligence, Piaget ne fait ainsi que liquider un fétiche philosophique deux fois millénaire au profit d'une activité expérimentale qui permet seule de parvenir peu à peu à une maîtrise rationnelle de la réalité qui nous environne. Il est contemporain de Bachelard.

L'engagement rationaliste : Bachelard

La reconnaissance des objets se situe à un autre niveau de sophistication que les manipulations initiales : elle suppose la construction par l'intelligence d'un tissu de relations réversibles qui dépassent les constances perçues et en rendent raison (Piaget, *La psychologie de l'intelligence, OC*, p. 130-131). Bachelard est du même avis : « Si nous voulons connaître avec un maximum de rigueur, nous devons organiser des actes, substituer totalement le construit au donné » (*Essai sur la connaissance approchée, OC*, p. 174), ou encore : « Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit » (*La formation de l'esprit scientifique*, 1938, Paris, 1947, p. 14). Mais cet accord concernant le lien qui existe entre connaissance et construction, et d'autres points de convergence entre les deux épistémologues, ne doivent pas faire méconnaître une divergence essentielle : au rationalisme de Piaget qui situe la science dans le prolongement du développement progressif et linéaire d'une intelligence qui parcourt une série de stades successifs, tandis que la multiplication des départements scientifiques résulte de la différenciation des savoirs formant cercle (*Psychologie et épistémologie, OC*, p. 142-148), Bachelard oppose un rationalisme de la rupture : « On peut être très intelligent et ne pas être rationaliste » (*L'engagement rationaliste, OC*, p. 60). Il faut aussi être éveillé, avoir rompu avec toute sorte de vie à caractère onirique, parce que, Héraclite *dixit*, « il y a pour les éveillés un monde unique et commun, mais chacun des endormis se détourne dans un monde particulier » (Fgt. 9, in *Fragments*, éd. Conche, Paris, 1986, p. 63). Le monde rationaliste commun se définit comme une Cité scientifique.

Cette rupture fondamentale est donc d'abord celle du sujet avec lui-même, celle de sa vie diurne avec sa vie nocturne : c'est pourquoi la formation de l'esprit scientifique passe par une psychanalyse (thème développé dans *La formation de l'esprit scientifique*, *passim*). Il faut, en effet, une psychanalyse pour libérer l'esprit asservi passivement à des fantasmes qui sont entretenus par toute une tradition née d'un contexte d'ignorance, celui de « l'expérience première » qui forme la base des connaissances communes, admises sans réflexion par tout un chacun : c'est la condition d'une pensée active, « qui a quelque chose à faire parce qu'elle est attachée à des tâches scientifiques » (*Engagement rationaliste, OC*, p. 70), et qui, pour y parvenir, doit être capable de se surveiller elle-même autant que de polémique avec autrui. C'est la condition d'un changement de culture (*Le rationalisme appliqué, OC*, p. 104-105).

Ce travail rationaliste doit répondre d'abord aux « obligations du positivisme » : rappelons que, pour être positive, une connaissance doit être *réelle* et non chimérique, *utile* et non futile, *certaine* et non incertaine, précise et non vague (A. Comte, *Discours sur l'esprit positif*, 1844). Mais le rationaliste ne doit pas s'encombrer pour autant des interdits du positivisme lorsqu'il

limitent la connaissance aux données observables, au réalisme des lois comprises comme rapports entre les phénomènes et aux intérêts de l'humanité. S'il n'y a pas pour le rationaliste d'inconnaissable absolu, le réel, néanmoins, se présente moins comme un donné que comme un obstacle à l'idée, au point que, pour la pensée, « l'objet est un échec » (*Essai sur la connaissance approchée*, OC, p. 275). Mais il est aussi une provocation à la création d'idées nouvelles en rupture avec les problématiques existantes. Toutes ces ruptures font que la seule philosophie recevable est désormais « La Philosophie du Non » (1940), caractéristique d'un nouvel esprit scientifique, celui du XX^e s. Il n'est donc plus possible de se satisfaire du modèle d'explication scientifique fourni à Auguste Comte par la gravitation newtonienne. à la fois loi, théorie et fait (*Philosophie Première*, I^{re} leçon, 1830, Paris, 1975, p. 26), en raison d'un phénoménisme qui impose à l'esprit des distinctions arbitraires issues de la passivité sensorielle en dernier ressort (*ibid.*, 33^e leçon, 1835, p. 534). C'est pourquoi la physique sera non newtonienne pour les mêmes raisons que l'épistémologie sera non cartésienne : la micro-physique est transphénoménale parce qu'elle atteint un niveau inaccessible aux sens, et la connaissance expérimentale qu'elle suppose est sans commune mesure avec une expérience vague (voir *Le Nouvel Esprit scientifique*, OC, p. 170-177, l'analyse cartésienne et moderne du morceau de cire). Purifier les matières et rectifier les connaissances vont désormais de pair pour un rationalisme appliqué.

Conjectures et vérité : Popper

Popper place le concept de falsification au cœur de la démarche scientifique : démontrer la fausseté d'une conclusion entraîne la fausseté de la théorie dont elle provient en vertu du *modus tollens* de la logique classique (*La logique de la découverte scientifique*, 1935, Paris, 1978, p. 74-75). En revanche, la vérification empirique des conséquences d'une théorie ne permet pas d'en affirmer la vérité, en vertu du principe logique qui veut que du faux, on peut conclure le vrai (*La connaissance objective*, 1972, Paris, 1991, p. 516-517). Il en résulte qu'une théorie n'est qu'une conjecture susceptible d'être testée expérimentalement, et c'est la contradiction entre conjecture et réalité qui « nous fait connaître qu'il existe une réalité » et qui exige de notre part la création de nouvelles conjectures plus fortes, c'est-à-dire, « dont le degré d'abstraction, d'universalité et de testabilité est plus élevé » (*Conjectures et réfutations*, 1972, Paris, 1985, p. 174-182), force mesurable par la résistance aux tests expérimentaux capables de les mettre en échec. Il n'est donc d'attitude rationnelle que critique (*Connaissance objective*, OC, p. 78), critique expérimentale requise par la nécessité de respecter les impératifs logiques.

Il n'existe donc pas de vérification définitive, mais seulement un progrès des connaissances qui suppose tout de même une idée de la vérité, sans laquelle le mot connaissance n'aurait pas de sens. Cette idée de la

vérité, Popper l'emprunte à Tarski : la vérité est la correspondance entre un énoncé S dans un langage-objet (naturel ou formel), traité comme un nom dans un métalangage, et la description F d'un fait dans le même métalangage. On peut donc à la fois parler de l'énoncé S et énoncer le fait F, ce qui permet de retrouver le sens ordinaire du mot vérité comme représentation du réel, et exclure les définitions qui en sont données comme cohérence du discours, ou par l'utilité pragmatique (*Connaissance objective*, OC, p. 461-467). Mais cette idée de la vérité ne peut être que régulatrice, parce qu'il n'existe pas de critère de la vérité : une description relative et limitée des faits étant donnée, la théorie qui lui correspond ne peut être que conjecturée. La meilleure théorie est alors celle qui est la plus proche de la vérité, celle dont le pouvoir prédictif est le plus grand, c'est-à-dire celle qui est la plus testable en raison de son pouvoir d'anticiper un plus grand nombre de descriptions de faits ; elle est donc susceptible d'entrer en conflit avec un plus grand nombre d'énoncés singuliers qu'elle récuse. C'est pourquoi « Il est significatif que nous appelions les lois de la nature des lois : plus elles interdisent, plus elles disent » (*Logique de la découverte scientifique*, OC, p. 38 ; voir aussi *Connaissance objective*, OC, p. 53-60).

Tout ceci permet à Popper de répondre à deux questions : celle de la démarcation entre science et non-science et celle de la nature du progrès scientifique : 1) La démarcation entre science et non-science conduit à faire de la connaissance scientifique le seul mode de connaissance rationnelle authentique. On ne peut pas concevoir de connaissance sans contenu informatif, c'est-à-dire sans une correspondance avec le réel, ce qui suppose testabilité, donc réfutation éventuelle. Une proposition irréfutable, qu'elle soit théorique (universelle) ou particulière (existentielle) ne peut être que fausse parce qu'il est toujours possible de trouver une autre proposition également irréfutable qui la contredit, sans qu'un choix puisse être objectivement justifié. C'est ce qui se passe pour les philosophies aussi bien que pour la magie et les miracles (*Conjectures et réfutations*, OC, chap. 8, p. 276-299). 2) Le progrès scientifique se marque dans le degré de testabilité des diverses conjectures et théories successives : ce sont les plus fortes qui l'emportent en raison d'une sélection darwinienne des théories (*Logique de la découverte scientifique*, OC, p. 108). Mais un caractère essentiel des théories les plus fortes est aussi de rendre raison des contenus factuels avec un degré de précision équivalent ou supérieur à celui que pouvaient atteindre les théories comparables qui les ont précédées, c'est-à-dire dont la vérisimilitude avait été confirmée : en ce sens, la théorie d'Einstein est meilleure que la théorie de Newton parce que « son contenu de vérité » est plus grand et que, de ce fait, elle est encore plus risquée.

Idee de la vérité, démarcation entre science et non-science, irréversibilité du progrès scientifique font de Popper, qui s'est déclaré aussi en faveur du rationalisme philosophique, un représentant de l'attitude

rationaliste moderne, caractéristique du mouvement scientifique. En cela, il rejoint par bien des aspects un épistémologue comme Bachelard et diffère des philosophes empiristes (par exemple de Quine, dont la dérive sceptique se manifeste dans les trois thèmes célèbres : opacité de la référence, indétermination de la référence, sous-détermination des théories) et des épistémologues relativistes (par exemple Kuhn, qui subordonne l'activité scientifique à des paradigmes placés sous la dépendance de la culture et de l'histoire, sans parler de l'assimilation entre théories scientifiques et conceptions magiques que l'on trouve chez Feyerabend). On peut tout de même se demander si son insistance sur le thème de la falsification, c'est-à-dire de la précarité intrinsèque des théories, n'ouvre pas la porte à ces formes actuelles d'irrationalisme en négligeant l'apport définitif de connaissances vraies, enregistrées par l'histoire des sciences et dont les conjectures ultérieures doivent tenir compte. En 1628, par exemple, la circulation du sang chez l'homme et la plupart des animaux était ignorée lorsque Harvey a établi la théorie de la circulation du sang (elle n'est pas visible) à partir d'observations anatomiques et d'expérimentations physiologiques exemplaires : en quoi serait-elle désormais réfutable ?

« Habemus ideam veram »

Nous n'avons pas seulement une idée de la vérité qui n'est pas si « invincible à tout le scepticisme » qu'on pourrait le croire, comme l'héritage de Popper l'a prouvé, nous avons aussi au moins une idée vraie « Habemus enim ideam veram » (Spinoza, *Réforme de l'entendement*, § 23), et même, semble-t-il, plusieurs. Ces idées sont vraies et incontournables parce qu'elles fournissent les seules représentations intelligibles possibles de la réalité et leur présence témoigne du caractère adulte auquel est parvenu le domaine scientifique auquel elles appartiennent. C'est le cas, entre autres, de l'explication donnée par Galilée (1613, 1632) pour les irrégularités cycliques dans le mouvement des taches solaires à partir de l'angle formé par l'équateur du soleil sur lequel les taches se meuvent et le plan de l'écliptique sur lequel l'observateur terrestre circule : une telle explication passe par la construction d'un « modèle de rationalité », à partir du système de Copernic et de la géométrie d'Euclide, à partir duquel le phénomène est produit comme il apparaît (voir M. Clavelin, *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris, 1968, p. 409-414). Nous trouvons ici la parfaite correspondance entre idée et idéal requise par Spinoza pour qu'il y ait vérité.

Mais, pour que l'irrégularité du mouvement des taches solaires puisse être expliquée rationnellement, il fallait d'abord l'observer, en contradiction avec le mythe qui faisait du soleil un astre pur, parce que divin. Il faut donc que la perception soit plus fiable que les croyances issues de la pensée infantile et de son réemploi à travers les diverses traditions culturelles. Or, précisément, le recours à la perception sensible comme à

l'unique source d'une connaissance vraie, et, par conséquent, comme la première condition d'une compréhension rationnelle du monde naturel, constitue la démarche fondatrice du rationalisme que l'on observe à l'aurore de la philosophie occidentale : « Chaque école a choisi, comme modèle de la connaissance vraie, l'un des aspects principaux de la perception, en essayant de la développer jusqu'à ses dernières conséquences et d'en faire sortir une vision cohérente du monde » (G. Simondon, *La perception*, cours polycopié, 1964-1965, I^{re} part., p. 2, publié in *Bulletin de psychologie*, janv. 1965, p. 566-604). C'est pourquoi l'atomisme s'est constitué d'abord comme une métaphysique de la poussière (Bachelard, *Les intuitions atomistiques*, 1933, Paris, 1975, p. 17-40). En ce sens, on peut affirmer qu'« il était normal pour un Grec d'imaginer de toutes pièces une physique ; cela représentait un progrès ; les physiques d'Aristote et d'Épicure représentaient les théories les plus rigoureuses qui fussent concevables à leur époque » (J.-F. Revel, *La cabale des dévots*, 1962, in *Bouquins*, 1997, p. 419), en soulignant aussi, comme Revel, que désormais, les connaissances testables, issues du traitement scientifique des informations perceptives, ont rendu caduques les visions du monde spéculatives produites par les philosophes.

Or le caractère fiable des informations issues du monde extérieur est une condition nécessaire de l'adaptation des êtres vivants qui possèdent un degré quelconque de sensorialité. Il est certain, par exemple, qu'à chaque fois qu'une grenouille détecte le passage d'un point noir dans son champ visuel, elle sait qu'il s'agit d'une mouche, et ceci, avec une très haute probabilité parce que son appareil perceptuel y est structuralement préadapté (voir détails in Lettvin, Maturana & McCulloch, « Pitts What the Frog's Eye tells the Frog's Brain », in McCulloch, *Embodiments of Mind*, MIT, 1970, p. 230-255). À son tour, le réalisme du sens commun représente la traduction spontanée de cette fiabilité au niveau des pratiques humaines : « Le sens commun est formé d'un ensemble de croyances, ou, pour le moins, d'habitudes, qui résistent à l'épreuve de la vie pratique et ne sont prises en défaut que dans de très rares occasions [...]. Ce qui montre qu'il n'y a pas de démarcation nette entre la science et le sens commun. L'une et l'autre comportent de la prévisibilité, sauf que celle qui résulte de la science est plus rigoureuse. En pratique, il y a un moyen de poursuivre des résultats scientifiques sans introduire le moindre changement fondamental dans le système métaphysique du sens commun » (B. Russell, *L'Analyse de la Matière*, 1927, Paris, 1965, p. 118). Il se pourrait donc que le rejet massif du réalisme, qualifié de naïf pour la constance, relève plus de la rhétorique philosophique, subrepticement idéaliste, que de l'engagement rationaliste. N'oublions pas non plus que, s'il existe des déparlements scientifiques dans lesquels la formalisation abstraite est poussée au point d'y rendre presque négligeables les données expérimentales malgré la fonction polémique décisive qu'elles y conservent, les sciences

de la vie et les sciences de la terre reposent largement sur l'analyse et la mise en ordre de ce qui a pu être observé, sans que l'on soit autorisé pour autant à récuser leur caractère de rationalité.

Rationalisme, vision et connaissance

La valeur informative des perceptions sensorielles et tout spécialement de la vision a donné lieu à des recherches, dont l'enjeu épistémologique est évident, dans le domaine des sciences cognitives, c'est-à-dire des disciplines qui étudient les processus dont proviennent les représentations mentales censées nous fournir une connaissance du monde qui nous entoure.

Nous savons depuis longtemps que le monde perçu n'est ni un décalque ni une reconstruction inconsciente du monde physique à partir de sensations liées de manière ponctuelle aux stimulations sensorielles : il existe des lois d'organisation propres à la perception elle-même (K. Koffka, *Principles of Gestalt Psychology*, Londres, 1935, chap. 2-7). En radicalisant cette observation, on pourrait alors conclure que la perception renseigne moins sur la réalité extérieure que sur les seuls processus internes par lesquels l'être vivant autonome transforme son organisation sous l'effet de perturbations dont il est radicalement incapable de distinguer l'origine, interne ou externe (F. Varela, *Autonomie et connaissance*, 1980, Paris, 1989, p. 150). C'était l'avis de Hobbes : « It is a hard matter and by many thought impossible to distinguish exactly between Sense and Dreaming » (*Leviathan*, 1651, Londres, 1949, p. 6). On peut donc en déduire que « notre expérience ne repose sur aucun fondement mais que nos interprétations proviennent de notre histoire commune d'êtres vivants et d'individus sociaux » (Varela, *ibid.*, p. 31). Il n'existerait donc de connaissance que relative et ce relativisme est si tolérant qu'il ne distingue plus entre énoncé subjectif et proposition testable, en contradiction non seulement avec la science mais encore avec la vie sociale : « I hate relativism. I think it affronts intellectual dignity » ; il est aussi « very probably false » (J. Fodor, *A theory of content and other essays*, Cambridge, MIT Press, 1992, p. XII, p. 205).

Pour que le relativisme soit faux il faut donc que la perception sensible transmette au cerveau des informations directement reconnaissables comme issues d'une réalité externe, quelle que soit l'élaboration subie, et pour cela il lui faut être indépendante des croyances que tout sujet humain se forme à partir de son histoire, du contexte culturel dans lequel il vit et même des connaissances qu'il a pu acquérir auparavant. C'est la raison pour laquelle l'esprit doit être modulaire (J. Fodor, *A theory of content*, OC, chap. 9), c'est-à-dire être sous-tendu par une architecture mentale qui repose sur des modules à la fois spécialisés et impénétrables aux représentations préexistantes (J. Fodor, *La modularité de l'esprit*, 1983, Paris, 1986). La perception visuelle, par exemple, a pour fonction de traduire des stimulations rétinienues provoquées par le réseau lumineux ambiant en indications sur un état de choses

situé à distance, sans que, dans les conditions ordinaires de l'existence au moins, on prenne constamment des vessies pour des lanternes ou ses désirs pour des réalités.

À ces modules Fodor oppose ensuite les processus ou systèmes centraux qui ne sont plus modulaires (*La modularité de l'esprit*, 4^e partie), et dont l'accès est limité au produit final des modules périphériques (*ibid.*, p. 78), qui se situe, lorsqu'il s'agit de la vision, au niveau des catégories perceptuelles fondamentales, c'est-à-dire les plus abstraites (*ibid.*, p. 123-128), à partir desquelles la connaissance pratique et la connaissance scientifique élaborent leurs systématisations divergentes, liées aux besoins auxquels elles répondent, et aux théories accessibles, qu'elles soient explicites ou implicites. Leur activité peut être décrite de la manière suivante : « Les systèmes centraux regardent ce que leur donnent les systèmes périphériques, ce qui se trouve en mémoire, et ils utilisent cette information pour restreindre le calcul des "meilleures hypothèses" sur le monde » (*ibid.*, p. 136). Ils sont ainsi responsables des découvertes et des confirmations, c'est-à-dire des opérations qui permettent l'acquisition des connaissances et qui posent des contraintes dans le domaine du concevable à partir de celui du perceptible. Sans cela, il n'y a pas de rationalisme possible.

À l'heure actuelle, il s'offre un choix métathéorique entre une attitude relativiste et une attitude rationaliste à l'égard de la connaissance en général et des connaissances scientifiques en particulier. Or il apparaît clairement que l'attitude relativiste est, en définitive, sceptique. L'attitude rationaliste s'efforce au contraire de rendre raison de la valeur de la connaissance du monde et la diversité de ses démarches montre qu'elle est loin de se figer en un quelconque dogmatisme, même lorsqu'elle soutient qu'il n'est pas possible d'affirmer n'importe quoi. Mais on constate aussi que la démarche rationaliste la plus récente tend à se retourner sur ses propres fondements en substituant la aussi une approche scientifique à la simple spéculation philosophique : si la modularité de l'esprit se présente d'abord comme une exigence épistémologique, elle s'articule aussi désormais aux recherches en neurophysiologie cognitive sur le cerveau en général et l'appareil visuel en particulier, recherches significatives qu'il est impossible d'analyser ici.

► ANDLER D. éd., *Introduction aux sciences cognitives*, Paris, 1992. — CHURCHLAND P., *A neurocomputational perspective*, Cambridge, MIT Press, 1989. — JACKENDOFF R., *Consciousness and the computational mind*, Cambridge, MIT Press, 1987. — MARR D., *Vision*, New York, 1982. — NEISSER U. éd., *Concepts and conceptual development*, Cambridge, 1987. — VIGNAUX G., *Les sciences cognitives, une introduction*, Paris, La Découverte, 1992. — ZEKI S., *A vision of the brain*, Londres, 1993.

Bernard BALAN

→ Bachelard ; Cognition et sciences cognitives ; Cognitivisme ; Piaget ; Popper ; Rationalité ; Sciences cognitives ; Théorie ; Vérification ; Vérité.

RATIONALITÉ

La rationalité est le caractère de ce qui est conforme à la raison. La question de la nature et des pouvoirs de la raison est une des questions fondamentales qui traversent toute l'histoire de la philosophie. Mais la manière dont elle se pose aujourd'hui est très largement déterminée par le développement de la science moderne. Kant distinguait l'usage théorique et l'usage pratique de la raison. Cette distinction correspond à la distinction entre l'ordre du savoir et l'ordre de l'action. Pour l'un comme pour l'autre la science est paradigmatique : à la fois comme forme de savoir et comme forme de pratique elle apparaît comme le domaine par excellence de la rationalité. À vrai dire la pensée réfléchissante ne dispose pas d'un concept *a priori* de la raison. L'idée même de raison est une idée construite et l'histoire de la pensée montre bien qu'elle l'a été à partir de pratiques, essentiellement sans doute celles de l'argumentation. C'est en tout cas par réflexion sur la forme démonstrative de l'argumentation que s'est constituée la logique et par réflexion sur la logique que s'est élaborée l'idée d'un canon de la raison, par exemple sous la forme d'une doctrine des catégories. Mais le développement de la science moderne, la pluralité des courants philosophiques, la diversification de l'idée même de philosophie, la réflexion sur les différentes formes de l'action, en particulier sur l'action politique, ont mis en évidence ce qu'on pourrait appeler le polymorphisme de la raison ainsi que son historicité intrinsèque. La raison se construit dans les pratiques en lesquelles elle se reconnaît et elle se découvre elle-même en se construisant. La science joue un grand rôle dans ce processus d'autoconstitution de la raison. Dans la forme de rationalité qu'elle met en œuvre se révèlent des traits essentiels de la raison, qui s'imposent à la réflexion comme des données particulièrement significatives. Dans le contexte de la pensée scientifique, la question de la rationalité a été abordée de façon explicite d'une part dans la problématique de la démarcation, qui relève de la métascience, et d'autre part dans la problématique de l'action rationnelle, qui relève des sciences de l'action.

En première approximation, on pourrait dire qu'une démarche rationnelle, dans l'ordre cognitif comme dans l'ordre de l'action, est une démarche qui s'accompagne de la monstration de sa validité ou de sa légitimité, conformément à des critères qui peuvent être eux-mêmes reconnus comme acceptables au regard d'une critique éventuelle. À cette indication très générale le néopositivisme, à ses débuts, dans les années 1920, a tenté de donner une forme précise dans le contexte de la question du sens. Il s'agissait de trouver un critère permettant de séparer les propositions douées d'un sens cognitif de celles qui en sont dépourvues. Ce critère devait traduire en une formule effectivement applicable une exigence fondamentale, que le néopositivisme mettait à la base de son épistémologie, à savoir l'exigence d'empiricité. Rudolf Carnap l'a formulée de façon très claire dans un principe, qu'il considère

comme une maxime prescriptive, non comme une thèse : « En tant qu'empiristes nous exigeons que le langage de la science soit restreint d'une certaine manière ; nous exigeons que des prédicats descriptifs et dès lors aussi des propositions synthétiques ne puissent être admis que s'ils ont quelque connexion avec des observations possibles. » Le principe d'empiricité exprime, aux yeux du positivisme logique, ce qui est caractéristique de la science. Il est donc aussi un principe de scientificté. L'idée directrice qui a guidé la formulation d'un critère de sens conforme à ce principe a été qu'une proposition est douée de sens si et seulement si elle est susceptible de se prêter à une procédure permettant de déterminer sa valeur de vérité. C'est cette condition qu'exprime le principe de vérifiabilité : une proposition (supposée bien formée du point de vue syntaxique) est douée de sens si et seulement si il est possible de déterminer par des tests appropriés si elle est vraie ou fausse. Il est entendu que ces tests doivent avoir un caractère empirique. On a rapidement remarqué que l'exigence de vérifiabilité est trop forte, même lorsqu'il s'agit de propositions singulières décrivant un état de choses : même dans une proposition de ce genre figurent des prédicats qui ont déjà un caractère d'universalité, de telle sorte qu'une procédure de vérification devrait en toute rigueur se prolonger indéfiniment. C'est pourquoi Carnap a proposé de remplacer la vérifiabilité par la confirmabilité : ce qu'on peut demander à une procédure empirique d'épreuve c'est d'attribuer à une proposition supposée douée de sens un certain degré de confirmation. Le critère de sens prend alors la forme du principe de confirmabilité : une proposition est douée de sens si et seulement si elle est analytique ou si elle est confirmable ou infirmable (directement ou indirectement) sur base d'observations ou de tests empiriques. Aux termes de ce critère sont reconnues comme douées de sens cognitif les propositions de la science et les propositions du langage ordinaire qui peuvent leur être assimilées, mais non les propositions « métaphysiques » (qui peuvent avoir par ailleurs un sens non cognitif, émotif par exemple). Carnap a assigné à la logique inductive (dont il a entrepris l'élaboration) la tâche de construire une théorie quantitative du degré de confirmation apporté à une proposition hypothétique par des informations empiriques déterminées. Dans cette perspective on peut formuler le critère suivant : une proposition a un caractère scientifique si et seulement si elle est analytique ou si il est logiquement possible de la confirmer ou de l'infirmar (en confirmant sa négation) par une méthode inductive. Pour le néopositivisme, l'acceptabilité d'une proposition est déterminée par des procédures canoniques susceptibles d'en garantir la validité, fût-ce seulement au sens de la confirmation. Pour Carnap ces procédures sont soit celles de la logique déductive soit celles de la logique inductive, dont les principes, selon lui, sont analytiques (ce qui a été contesté par Karl Popper). Selon ce point de vue, la rationalité scientifique — et dès lors la rationalité comme telle — est d'ordre purement logique.

Popper pose le problème de la scientificité et de la rationalité dans une perspective tout à fait différente de celle du néopositivisme. Il reproche à celui-ci d'avoir traité ce problème comme un problème de sens. Il s'agit pour lui d'un problème de démarcation. Et ce problème se pose à deux niveaux. D'une part, au niveau le plus général, il s'agit de marquer la frontière qui sépare ce qui est rationnel de ce qui ne l'est pas. Et d'autre part, à un niveau plus particulier, il s'agit de marquer, à l'intérieur du domaine du rationnel, la frontière entre ce qui est scientifique et ce qui est « métaphysique ». Le critère absolument déterminant pour Popper est celui de la falsifiabilité : une proposition a un caractère rationnel si elle peut être soumise à des épreuves susceptibles d'en montrer la fausseté. Ce qui justifie ce critère c'est la non-symétrie, dans un schéma déductif, entre le vrai et le faux, exprimée par les adages classiques « Du vrai suit le vrai » et « Du faux suit n'importe quoi ». Il s'ensuit que si on est assuré de la vérité des conclusions on ne peut rien dire de la valeur de vérité des prémisses, mais que, en revanche, si on sait qu'une conclusion est fautive, on est assuré que les prémisses le sont aussi. Par conséquent, du point de vue du progrès de la connaissance, une stratégie de confirmation ne nous apprend rien de décisif, alors qu'une stratégie de falsification, qui cherche à imaginer des épreuves susceptibles de montrer la fausseté d'une proposition tirée par déduction de l'hypothèse que l'on veut tester, peut faire apparaître la fausseté de cette hypothèse et contraindre les chercheurs à inventer une nouvelle hypothèse, qui sera une meilleure approximation par rapport à la vérité. Popper propose trois arguments pour montrer qu'il y a des propositions non falsifiables, auxquelles cependant on peut parfaitement reconnaître un sens, ce qui implique que les critères de sens ne sont pas des critères adéquats de démarcation. (Certaines propositions métaphysiques non falsifiables ont joué un rôle dans la genèse de certaines théories scientifiques. Certaines propositions qui ont eu à un moment donné un caractère scientifique et avaient alors un sens ont été falsifiées et ont cependant continué à être acceptées : elles gardent le sens qu'elles avaient avant d'être réfutées. Enfin, argument logique : on peut toujours exprimer une proposition universelle, supposée douée de sens, sous la forme d'une existentielle négative, laquelle est donc aussi douée de sens, et la négation de cette dernière proposition l'est également. Or cette négation sera une existentielle pure, non éprouvable car ne contenant aucune indication spatio-temporelle précise.)

Le critère général de falsifiabilité, qui caractérise le domaine du rationnel, se spécifie selon les disciplines. Dans le domaine des mathématiques et de la logique, la falsification prend la forme de la réfutation purement logique. Dans le domaine des sciences empiriques, elle est soumise à la condition d'être fondée sur des tests empiriques. Dans le domaine du rationnel non scientifique (que l'on pourrait qualifier de « spéculatif ») elle prend la forme de la réfutation par argumentation (consistant par exemple en la mise en

évidence d'une contradiction logique ou d'une contradiction pragmatique ou d'une contradiction avec des propositions solidement établies ou avec des faits, entendus au sens de « ce qui se montre » mais non descriptibles adéquatement dans le langage de la science).

Conformément à son principe général de falsifiabilité, Popper a proposé, comme mesure de l'acceptabilité d'une proposition scientifique, son degré de corroboration : c'est la mesure dans laquelle cette proposition a résisté à des tests nombreux et suffisamment sévères susceptibles de la falsifier. Mais les procédures de falsification doivent bien prendre appui sur des propositions exprimant de façon directe les résultats des tests mis en œuvre : Popper les appelle les propositions de base. Ces propositions elles-mêmes, pour être recevables, doivent être falsifiables. Elles doivent donc être examinées critiquement, mais cet examen devra bien en définitive se fonder sur leur seul contenu interne : s'il fallait, pour les éprouver, avoir recours à d'autres propositions encore, on serait pris dans un *regressus ad infinitum*. Ce qui peut donner une certaine garantie à l'acceptation d'une proposition de base c'est l'accord des experts. On rejoint ici la théorie de l'argumentation et on introduit par là des conditions de nature pragmatique (au sens de la théorie du langage). Ainsi le critère de rationalité poppérien, qui se ramène en définitive à un principe de criticisme, n'est pas totalement objectivable, au sens où il pourrait fournir un critère de décision utilisable de façon effective par une machine. C'est que, dans la mise en jeu d'un critère, c'est la raison qui se juge elle-même, et en même temps qu'elle tente de se rendre claire à elle-même, elle s'échappe partiellement à elle-même. Il y a, dans son autocompréhension, un élément d'appréciation qui demeure irréductible.

Cet élément d'appréciation se retrouve plus manifestement encore dans le domaine de l'action. Il convient de distinguer ici ce qui relève de l'analyse des différentes espèces de pratiques et ce qui relève de la qualification éthique de l'action. (Le concept kantien de « raison pratique » visait en fait la dimension éthique de l'action.) Du point de vue de l'analyse des pratiques, on peut distinguer trois dimensions de l'action, dont chacune met en jeu un critère spécifique de rationalité : la dimension instrumentale (au sens de Habermas), la dimension stratégique et la dimension de la décision. La dimension instrumentale est celle que met en jeu la technique : elle concerne l'adaptation des moyens à des fins préalablement fixées. Le critère de rationalité est ici l'efficacité. Ce critère peut être éventuellement précisé sur la base des connaissances scientifiques disponibles dans le domaine concerné. Il peut aussi faire intervenir le coût (au sens le plus général) des moyens envisagés. Du point de vue formel, on a alors affaire à un problème d'optimisation. La dimension stratégique met en jeu la détermination des plans d'action en fonction des autres acteurs et des hypothèses relatives à leurs propres plans d'action. Le critère est aussi l'efficacité, mais relativement à des contextes d'interaction. Du point de vue formel, on a

affaire ici au type de problème dont traite la théorie des jeux. Quant à la dimension de décision, elle met en jeu le choix d'un type d'action relativement à des fins multiples en fonction d'un contexte partiellement incertain. Le critère est l'optimalité relativement à des « utilités » supposées déterminables. Du point de vue formel, on a affaire ici au type de problème dont traite la théorie économique de la décision. Le schéma de base des modélisations classiques prend la forme d'une règle d'action qui recommande de maximiser l'espérance mathématique de l'utilité (somme des produits obtenus en multipliant l'utilité attachée à chacun des résultats possibles des différentes actions envisagées par la probabilité d'occurrence de ce résultat, compte tenu des facteurs non maîtrisables qui codéterminent ce résultat). Ce qu'on tente de mettre ainsi en évidence c'est en somme une condition de cohérence, entre des jugements d'utilité, ou des préférences, et les décisions.

La question de la raison éthique est d'une tout autre nature. Le critère de rationalité des maximes en lesquelles s'exprime la conscience éthique est classiquement celui de la possibilité d'universalisation. On peut facilement montrer qu'un tel critère implique un principe de criticisme, comme dans l'ordre cognitif. Mais alors que, dans l'ordre cognitif, la critique est ordonnée en définitive à une visée de vérité (exprimée dans le contexte poppérien par le concept de vérisimilitude), dans l'ordre éthique elle est ordonnée à une visée qu'exprime le concept classique de « bien » ou le concept kantien de « la cité des fins ». Ce qui est alors en jeu ce n'est pas la validité d'une proposition mais la légitimité d'une norme. Cette légitimité se juge par rapport à ce qui est appréhendé dans la visée. Ici aussi, en s'imposant des critères, la raison se juge elle-même et dans ce jugement il y a un élément irréductible d'appréciation, auquel renvoie le concept aristotélien de la prudence, dans lequel se retrouve ce moment pragmatique qui apparaît déjà dans l'ordre cognitif.

► APEL K.-O., « Types of rationality today : the continuum of reason between science and ethics », in GERAETS T.F., 1979 (op. cit. ci-dessous), p. 307-340. — BARTLEY W.W. III, « Theories of demarcation between science and metaphysics », in LAKATOS I. & MUSGRAVE A., 1968 (op. cit. ci-dessous), p. 40-64. — BETH E.W., *Science a Road to Wisdom*, Dordrecht, Holland, D. Reidel, 1968. — COHEN L.J., *The Dialogue of Reason*, Oxford, Univ. Press, 1986. — DUPUY J.-P. & LIVET P. éd., *Les limites de la rationalité. 1 : Rationalité éthique et cognitive*, Paris, La Découverte « Recherches », 1997. — EELLS E. & MARUSZEWSKI T. éd., *Probability and Rationality : Studies on Jonathan Cohen's philosophy of science*, Amsterdam/Atlanta (GA), Rodopi « Poznań Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities », vol. 21, 1991. — GERAETS T.F. éd., *Rationality To-day. La rationalité aujourd'hui*, Ottawa, Éd. de l'Univ. d'Ottawa, Univ. of Ottawa Press, 1979. — HABERMAS J., « Aspects of the Rationality of Action », in GERAETS T.F., 1979, op. cit., p. 185-205. — KAHNEMAN D., SLOVIC P. & TVERSKY A. éd., *Judgment under Uncertainty : Heuristics and Biases*, Cambridge, Univ. Press, 1982. — LAKATOS I. & MUSGRAVE A. éd., *Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science*, Londres, 1965, vol. 3, Amsterdam, North-Holland, 1968. — POPPER K., *Logik*

der Forschung : Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft, Vienne, Julius Springer « Schriften zur wissenschaftlichen Weltanschauung », vol. 9, 1934, 4^e éd. Tübingen, J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), 1971 ; *The Logic of Scientific Discovery*, Londres, Hutchinson & Co. et New York, Basic Books, 1959 (version angl. de l'ouvrage précédent considérablement augmentée), 3^e éd., Londres, Hutchinson & Co., 1972 (trad. fr. N. Thyssen-Rutten & P. Devaux, *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot « Bibliothèque Scientifique », 1973) ; *Conjectures and Refutations : The Growth of Scientific Knowledge*, Londres, Routledge & Kegan Paul, et New York, Basic Books, 1963, 4^e éd., Londres, Routledge & Kegan Paul, 1972. — REYNAUD B. éd., *Les limites de la rationalité. 2 : Les figures du collectif*, Paris, La Découverte « Recherches », 1997. — SAVAGE L.J., *The Foundations of Statistics*, New York, Wiley, 1954. — SCHILPP P.A. éd., *The Philosophy of Rudolf Carnap*, La Salle (Ill.), Open Court/Londres, Cambridge Univ. Press « The Library of Living Philosophers », vol. XI, 1963. — SCHILPP P.A. éd., *The Philosophy of Karl Popper*, 2 vol., La Salle (Ill.), Open Court « The Library of Living Philosophers », vol. XIV, 1974. — SWAIN M., *Induction, Acceptance and Rational Belief*, Dordrecht (Hollande), D. Reidel, 1970. — VUILLEMIN J., « La raison au regard de l'institution et du développement scientifiques », in GERAETS T.F., 1979, op. cit., p. 67-80.

Jean LADRIÈRE

→ Cercle de Vienne ; Criticisme ; Induction ; Positivism ; Vérification.

RÂZÎ, 854 7-925 ?

Médecin et philosophe arabe. Abû Bakr Mohammed Ibn Zakariyya est connu dans le monde latin sous le nom de Rhazes. Ses dates de naissance et de mort sont incertaines. Né à Rayy, il y a exercé la médecine ainsi qu'à Bagdad. La plupart de ses écrits sont perdus. Il est connu pour ses attaques contre la religion qui engendrent selon lui des guerres continues. Opposé à la physique aristotélicienne, il affirma la réalité du vide et l'existence aussi bien d'un espace infini et absolu indépendant des corps que d'un espace relatif, limité par l'extension des corps. Proche de l'atomisme de Démocrite, il s'oppose à l'atomisme des théologiens musulmans qui avaient défendu une conception discontinuiste de la matière afin de justifier les livres décrets de la création divine.

Dans son ouvrage *Doutes concernant Galien*, Râzî rapporte des expériences cliniques et dénombre des maladies inconnues de Galien et n'hésite pas à considérer comme erronés les diagnostics de celui-ci sur les ulcères d'estomac. Il est connu, dans l'histoire de l'épidémiologie, pour ses descriptions des symptômes de la variole et de la rougeole. Très au fait de la médecine grecque, il accompagne son grand ouvrage *Al Hawi* d'une liste de synonymes. Concernant la théorie de la vision, il s'éloigne de Galien : ce n'est pas, comme l'a cru Galien, une pression interne qui explique la dilatation de la pupille, mais une interaction avec la lumière externe ; selon la quantité de lumière disponible à l'œil, la pupille rétrécit ou augmente. En alchimie, il procéda à la classification des minéraux en volatils purs,

métalliques purs, substances composées ; avec lui commence l'ère de l'expérimentation répétée, en rupture avec l'alchimie dominée par la mystique des nombres.

• *Biruni, Risala fi Fihrist Kutub Mohammed Ibn Zakariyya al Razi*, éd. P. Kraus, Paris, 1936 ; *Abi Bakr, Mohammadi Zachariae Ragensis (Razis) Opera philosophica, Fragmenta quae supersunt*, éd. P. Kraus, Le Caire, Pars Prior, 1939. — *Kitab al Mansuri (liber ad Al Mansorem)*. — *Al Hawi (Continens)*, Hyderabad, 1955-1968. — *Kitab al-Shukuk 'ala Jalinus (Livre des doutes concernant Galien)*.

► BAR-ASHER M.M., « Quelques aspects de l'éthique d'Abu Bakr Al-Razi et ses origines dans l'œuvre de Galien », *Studia Islamica*, vol. LXIX, 1989. — GOODMAN L.E., « The epicurean ethic of Al Razi », *Studia Islamica*, 1971. — MENSIA M., *Abu Bakr ou la raison sans limite*, in Benmakhlouf A. dir., *La raison et la question des limites*, Casablanca, Le Fennec, 1997, p. 15-36. — MEYERHOF M., « Thirty three Clinical observations by Al Razi », *Isis*, 23, 1933, p. 322 sq. ; *Kitab at tibt al ruhani*, in *Lettres philosophiques*, Le Caire, 1939. — MOHAGHEGH M., « Notes on the "Spiritual physic" of Al-Razi », *Studia Islamica*, vol. XXVI, 1967, 8 sq. — PINES S., « Razi critique de Galien », in *Actes du 7^e congrès international d'histoire des sciences*, Jérusalem/Paris, 1955, p. 480-487 (rééd. in *The collected Works of Schlomo Pines, Studies in Arabic Versions of Greek Texts and in mediaeval Science*, t. II, Jérusalem/Leyde, 1986, p. 256-263).

Ali BENMAKHOULF

→ Alchimie ; Vision.

RÉALISME

Problèmes de définition

Le terme « réalisme » a des sens si variés en philosophie qu'on peut s'attendre à ce qu'il en soit de même en philosophie des sciences. Au sens traditionnel, celui de la scolastique, le réalisme est une doctrine métaphysique qui affirme l'existence des entités abstraites et des universaux, et s'oppose au nominalisme, qui nie l'existence de ces entités, ou les réduit à des constructions verbales, pour accorder une existence seulement aux individus. Dans la philosophie moderne, le réalisme porte sur l'existence d'une réalité extérieure à l'esprit, et s'oppose à l'idéalisme, qui nie l'existence d'une telle réalité indépendante, et qui prend souvent une forme réductionniste ou phénoméniste, selon laquelle notre connaissance ordinaire des objets du monde extérieur peut être réduite à des structures de sensations ou de phénomènes perçus. En logique et en sémantique, le réalisme est la thèse selon laquelle une proposition est vraie ou fausse indépendamment des moyens que nous avons, ou pourrions avoir, de la vérifier, et s'oppose à ce que Dummett appelle l'antiréalisme, selon lequel la vérité d'une proposition dépend de sa vérifiabilité en pratique ou en principe. Ces sens ne sont pas équivalents, puisque le nominalisme admet l'existence d'une réalité extérieure (mais composée seulement d'individus), et que l'antiréalisme

l'admet aussi (puisque notre vérification peut s'exercer sur un monde indépendant de nous). Mais si l'on réunit ces trois critères, le réalisme, relativement à un corps de connaissance quelconque, peut être résumé comme la conjonction de deux thèses : (a) une thèse d'indépendance : nos jugements sont vrais en vertu de l'existence d'un monde indépendant de notre connaissance ; (b) une thèse relative à la connaissance : nous pouvons savoir si ces jugements sont vrais. Ainsi conçu, le réalisme est soumis à une tension caractéristique : si le monde est indépendant de notre connaissance, comment pouvons-nous réellement le connaître ? Un réalisme radical sera confronté directement à cette tension, mais un réalisme modéré essaiera de rendre compatibles (a) et (b), par exemple en défendant une forme d'idéalisme « transcendantal », au sens de Kant, par opposition au réalisme « empirique ». Inversement l'idéalisme rejettera (a) (et n'acceptera (b) que si la vérité de nos énoncés n'est pas indépendante de notre vérification), et les sceptiques rejetteront à la fois (a) et (b).

En philosophie des sciences, on retrouve approximativement ces divisions. Le réalisme scientifique est d'abord une thèse affirmant l'existence des entités postulées par les théories scientifiques (par exemple les atomes, les molécules, ou les électrons), qu'on appelle souvent réalisme théorique. Il s'oppose à l'instrumentalisme selon lequel nos théories scientifiques ne sont que des moyens calculatoires permettant de prédire des observations, et selon lequel les termes « théoriques » qui figurent dans nos explications peuvent être réduits à des termes observables. En ce sens, l'instrumentalisme est, comme le phénoménisme, un réductionnisme, dont l'expression la plus traditionnelle se trouve dans la tradition antique selon laquelle la science ne peut que « sauver les phénomènes » (Duhem, 1912), reprise par Ossiander dans sa préface au *De Revolutionibus* de Copernic, par Bellarmin contre Galilée, par Berkeley dans ses arguments contre les newtoniens, puis incarnée, sous sa forme contemporaine, par le positivisme de Mach et de ses successeurs positivistes logiques, pour qui la science ne vise qu'à produire des théories empiriquement adéquates, par une mise en ordre économique des faits (cf. aussi Duhem, 1906, et pour une version contemporaine sophistiquée, Van Fraassen, 1981). Cet instrumentalisme ne nie pas nécessairement l'existence du monde expliqué par les théories scientifiques, ni la vérité de celles-ci. Mais il soutient, avec les formes traditionnelles d'idéalisme, qu'il n'y a pas de monde « au-delà » de nos théories, et que celles-ci sont vraies seulement parce que nous les acceptons et avons des critères empiriques pour le faire. Un réalisme radical, au contraire, admet que toutes nos théories pourraient en principe être fausses. C'est pourquoi des auteurs comme Popper associent souvent leur réalisme scientifique à un faillibilisme quant aux théories scientifiques, qui permet, selon eux, de distinguer la science de la non-science : seules les théories de la première sont réfutables en principe. La tension évoquée plus haut cependant ressurgit ici, car

l'histoire des sciences semble montrer que des théories jugées vraies à une époque se sont en général révélées fausses, ce qui peut, loin de confirmer le réalisme, induire au relativisme, qui est une forme de scepticisme. Une autre version de la tension interne au réalisme se retrouverait dans le constat suivant : plus la science progresse, plus elle semble s'éloigner de la description du monde du sens commun, et de son « image manifeste » (Sellars), et par conséquent elle semble nous amener à rejeter le réalisme naïf, qui croit qu'il y a des tables, des chaises, et des objets matériels ordinaires. Comment, dans ces conditions, réconcilier l'attitude réaliste « naturelle » avec le réalisme sophistiqué et complexe appelé par le progrès scientifique ? Enfin, les mêmes problèmes se posent au sujet des types de connaissance qui ne sont pas, comme celles des sciences de la nature, empiriques, celles de la logique et des mathématiques. Au réalisme traditionnel s'associe en philosophie des mathématiques la thèse « platoniste » selon laquelle les objets mathématiques (par exemple les nombres ou les ensembles) existent réellement, dans un univers non sensible, et ont une existence indépendante des procédures de démonstration ; ce que nie le nominalisme, selon lequel tous les énoncés mathématiques peuvent être redécrits sans faire appel à des entités abstraites ; le constructivisme soutient que l'existence de ces entités est relative à nos procédures de preuve. Mais si le réalisme mathématique est correct, comment peut-on admettre la vérité de propositions mathématiques qu'on est incapable de démontrer ?

Les antinomies du réalisme

La controverse classique entre le réalisme scientifique (RS) et l'instrumentalisme (I) peut être présentée sous la forme d'une série d'antinomies, qu'on peut formuler à la manière kantienne, par un tableau :

THÈSE R

1) Les faits observables fournissent des données confirmant indirectement l'existence d'entités non observables et nos théories décrivent cette réalité non observable.

2) Les entités théoriques postulées par les sciences sont indispensables à nos explications et indéterminables.

3) Le succès de nos théories scientifiques (en particulier dans leurs prédictions) ne peut s'expliquer que parce qu'elles sont vraies.

ANTITHÈSE I

1a) Les faits observables ne permettent pas d'inférer l'existence d'entités inobservables et nos théories ne sont que des instruments pour nos prédictions.

2a) Les entités théoriques peuvent être réduites et éliminées au profit de constructions renvoyant à des observations.

3a) Nos théories scientifiques peuvent réussir dans leurs prédictions sans être pour autant vraies d'un monde indépendant.

Ces antithèses semblent irréductibles parce qu'à chaque avancée « réaliste » de la science il semble y avoir une parade instrumentaliste possible. Par exemple la philosophie naturelle du XVIII^e s. distingue les qualités secondes des objets, relatives à notre esprit, des qualités premières, comme l'étendue, la forme ou

la solidité, seules « réelles » ; mais les arguments berkeleyens contestent cette distinction et mettent en doute la connaissabilité des qualités premières. La théorie cantorienne des ensembles semble conforter nos intuitions réalistes en mathématiques, mais diverses constructions logicistes semblent permettre une analyse des ensembles en termes plus primitifs et moins « coûteux » ontologiquement. L'atomisme en physique semble l'emporter au début du XX^e s., mais la théorie des quanta et l'interprétation de Copenhague prétend réduire nos intuitions réalistes en ce domaine.

Quand on considère les arguments des deux camps, on trouve le même mouvement de balancier. La stratégie usuelle du réaliste consiste à soutenir qu'il y a certains traits tenaces de la pratique scientifique qui semblent échapper à une contre-attaque instrumentaliste. Les réalistes ont invoqué trois sortes de traits. Le premier est le fait que la science tend à l'unification de ses théories. Par exemple la théorie cinétique des gaz explique leurs variations en volume, en pression, ou en température par le mouvement de particules, et semble devoir s'accorder avec la théorie atomiste de la matière. Si les théories n'étaient que des techniques de calcul commodes et non pas des descriptions vraies de la réalité, comment de telles unifications seraient-elles possibles ? Le second trait est le caractère explicatif des théories : comment une théorie peut-elle réellement expliquer des phénomènes si les entités qu'elle postule n'existent pas ? Le troisième est l'existence de prédictions nouvelles (comme la courbure de la lumière près du soleil, prédite par la théorie générale de la relativité, et confirmée par Eddington après observation d'une éclipse en 1919), qui, selon le réaliste, serait impossible si les théories n'étaient pas vraies. Mais l'instrumentaliste peut répondre au premier argument que l'unification des théories est motivée par la recherche d'un instrument unique, ou qu'il n'y a pas d'unification de ce genre, la science n'étant qu'un ensemble de recettes et de techniques qui « marchent » sans théorie générale (Cartwright) ; au second argument, il peut répondre que le but de la science n'est pas l'explication, mais seulement la prédiction ; au troisième argument, il peut répondre que la pratique des prédictions scientifiques n'engendre pas plus de prédictions vraies que des conjectures faites au hasard, ou, de façon moins radicale, que la structure de prédictions nouvelles produites par la science ne prouve pas que ces structures répondent à des causes sous-jacentes cachées.

Mais les arguments instrumentalistes ne sont pas tous de l'espèce défensive. L'argument positif le plus fort contre le réalisme est celui que l'on a coutume d'appeler, depuis Quine (1960), l'argument de la « sous-détermination des théories par les données empiriques » : étant donné une théorie quelconque au sujet d'entités inobservables, qui rend compte des données empiriques, il y aura toujours d'autres théories incompatibles rendant compte des mêmes données. Deux voies mènent à cette thèse. La première, formulée clairement par Duhem et reprise par Quine (d'où

son nom de « thèse Duhem-Quine », consiste à dire qu'une théorie n'est jamais infirmée par une observation unique (il n'y a pas d'expériences cruciales), mais par des observations en conjonction avec des hypothèses auxiliaires. En d'autres termes, une expérience seule ne teste jamais une théorie, toute théorie peut être de manière cohérente maintenue contre des données contraires, et par conséquent toute théorie est sous-déterminée par les données supposées la confirmer. Comme le dit Quine, la science rencontre le tribunal de l'expérience de manière globale, et non pas locale. C'est le principe de ce que l'on appelle souvent le « holisme » épistémologique. L'autre voie a été formulée par Poincaré : soit T une théorie complète sur la réalité physique, et qui a des conséquences observationnelles ; on peut toujours construire une théorie T' plus complexe postulant des mécanismes non observables, mais qui a les mêmes conséquences observationnelles. Mais même s'il y a de bonnes raisons d'admettre la thèse de sous-détermination et la thèse Duhem-Quine, il faut noter qu'elles ne réfutent pas le réalisme. Car tout ce qu'elles montrent est qu'une théorie au sujet d'inobservables s'accordera avec n'importe quel ensemble de données observables. Cela ne montre en rien que les théories rivales en question s'accorderont aussi bien les unes que les autres avec les données, ni que, parmi les alternatives, l'une d'elles ne sera pas plus plausible que les autres : quelqu'un qui croit que la terre est plate peut toujours adapter sa thèse de manière à la rendre compatible avec les données astronomiques, géographiques, etc., sans que cela implique qu'on doive le prendre au sérieux. De plus la thèse de la sous-détermination suppose qu'une théorie est confirmée par les données si elle implique, déductivement, ces données (selon la conception hypothético-déductive). Mais on peut aussi admettre l'existence de validations inductives, et soutenir que seul un nombre limité d'inférences inductives permettent de conclure à des généralisations à partir de données, en sorte que, là aussi, on n'est pas obligé de tenir compte de toutes les données confirmant une théorie pour accepter sa vérité (l'induction procède par élimination plutôt que par énumération dans le choix de théories).

Un autre argument influent contre le réalisme, déjà mentionné, est que la plupart des théories scientifiques se sont révélées fausses au cours de l'histoire, en sorte que nos théories présentes pourraient subir le même sort. Mais ici aussi, il faut distinguer différents degrés d'exposition des théories à la fausseté. Les théories cosmologiques, la physique des particules ou les hypothèses paléontologiques ont plus de chances de se révéler fausses que la théorie de la composition chimique des molécules, parce que nous disposons de moins de données sur l'évolution des primates que sur la composition chimique de l'eau, par exemple. En ce sens, on peut soutenir que le réalisme est plus assuré dans certains domaines que dans d'autres. Mais ce n'est pas pour autant une bonne nouvelle pour ses défenseurs, car le fait que notre physique fondamentale actuelle puisse devenir fautive est certainement plus

menaçant que le fait que nous n'ayons apparemment plus grand-chose à découvrir, et donc à infirmer, sur la structure moléculaire de l'eau. Quoi qu'il en soit, l'idée que nos théories scientifiques puissent n'être qu'approximativement vraies ou fausses, ou vraies selon les domaines, revient, pour le réaliste, à faire une concession de taille par rapport à la version forte de cette thèse, selon laquelle nos théories pourraient être fausses sans que nous le sachions.

On retrouverait les mêmes antinomies en philosophie des mathématiques. L'option « réaliste » y est couramment incarnée par le platonisme, selon lequel les nombres, les ensembles ou les classes sont des entités réelles, existant indépendamment de nos démonstrations ; et l'option instrumentaliste y est incarnée par le constructivisme et diverses variétés d'intuitionnisme, selon lesquels ces entités n'existent que si l'esprit, ou nos pratiques de preuves, permettent de les construire. L'introduction de la théorie des ensembles par Cantor sembla consacrer une victoire du platonisme, mais des doutes s'introduisirent quant à la signification de sa hiérarchie d'ensembles infinis dans la mesure où elle dépassait de loin le contenu de la théorie des nombres requis par Kronecker et d'autres, et quant à la non-contradiction logique de cette construction. Le programme de Hilbert en métamathématique est, en ce sens, une tentative ambitieuse pour montrer que l'on peut assurer cette cohérence en utilisant les moyens les plus sûrs (finistes et constructivistes). Le théorème de Gödel en 1931 bloqua certainement ce programme, en montrant que cette preuve de non-contradiction ne peut s'obtenir. Mais l'idée de Hilbert, selon laquelle les arguments métathéoriques doivent satisfaire des requisites plus stricts que ceux que la théorie elle-même impose, reste correcte. En d'autres termes, même si le « paradis de Cantor » se trouvait en dernière instance justifié, on ne devrait pas pour autant renoncer aux critères les plus usuels de preuves finitistes. Et en ce sens, malgré le théorème de Gödel selon lequel certaines propositions sont indémonstrables mais vraies, ce qui sanctionne l'intuition réaliste, les constructions mathématiques demeurent encore relatives à nos démonstrations, ce qui sanctionne l'intuition « anti-réaliste ».

Non seulement ces arguments en faveur de l'une ou l'autre position ne sont pas concluants, mais ils peuvent conduire à les renvoyer dos à dos, comme on peut le voir quand on considère certaines versions sémantiques de ces thèses. L'une des croyances les plus enracinées du réaliste scientifique est que les termes de nos théories ont une référence déterminée à des entités réelles, transcendant les cadres théoriques dans lesquels ces termes sont employés. Or l'idée, largement admise depuis Bachelard et Kuhn, selon laquelle la référence des termes des théories scientifiques varie selon les contextes théoriques (ou les « paradigmes ») auxquels ils appartiennent, conduit à douter du caractère transthéorique de ces termes, et invite par conséquent à une forme de relativisme ou de constructivisme, que l'on retrouve souvent aujourd'hui, notamment dans les

travaux de sociologie de la connaissance scientifique qui insistent sur le fait que la science est le produit de divers facteurs sociaux, politiques, techniques, etc., qui influent tous sur la construction des théories, et par là sur le caractère lui-même construit du réel qu'elles sont supposées décrire. Mais l'argument fondé sur la traductibilité ou l'intraductibilité des termes d'une théorie à une autre se heurte à une difficulté de taille, qui est une conséquence de la thèse de la sous-détermination ou de la thèse Duhem-Quine. Quine a montré que cette dernière thèse conduit à l'idée que la signification d'un énoncé et sa référence sont toujours sous-déterminées par l'ensemble des comportements observables qui lui sont associés, au sens où deux assignations incompatibles de signification à une même phrase mais compatibles avec un même ensemble d'observations sont toujours possibles, et donc qu'on peut toujours trouver deux traductions incompatibles de phrases de deux langages distincts mais néanmoins correctes. Cette thèse d'indétermination de la traduction conduit à douter qu'on puisse défendre le réalisme ou la thèse opposée à partir de la notion de traduction, comme le faisait l'argument relativiste. Elle mine également l'un des arguments majeurs de l'empirisme contemporain. En effet selon la reconstruction du « langage de la science » formulée par les positivistes logiques, ce dernier pourrait être divisé en deux sous-langages, l'un « théorique » (contenant des termes désignant des entités inobservables), l'autre « observationnel » (contenant des termes désignant des observables seulement), et le premier pourrait être réduit au second. Cela suppose que l'on puisse établir la synonymie des termes des deux langages. Mais l'indétermination de la signification ruine ce projet réductionniste du positivisme logique et l'instrumentalisme qui l'anime. Et si la référence comme la signification sont indéterminées, pourquoi devrions-nous nous attendre à ce que l'ontologie, c'est-à-dire le domaine d'entités postulées par une théorie scientifique, le soit ?

Une troisième voie ?

Si l'on veut échapper au scepticisme auquel ce genre d'argument semble conduire, il ne reste apparemment que deux voies possibles. L'une d'elles est une variante de la thèse kantienne de l'idéalisme transcendantal : la « réalité » existe, mais nous ne pouvons pas y avoir accès en dehors de nos constructions scientifiques et de nos théories, et par conséquent il ne peut pas y avoir de réel « transcendant » par rapport à la pensée. Peirce propose une version de cette thèse quand il soutient que nos théories scientifiques sont vraies « à la limite de l'enquête », c'est-à-dire dans un stade ultime (peut-être inatteignable, mais idéal) de la recherche scientifique. Putnam a défendu une idée voisine avec ce qu'il appelle un « réalisme interne » selon lequel la vérité de nos théories ne transcende pas la connaissance que nous en avons, bien que ces théories portent sur un monde objectif. Et c'est peut-être la même position qu'exprimait Einstein quand il disait : « Le vrai

problème est que [...] la physique décrit la "réalité", mais nous ne savons pas ce qu'est la réalité » (Einstein, 1935). Cette position accepte la thèse (b) du réalisme ci-dessus, selon laquelle nous pouvons connaître la vérité, mais conduit à nier la thèse (a) d'indépendance. En ce sens, on ne voit pas ce qui la distingue, en dernière instance, de l'idéalisme, ni comment elle peut échapper aux difficultés classiques de la notion de « chose en soi », ou plus simplement au fait que la « fin ultime de l'enquête scientifique » est quelque chose dont nous n'avons pas la moindre idée. La seconde voie, qui n'est pas nécessairement incompatible avec la première, consiste à évacuer toute référence, même idéale, à une réalité « transcendantale » ou « externe » par rapport à l'enquête scientifique, et à admettre qu'il y a un ensemble de truismes à propos de la science qui sont communs à la fois au réalisme et aux diverses variétés d'instrumentalisme ou d'antiréalisme, dont le principal est que les théories bien confirmées devraient être acceptées comme vraies. Selon ce réalisme « minimal », qu'A. Fine a appelé « l'attitude ontologique naturelle », on s'interdit de postuler aucune thèse métaphysique « profonde » quant à la vérité et à la réalité, et on se contente d'employer les concepts de vérité et de réalité dans leur sens le plus usuel.

Cette attitude neutraliste ou déflationniste est certainement conforme à la pratique globale et la plus usuelle des scientifiques. Elle s'interdit aussi bien de voir dans les progrès de la science une montée progressive vers une vérité ultime que de conclure que cette vérité se réduit à l'adéquation empirique régulière de théories qui seraient à jamais soustraites à toute confrontation à une réalité externe. Elle peut adopter une attitude ouverte par rapport aux changements de « paradigmes », et examiner si ces changements sont de véritables changements dans la référence des termes, ou s'ils sont compatibles avec leur stabilité référentielle. Enfin, elle nous laisse libres d'interpréter les efforts d'unification des scientifiques comme des marques de la simplicité des voies de la nature ou comme des marques de la simplicité « économique » de nos instruments théoriques pour la connaître, ou les succès de la science comme des réussites dans l'explication ou dans la prédiction. En philosophie des mathématiques également, on peut trouver une version de cette thèse, chez Quine et Putnam notamment, quand ils défendent les entités abstraites en mathématique en raison de leur indispensabilité.

La réalisme et la pratique scientifique

Une fois décrites ces diverses options possibles par rapport au problème métathéorique du réalisme, il resterait à voir si, de l'intérieur même de la pratique scientifique, on peut les retrouver effectivement. À cet égard, la controverse, depuis le début de ce siècle, sur les fondements de la mécanique quantique revêt un caractère exemplaire, dans la mesure où l'on ne voit pas quelle autre discipline peut avoir plus un titre à décrire la réalité fondamentale que la physique (et en ce

sens le réalisme scientifique prend souvent la forme d'un physicalisme, qui entend réduire toutes les sciences à la physique). L'interprétation de Copenhague paraît sanctionner le non-réalisme et l'idée que le réel est nécessairement relatif à nos mesures, à nos observations et à nos interprétations, alors que les diverses théories des variables cachées semblent militer en faveur d'une position réaliste. La difficulté ici, qu'on a à reconnaître dans les résultats des physiciens quantiques (comme les inégalités de Bell) des arguments en faveur de l'une ou l'autre position, tient au fait que la « réalité quantique », telle qu'ils la décrivent, est si profondément éloignée des catégories de la pensée usuelle : peut-on encore y parler d'« objets », de « propriétés », d'« états », ou de « relations » au sens usuel que nous donnons à ces notions (Bitbol, 1996), et en ce sens la controverse réalisme/instrumentalisme y a-t-elle encore un sens ? Mais on retrouverait aussi une version de la voie neutraliste décrite ci-dessus – à moins qu'elle ne corresponde à une forme renouvelée de kantisme – dans la thèse de certains physiciens, comme d'Espagnat (1994), d'un « réel voilé », selon laquelle bien que la mécanique quantique sanctionne, dans tel ou tel domaine particulier, des descriptions acceptables équivalentes d'un même ensemble de données (conformément à la thèse de sous-détermination), il y a un élément structural ou nomologique minimal qui n'est pas arbitraire, et permet de parler d'une réalité indépendante aux diverses descriptions. De même, en philosophie des mathématiques, certains philosophes, comme Wright, ont soutenu que même si une théorie platoniste des nombres comme celle de Frege est en elle-même inacceptable du point de vue de réquisits constructionnistes, une forme de platonisme « minimal » peut-être défendue, selon laquelle les critères syntaxiques de référence à des nombres comme objets sont toujours satisfaisants.

Ces diverses tentatives visant à retrouver une voie médiane entre nos intuitions réalistes et antiréalistes les mieux enracinées se heurteront toujours à la résistance de ceux qui, philosophes comme scientifiques, entendent voir dans les développements scientifiques particuliers la confirmation de ces intuitions et chercheront à leur donner une expression métaphysique plus profonde. Ainsi les scientifiques qu'inspirent les théories contemporaines de la dynamique des formes naturelles seront toujours tentés de voir dans la continuité de ces formes la preuve de dispositions causales stables émergeant progressivement dans la nature, au nom d'un néo-aristotélisme (Thom, Largeault) que ne renieraient pas les philosophes qui, comme Peirce ou Armstrong, entendent défendre des versions contemporaines du réalisme scolastique des universaux, fondées sur des lois de la nature comme régularités causales réelles. L'originalité de Peirce est d'avoir proposé cette idée en conjonction avec celle d'une réalité de ce qui est vague. Inversement, les philosophes qui argumentent, à l'instar de Van Fraassen, de l'impossibilité de maintenir des notions réalistes comme celles de « loi de la nature » dans le contexte de la science contemporaine,

soutiendront que des principes plus faibles de symétrie, ou la pluralité des modèles scientifiques, appuient une position antiréaliste ou instrumentaliste, et nieront le fait que nous acceptions des théories comme vraies puisse jamais impliquer qu'elles le soient vraiment. Mais même si la balance peut, à la faveur de tels ou tels développements, peser dans un sens ou dans un autre, il y a peu de chances pour que la pratique des scientifiques s'écarte fortement des exigences du réalisme minimal qui est un trait permanent de la méthode, à défaut d'être un trait de l'ontologie, scientifique, si cette ontologie est elle-même déterminable.

- ARMSTRONG D., *Universals and Scientific Realism*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1978. – BITBOL M., *Mécanique quantique, une introduction philosophique*, Paris, Flammarion, 1996. – CARTWRIGHT N., *How the Laws of Physics Lie*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1984. – DUHEM P., *La théorie physique*, Paris, Alcan, 1906 ; *Sauzein ta phainomena*, rééd., Paris, Vrin, 1912. – DUMMETT M., *Truth and other Enigmas*, Londres, Duckworth, 1973 (trad. fr. Pataut, *Philosophie de la logique*, Paris, Minuit, 1991). – EINSTEIN A.E., « Lettre à Schrödinger » (1935), in FINE A., « The Natural Ontological Attitude », in LEPLIN J. éd., *Scientific Realism*, Berkeley, Univ. of California Press, 1984. – ESPAGNAT R. D., *Le réel voilé*, Paris, Fayard, 1994. – LARGEAULT J., *Philosophie de la nature*, Val-de-Mame, Univ. Paris 12, 1984. – POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1902. – POPPER K., *Logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1935. – PUTNAM H., *Philosophical Papers*, vol. 1 et 2, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1975 ; *Realism with a Human face*, Harvard, Harvard Univ. Press, 1975 (trad. fr. C. Tiercelin, *Le réalisme à visage humain*, Paris, Le Seuil, 1994). – QUINE W.V.O., *Word and Object*, Cambridge (Mass.), MIT Press (trad. fr. P. Gochet & J. Dopp, *Le mot et la chose*, Paris, Flammarion, 1977). – SEILARS W., *Science, Perception and Reality*, Londres, Routledge, 1963. – THOM R., *Prédir n'est pas expliquer*, Paris, Flammarion, 1993. – VAN FRAASSEN, *The Scientific Image*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1981 ; *Laws and Symmetries*, Oxford, Oxford Univ. Press (trad. fr. C. Chevalley, *Lois et symétries*, Paris, Vrin, 1994). – WRIGHT C., *Frege's Theory of Numbers as Objects*, Aberdeen, Aberdeen Univ. Press, 1989.

Claudine TIERCELIN

→ Atomisme logique ; Découverte ; Duhem ; Expérience ; Idéalisme ; Induction ; Objectivité ; Paradigme ; Platonisme ; Quine.

RÉCEPTEUR

BIOCHIMIE

Tout comme le concept de gène, le concept de récepteur a d'abord eu un statut purement théorique et explicatif : dès la fin du XIX^e s. il servit à comprendre comment les drogues agissaient sur les cellules de l'organisme. Son histoire est complexe : y interviennent des dispositifs expérimentaux hétérogènes hérités de disciplines différentes, des théories également importées d'ailleurs, l'adoption de langages venus de disciplines voisines. Après 1960 le récepteur acquiert un statut matériel de molécule isolable et purifiable par des méthodes biochimiques, et devient un véritable

« objet-frontière » (S.L. Star & J. Griesemer, 1989, *Social Studies of Science*, 19, p. 387-420) suffisamment robuste pour réunir des communautés scientifiques diversifiées autour d'un même objet, mais aussi suffisamment flexible pour pouvoir répondre à des besoins locaux. Sa définition la plus flexible et donc la plus large repose dès le début de son histoire sur sa capacité à lier une molécule de façon spécifique. Cette liaison biochimique est covalente et obéit à la loi d'action de masse : elle peut être déplacée par un excès de cette molécule.

Après 1965 les récepteurs et plus largement les molécules de la « communication cellulaire » prendront rang parmi les molécules les plus prisées des biologistes et des biochimistes. Plus récemment, le modèle primitif de la liaison entre le ligand (molécule liée) et son récepteur – relativement simple, linéaire et statique et calqué sur le classique modèle « clef-serrure » –, a été rectifié et redéfini selon un modèle à la fois dynamique et beaucoup plus complexe.

Drogues et récepteurs : de la pratique à la théorie

Tout poison est un médicament potentiel et réciproquement. Poisons et médicaments ont été découverts de manière empirique et dans ce domaine comme dans bien d'autres la pratique a précédé et rendu possible la théorie. Le curare avait déjà servi de bistouri physiologique à Claude Bernard qui écrivait : « Les poisons sont de véritables réactifs de la vie, des instruments d'une délicatesse extrême qui vont disséquer les éléments vitaux » (*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris, Garnier-Flammarion, 1966, p. 156). Dans le même esprit, John Newport Langley (1852-1925), médecin de formation et neurophysiologiste, utilisait des substances neurotoxiques comme « outil de dissection » des éléments vitaux. Il postule dès 1878 qu'il existe une liaison chimique entre la drogue et une « substance réceptive » qui serait située sur les terminaisons nerveuses, mais ne développe pleinement sa théorie qu'en 1905, après avoir travaillé sur l'antagonisme entre la nicotine et le curare en l'appliquant à tous les alcaloïdes dérivés de substances naturelles, mais aussi aux « sécrétions internes » (futurs hormones). De son côté, Paul Ehrlich (1854-1915), médecin et biochimiste travaillant à l'Institut des maladies infectieuses fondé par Robert Koch, avait construit une théorie des récepteurs pour expliquer l'action des anticorps ; l'observation de la résistance de certaines souches de trypanosomes (parasites responsables de la syphilis) à l'action d'un médicament découvert dans son laboratoire, l'atoxyl, l'incite vers 1910 à utiliser la théorie des récepteurs pour expliquer l'action des médicaments.

Ce modèle des récepteurs reste très théorique et sans grande portée heuristique, quand un pharmacologue anglais, Alfred J. Clark, travaille à partir de 1920 à traduire en équations mathématiques les effets cellulaires des drogues. Clark exploite au mieux les dispositifs expérimentaux de la physiologie de l'époque, comme

le cœur isolé de grenouille, pour tester les effets des drogues connues à l'époque. Curare, dérivés de l'ergot d'une part, adrénaline et acétylcholine d'autre part resteront pendant plus de vingt ans les outils de choix pour étudier les récepteurs, aux confins de la pharmacologie et de la neurophysiologie. Clark montre que les effets de l'acétylcholine donnent une courbe dose-réponse qui peut être traduite par une équation mathématique simple et suggère une réaction chimique monomoléculaire entre la drogue et l'hypothétique récepteur cellulaire. Il rapproche la courbe obtenue de celle de la dissociation de l'oxyhémoglobine en solution, et fait remarquer que toutes ces courbes peuvent être dérivées de la loi d'action de masse. Il essaie aussi de conforter sa théorie en la rapprochant de la réaction enzyme/substrat. Cette mobilisation de modèles venus d'autres domaines de la biologie et de la chimie lui sert à développer sa théorie des récepteurs dans un livre paru en 1933, *The Mode of Action of Drugs*. À partir de cette date les pharmacologues ne cesseront plus d'évoquer les récepteurs.

La matérialisation des récepteurs

Dès 1950 on cherche à donner un statut matériel aux récepteurs à partir de la définition de l'époque : les récepteurs sont des entités cellulaires, généralement considérées comme membranaires, qui lient les médicaments et les substances naturelles afin que celles-ci puissent exercer leur effet. Il faut pour cela définir à la fois l'objet qu'on cherche à mettre en évidence et les dispositifs techniques qui serviront à le matérialiser. Dispositifs techniques et théoriques se modèlent réciproquement, sans qu'il y ait véritablement primauté des uns sur les autres. À chaque époque considérée un certain nombre d'outils sont disponibles, qu'il faudra choisir et combiner pour construire le dispositif technique. On a progressivement isolé, depuis les années 1920, des substances naturelles aux effets physiologiques puissants, les hormones. On suppose très vite qu'elles agissent en se liant à la membrane cellulaire : elles constitueront un premier outil de recherche très performant. À partir de 1950, les biochimistes savent séparer les protéines cellulaires selon leur poids moléculaire grâce à la centrifugation, et plus tard à l'ultracentrifugation ; ils savent aussi « marquer » des molécules en transformant certains de leurs atomes en éléments radioactifs. En combinant ces deux procédés on peut montrer que les hormones peptidiques (comme l'insuline) sont liées par des protéines de grande taille situées sur les membranes cellulaires, tandis que les hormones stéroïdiennes (comme les hormones sexuelles ou les cortico-surrénales) sont liées par des protéines intranucléaires.

Mais, à la jonction de la neurophysiologie et de la pharmacologie, c'est l'acétylcholine qui servira d'outil pour visualiser des récepteurs pour la première fois. Un pharmacologue suisse, Peter Waser, montre chez la souris que des dérivés synthétiques du curare marqués au carbone 14 se lient à des sites spécifiques situés dans

la plaque motrice du muscle diaphragmatique. En 1957, des chercheurs rassemblés à Rio de Janeiro lors d'un congrès sur le curare s'accordent à considérer qu'il s'agit de la première visualisation des récepteurs de l'acétylcholine. On montre ensuite que le curare bloquait les mouvements ioniques au niveau de la plaque motrice, et on postule que les molécules du poison s'accumulent autour des pores de la membrane. Ces pores que l'on appelle plus tard canaux seront considérés comme faisant partie du « complexe » récepteur de l'acétylcholine. Les travaux bien connus de Robertis et de J.-P. Changeux se situent dans cette ligne de recherche. Mais une étape déterminante de la réédification du concept de récepteur sera la construction du concept de « second messenger ».

Dispositifs expérimentaux et dispositifs langagiers

Médecin de formation et spécialiste du métabolisme intermédiaire, Earl Sutherland, qui mit sur le marché en 1965 l'idée du second messenger, ne s'intéressait pas aux récepteurs. En revanche, cherchant des objets nouveaux à étudier, il se servit d'un dispositif expérimental mis au point pour étudier le métabolisme du glucose à des fins nouvelles : l'étude du mécanisme d'action des hormones. Ce dispositif consistait à incuber des tranches de foie pour étudier la formation des métabolites du glucose et du glycogène. En 1940, quand Sutherland commença ce travail, on pensait que les hormones devaient activer divers enzymes du métabolisme intermédiaire. Dans un premier temps Sutherland confirma que deux hormones hyperglycémiantes (l'adrénaline et le glucagon) augmentaient la synthèse d'un enzyme présent dans ces tranches de foie, et nécessaire à la conversion du glycogène en glucose. Au cours de ces expériences il découvre de manière fortuite un facteur intermédiaire qui intervient entre l'hormone et l'enzyme et sera identifié comme étant un nucléotide, l'AMP cyclique. En 1965 les nucléotides sont des molécules vedettes puisque ce sont des constituants de l'ADN. À ce titre cette découverte intéresse beaucoup de biochimistes. Mais, décidé à créer un nouveau domaine de recherche, Sutherland cherche surtout à convaincre les endocrinologues de l'importance de sa molécule, et pour cela il utilise habilement leur langage. En 1965 il baptise sa molécule « second messenger » et construit un schéma d'action des hormones où ces dernières, baptisées « premiers messagers », activent la synthèse du « second messenger ». En utilisant le terme de messenger il se situe ainsi dans le droit fil du langage utilisé par Ernest Starling dès 1905, remis au goût du jour et enrichi par la cybernétique et les théories de l'information très en vogue dans les années 1960 et utilisé comme on le sait par la biologie moléculaire.

Un objet-frontière

Entre 1970 et 1980 on met en place les lignes de force de ce qui constituera le domaine de la signalisation et

des communications cellulaires. Des messages sont donc constamment échangés par les cellules vivantes. Véhiculés dans le sang, les premiers messagers touchent toutes les cellules de l'organisme, il est donc nécessaire que les cellules cibles soient pourvues d'un dispositif de reconnaissance et de décodage du signal qui leur est transmis : le récepteur, une grosse molécule de nature protéique, devient ce dispositif. Des complémentarités de structures spatiales et de répartition des charges électriques permettent la « reconnaissance » du premier messenger par le récepteur. Un système de « traduction » existe dans la cellule qui permet d'aboutir à l'effet biologique. L'ensemble de ces processus de traduction sera désigné sous le nom de transduction des signaux (terme emprunté à la biologie moléculaire). Les schémas se compliquent : des molécules intermédiaires, dont les protéines de transduction, dites protéines G, s'interposent entre la stimulation du récepteur par le premier messenger et la réponse biologique finale. On identifie des « familles » de récepteurs, caractérisés, comme les autres protéines, par leur extraordinaire polymorphisme. Enfin, la structure tridimensionnelle des récepteurs a été éclairée par l'étude d'un modèle remarquable, celui de la rhodopsine, récepteur rétinien qui réagit à l'émission de photons. D'étonnantes similarités de structure sont alors découvertes entre des récepteurs qui répondaient à des molécules activatrices aussi variées que l'adrénaline ou les peptides cérébraux en passant par les interleukines et les hormones gonadotropes. Par ailleurs, d'autres seconds messagers sont mis en évidence. L'invention des seconds messagers a facilité le regroupement des hormones, des neurotransmetteurs classiques et de nombreux neuropeptides dans une seule classe d'objets biologiques, celle des premiers messagers. Mais plusieurs questions restent posées.

De l'universel au particulier

À quoi servent les seconds messagers ? - La réponse à cette question est essentiellement spéculative. Les seconds messagers serviraient à amplifier les effets cellulaires des premiers messagers. Prenons l'exemple des hormones : elles sont diluées dans le flux sanguin et n'atteignent pas les cellules cibles en quantités suffisantes pour stimuler les divers enzymes cellulaires. En revanche, la production des seconds messagers, se faisant de manière sélective dans les cellules-cibles, requiert relativement peu d'énergie tout en atteignant des niveaux suffisants pour obtenir une activation satisfaisante des enzymes intracellulaires.

Comment les seconds messagers peuvent-ils médier les effets de premiers messagers nombreux et diversifiés, allant des neuromédiateurs classiques comme la noradrénaline, à des hormones peptidiques de taille et d'action extrêmement différentes ? On l'a vu, les seconds messagers sont en petit nombre, mais présents dans des tissus extrêmement variés et produits par une grande variété de premiers messagers. La spécificité de la réponse physiologique réside en fait dans la cellule

cible, équipée de dispositifs différents suivant les fonctions physiologiques qu'elle remplit. Les seconds messagers agissent en activant des enzymes cellulaires qui ont, quant à eux, une fonction spécifique de chaque cellule.

On est encore loin de connaître les processus de « corrélation chimique » entre les fonctions de l'organisme, pour reprendre les termes que Starling utilisait il y a près d'un siècle. Quelques principes généraux sont cependant bien établis : multifonctionnalité des messagers, voire des récepteurs ; universalité des systèmes de transduction qu'on trouve dans des tissus extrêmement variés ; modulation de ces systèmes de transduction par des jeux de systèmes activateurs et inhibiteurs, et par l'interaction de systèmes différents ; nombre élevé de couplages possibles entre les messagers et les récepteurs, ce qui permet d'obtenir des réponses physiologiques variées et adaptées aux multiples stimuli perçus par un organisme multicellulaire. Cette redondance, caractéristique du vivant et déjà soulignée par Claude Bernard, permet de pallier d'éventuelles défaillances des systèmes de communication.

► CHANGEUX J.-P., « The acetylcholine receptor : an allosteric membrane protein », *Harvey Lecture*, 1981, p. 85-254.
 - PARADANSCOLA J., « The Development of the Receptor Theory », in PARNHAM M.J. & BRUINVELS J. éd., *Pharmacological Methods, Receptors and Chemotherapy*, Amsterdam, Elsevier, 1986, p. 129-156. - ROTH J., « Receptors : Birth, collapse and discovery », in MCCANN S.M. éd., *Endocrinology, People and Ideas*, Bethesda, American Physiological Society, 1988, p. 369-396. - SINDING C., « Literary Genres and the Construction of Knowledge. Semantic Shifts and Scientific Change », *Social Studies of Science*, 1996. - STARLING E.H., « The chemical correlation of the functions of the body. The Croonian Lectures », *Lancet*, 1, 1905, p. 339-341.

Christiane SINDING

→ Cellule ; Immunologie ; Régulation moléculaire.

RÉCURRENCE

MATHÉMATIQUES / LOGIQUE

La notion de récurrence est une notion complexe qui met en jeu les idées de répétition et de retour sur soi. Ainsi, un phénomène est dit « récurrent » lorsqu'il se reproduit périodiquement. Par exemple, on parlera en médecine d'une « fièvre récurrente ». D'autre part, en philosophie des sciences, Bachelard parlait d'« histoire récurrente » pour manifester que l'histoire des sciences s'écrivait toujours en fonction de l'état actuel des connaissances scientifiques et imposait une sanction rétrospective des croyances passées (cf. *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, chap. 1 ; M. Fichant & M. Pêcheux, *Sur l'histoire des sciences*, p. 96-139). Mais c'est dans les sciences formelles que la notion prend son sens le plus précis.

En mathématiques, le principe de récurrence ou d'induction complète (qui, en dépit de ce nom, est bien

une procédure de déduction) constitue depuis Euclide, Pascal et Fermat le raisonnement mathématique par excellence. En théorie des nombres, son expression canonique correspond au cinquième axiome de l'arithmétique de Peano : « Si s est une classe à laquelle 0 appartient ainsi que le successeur de chaque nombre appartenant à s , alors chaque nombre appartient à s . » Un tel raisonnement consiste : 1) à établir une propriété pour un premier élément ; 2) à prouver que si cette propriété vaut pour un élément quelconque n , alors elle vaut pour son successeur $n + 1$, autrement dit qu'elle se transmet héréditairement ; 3) à itérer autant de fois que nécessaire le *modus ponens* (M.P. : étant donné une proposition conditionnelle et son antécédent, on peut détacher son conséquent, soit : si p alors q , or p , donc q) sur les deux propositions obtenues précédemment :

- (1) 1 a la propriété P , (base) $n = 1$
- (2) Si 1 est P , alors 2 est P , $n = 1$
- (3) 2 est P , par M.P. sur (1) et (2), $n = 2$
- (4) Si 2 est P , alors 3 est P , $n = 2$
- (5) 3 est P par M.P. sur (2) et (3), etc.

L'itération étant théoriquement indéfinie, ce type de raisonnement est applicable aux ensembles infinis, telle la classe des nombres entiers. On comprend alors que les premier et deuxième axiomes de Peano déterminent récursivement le nombre entier (aussi appelé pour cette raison « nombre inductif ») :

- 1° - 0 est un nombre,
- 2° - Si n est un nombre, le successeur immédiat de n est un nombre. (En toute rigueur, il faudrait stipuler que seuls les objets engendrés par les axiomes 1 et 2 constituent des entiers naturels.)

Le principe de récurrence permet ainsi de caractériser les ensembles infinis et d'opérer sur eux. C'est pourquoi Poincaré, qui lui attribuait une « vertu créatrice », crut qu'il devait être considéré comme un principe synthétique *a priori* faisant appel à une intuition pure de l'infini. Russell a cependant montré qu'il pouvait, comme les autres, être démontré logiquement et donc relevait de simples procédures analytiques (cf. D. Vernant, *La Philosophie mathématique de Russell*, p. 404-405).

La même maîtrise de l'infini est fournie par les définitions par récurrence ou inductives. Soit, par exemple, à définir l'opération arithmétique d'addition. On peut la caractériser comme le fait d'ajouter une unité à un premier élément 0, puis à itérer cette opération pour l'élément obtenu. On obtient alors la suite 0, 0 + 1, (0 + 1) + 1, ((0 + 1) + 1) + 1, etc. Ce faisant, on opère une itération sans toutefois en caractériser effectivement la procédure. C'est, à l'inverse, précisément ce que parvient à faire la définition récursive de l'addition :

$$1^{\circ} x + 0 = x$$

$$2^{\circ} x + Sy = S(x + y).$$

La première équation introduit l'addition pour 0. La seconde l'introduit pour le successeur immédiat (noté S) de y . Comme y peut prendre n'importe quelle valeur,

l'équation devient applicable au résultat obtenu. L'addition s'applique au résultat de l'addition. La récurrence (ou récursivité) provient de l'itération et du retour sur soi autorisé par la seconde équation. À la différence d'une définition directe, purement abrégative, la définition par récurrence comporte les mêmes symboles $-S$ et $+$ dans les *definiens* et le *definiendum*. Là encore est assuré le caractère héréditaire de l'opération.

On peut le voir aisément sur un exemple non mathématique. Supposons que l'on veuille définir la suite des ancêtres mâles d'un individu donné. De l'individu, on peut remonter à son père, premier ancêtre, au père du père (grand-père), au père du père du père (arrière-grand-père), etc. Le problème est de rendre compte de ce « etc. ». Comment, dans une définition, comprendre tous les pères possibles ? On pourra dire qu'un individu x est l'ancêtre de $y - A(x,y) -$ s'il est son père $- P(x,y) -$ ou s'il est le père de son père, mais la définition n'aura pas de fin, car il faudra ajouter que cela vaut pour l'arrière-grand-père, « etc. » ! On écrira par exemple :

- 1°) $P(x,y) \rightarrow A(x,y)$
si x est père de y , alors il est son ancêtre,
- 2°) $\{P(x,z) \cdot P(z,y)\} \rightarrow A(x,y)$

si x est père du père de y (grand-père), alors il est son ancêtre. Mais il faudra ajouter « etc. » pour prévoir le cas de l'arrière-grand-père... La solution consiste alors à utiliser comme seconde formule la construction récursive suivante :

- 2°) $\{P(x,z) \cdot A(z,y)\} \rightarrow A(x,y)$

qui généralise la relation ancêtre : si x est père de z et si z est ancêtre de y , alors x est ancêtre de y . La définition est récursive car dans la définition de l'ancêtre figure l'ancêtre. Dès lors, on dispose de la possibilité d'engendrer la suite des grand-père, arrière-grand-père... par simple itération.

La récurrence permet ainsi de substituer à une liste toujours ouverte et insaisissable la procédure effective de son engendrement. À l'instar de l'addition, les mathématiques utilisent des fonctions récursives (e.g. produit, exponentiation, factorielle, etc.) qui fournissent des algorithmes composés d'une suite finie d'opérations en nombre fini permettant un calcul. Quelles que soient les valeurs attribuées à x et à y , on peut toujours calculer $x + y$. Or, le même algorithme qui permet de calculer une addition autorise de même à décider si oui ou non on peut effectuer la somme de deux nombres donnés. La problématique s'élargit alors à celle de la décision.

En logique, un exemple simple est celui de la construction des formules du langage formel considéré. La syntaxe d'un système de logique propositionnelle admettant pour connecteurs primitifs la négation et le conditionnel répond aux règles suivantes :

- 1 - Toute proposition atomique est une formule bien formée (fbf),
- 2 - Si « A » est une fbf, alors « $\neg A$ » est une fbf,
- 3 - Si « A » et « B » sont des fbf, alors « $(A \rightarrow B)$ » est une fbf,
- 4 - Rien d'autre n'est une fbf (clause de fermeture).

Cette grammaire constitue un algorithme récursif en ce qu'il est toujours possible d'appliquer les règles 1, 2 et 3 l'une après l'autre dans n'importe quel ordre et d'itérer chaque usage de l'une d'entre elles. Deux conséquences notables découlent de cette récursivité :

- *Primo*, cette syntaxe récursive autorise l'engendrement (théorique) d'une infinité de formules bien formées. L'exemple le plus simple en est fourni par l'itération de la règle 2. De p en vertu de 1, on obtient $\neg p$ par application de 2, puis $\neg \neg p$ par une première itération de la même règle, puis $\neg \neg \neg p$, etc., à l'infini.

- *Secundo*, une telle syntaxe constitue une procédure de décision, un algorithme permettant de dire si une quelconque écriture est ou non une fbf, *id est* si elle est engendrée par la syntaxe. Ainsi, « $\neg (p \rightarrow \neg q)$ » est une fbf parce qu'en vertu de :

- 1 q est une fbf,
- 2 $\neg q$ " "
- 1 p " "
- 3 $(p \rightarrow \neg q)$ sur 1 et 2 " "
- 2 $\neg (p \rightarrow \neg q)$ sur 3 " CQFD.

De même façon, il serait facile de montrer que l'énoncé « $(p \rightarrow q) \neg$ » est dénué de sens en ce qu'il ne peut être engendré par les règles de la syntaxe considérée.

Mais le problème de la décision (*Entscheidungsproblem* selon l'expression introduite par Hilbert) consiste à savoir si tel système formel est décidable : si telle formule bien formée du système est démontrable, est théorème du système. Dès 1921, Emil Léon Post établissait la décidabilité du calcul des propositions, l'évaluation par tables de vérité fournissant un algorithme de décision. Mais en 1936, Alonzo Church démontra que le calcul des prédicats de premier ordre (comprenant les relations, *i.e.* les fonctions à deux variables : $R(x,y)$) n'est plus décidable. Et Gödel avait démontré dès 1931, dans son fameux métathéorème d'incomplétude, que l'arithmétique formelle n'admettait pas d'algorithme de démonstration : une formule valide ne pouvait y être démontrée. Un tel résultat mettait un terme au programme hilbertien d'une maîtrise métamathématique des systèmes logico-mathématiques.

Ainsi, les questions fondamentales de la calculabilité et de la décidabilité dépendent de la découverte d'algorithmes, de procédures effectives. Reste alors à préciser cette notion fondamentale d'effectivité. En 1936, Church proposa d'assimiler la notion intuitive d'effectivité au concept logique de récursivité (thèse de Church). La même année, Alan Turing définit la calculabilité au moyen d'opérations élémentaires réalisées par une machine idéale (sans limitation de mémoire) en suivant une table d'instructions (programme). Pour prendre un exemple simplifié, la fonction addition peut être calculée par une machine qui, travaillant sur des nombres exprimés au moyen de traits ($1 = |, 2 = ||, \text{etc.}$), ne fait que déplacer une barre du membre gauche de l'addition au membre droit jusqu'à ce qu'il ne reste plus rien à gauche. D'où l'addition $2 + 3$ se résout en itérant une fois la règle sur le résultat obtenu selon :

$$\begin{array}{l} || + ||| = | + |||| \\ | + |||| = ||||| \end{array}$$

La machine de Turing constituait la traduction théorique et universelle de toute calculabilité. En 1951, Markov précisa la théorie des algorithmes en proposant une analyse des processus à nombre fini d'états (sur la décidabilité et la calculabilité, cf. Kleene, *Logique mathématique*, chap. 5, p. 231-261). Se trouvait alors confirmée l'intuition leibnizienne assimilant pensée et calcul, calcul et traitement combinatoire des signes. Passant ensuite des machines théoriques aux réels ordinateurs, s'ouvrit l'ère de la mécanisation informatique de la logique et du développement de la philosophie cognitive qui la justifiait.

Comme on l'a vu avec l'exemple de la définition de l'ancêtre, la récursivité peut s'appliquer à des notions qui relèvent de la vie courante. En fait, elle intervient dès que l'on fonde le raisonnement sur le caractère héréditaire d'une propriété. Quine en donne un exemple simple : « Si Jacques Dupont souffre de drépanocytose et si les enfants des personnes prédisposées à cette anémie y sont eux aussi prédisposés, alors tous les descendants de J. Dupont ont cette prédisposition » (*Quiddités*, p. 197). D'autres usages relèvent des sciences de l'homme. Chomsky, par exemple, utilise en linguistique la récursivité des syntaxes logiques et leur capacité d'engendrement infini pour formaliser les grammaires des langues naturelles. Ces grammaires « génératives » contiennent elles aussi des règles récursives engendrant sans cesse de nouvelles phrases. Selon Chomsky, elles permettent alors de rendre compte de la créativité de tout usager d'une langue naturelle qui s'avère capable de proférer et/ou de comprendre toute phrase nouvelle : « Si une grammaire ne possède pas de processus récursifs [...], elle sera excessivement complexe. Si elle comporte des mécanismes récursifs, quels qu'ils soient, elle produira des phrases en nombre infini » (*Structures syntaxiques*, chap. 3, p. 27). Ainsi, la phrase « Le chien a chassé le chat qui a tué le rat qui a mangé le fromage » résulte de l'itération de la construction relative. On notera que dans la langue naturelle, à la différence des mathématiques, la récurrence se heurte rapidement à des contraintes d'acceptabilité.

Généralisées sous forme de « boucles étran­ ges », les procédures récursives peuvent aussi gouverner des créations littéraires, picturales ou musicales. On glisse alors de Gödel à Escher et Bach (cf. Hofstadter). Ainsi, la gravure de Maurits Escher de 1961 intitulée *Mouvement perpétuel*, représentant un édifice canalisant une eau qui monte puis retombe sur elle-même, illustre bien la double idée d'itération « perpétuelle » et le retour sur soi caractérisant toute récursivité. Mais, ce qui, chez l'artiste, à la faveur d'une illusion d'optique, paraît étrange, voire même franchement paradoxal, s'avère, chez le logicien, une procédure correcte et féconde en ce qu'elle fournit la possibilité d'une maîtrise calculatoire de l'infini. Une boucle récursive n'est en rien un cercle vicieux.

► BACHELARD G., *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951. - CHOMSKY N., *Syntactic*

Structures, La Haye, Mouton & Co., 1957 (trad. fr. M. Braudeau, *Structures syntaxiques*, Paris, Le Seuil, 1969). - CHURCH A., « An Unsolv­ able Problem of Elementary Number Theory », *American Journal of Mathematics*, vol. 58, p. 345-363 (réimpr., in DAVIS M. éd., *The Undecidable. Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolv­ able problems and Computable Functions*, Hewlett/New York, Raven Press, 1965, p. 88-107). - FICHANT M. & PÉCHEUX M., *Sur l'histoire des sciences*, Paris, Masspero « Théorie », 1971. - GÖDEL K., « Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I », *Monatsch. Math. Phys.*, vol. 38, 1931, p. 173-198 (trad. fr. J.-B. Scherrer, *Le théorème de Gödel*, Paris, Le Seuil, 1989, p. 107-143). - HOFSTADTER D., *Gödel, Escher, Bach, an Eternal Golden Braid*, New York, Basic Books Inc., 1979 (trad. fr. J. Henry & R. French, *Gödel, Escher, Bach, Les brins d'une guirlande éternelle*, Paris, InterÉditions, 1985). - KLEENE S.C., *Mathematical Logic*, New York, John Wiley & Sons, 1967 (trad. fr. J. Largeault, *Logique mathématique*, Paris, A. Colin, 1971). - MARKOV A.A., « Theory of Algorithms », *American Mathematical Society Translations*, série 2, vol. 15, 1960, p. 1-14 (trad. de l'original russe de 1951). - POST E., « Introduction to a General Theory of Elementary Propositions », *American Journal of Mathematics*, vol. 43, 1921, p. 163-185 (trad. fr. J. Largeault, *Logique mathématique, textes*, Paris, A. Colin, 1972, p. 29-56). - QUINE W.V.O., *Quiddities. An Intermittently Philosophical Dictionary*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1987 (trad. fr. D. Goy-Blanquet & T. Marchaisse, *Quiddités. Dictionnaire philosophique par intermittence*, Paris, Le Seuil, 1992). - TURING A., « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », *Proc. of London Math. Soc.*, série 2, vol. 42, 1936-1937, p. 230-265 ; « A Correction », *ibidem*, vol. 43, 1937, p. 544-546 (réimpr. in DAVIS M. éd., *The Undecidable. Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolv­ able problems and Computable Functions*, Hewlett/New York, Raven Press, 1965, p. 115-154). - VERNANT D., *La Philosophie mathématique de Russell*, Paris, Vrin, 1993.

Denis VERNANT

→ Computation ; Déduction ; Induction complète ; Machine de Turing.

RÉDUCTIONNISME

Au sens le plus large, on appelle réductionnisme la position selon laquelle une théorie, un domaine de discours ou un schème conceptuel peut être absorbé ou subsumé par un autre. Il existe toutefois différentes manières de concevoir la nature de la relation de réduction et les termes de celle-ci. Les programmes réductionnistes sémantiques soutiennent qu'il est possible de redéfinir les termes et prédicats centraux de la théorie ou discipline à réduire dans le vocabulaire jugé plus fondamental de la théorie ou discipline qui sert de base de réduction. Ces programmes peuvent prendre une forme différente selon la base de réduction choisie et la nature des redéfinitions envisagées (analytiques ou non, complètes ou partielles). Le programme logiciste en philosophie des mathématiques qui soutenait que les termes et concepts fondamentaux des mathématiques classiques étaient analytiquement définissables au moyen des termes et concepts de la logique et de la théorie des ensembles constitue une illustration d'un

réductionnisme sémantique fort. Les tentatives de réduction par Carnap et les positivistes logiques du vocabulaire théorique des sciences empiriques dans un vocabulaire purement observationnel illustrent une autre forme de réductionnisme sémantique.

D'autres versions du réductionnisme prennent pour objets de la réduction non plus seulement le vocabulaire d'une discipline, mais des lois ou des théories. Dans ce cas, la réduction n'est plus conçue comme une relation sémantique mais comme une relation d'explication. Il y a réduction d'un ensemble de lois ou d'une théorie à un autre ensemble de lois ou une autre théorie si à partir des secondes et d'un ensemble de lois de connexion mettant en correspondance les entités des deux domaines on peut dériver les premières. On distingue, à la suite de Ernest Nagel, deux types de réductions interthéoriques. Les réductions interthéoriques homogènes renvoient à la relation entre deux théories généralement successives portant sur des phénomènes qui intuitivement sont qualitativement semblables ou relèvent du même domaine, mais dont la seconde est plus générale ou s'applique à un plus grand nombre de ces phénomènes. Ainsi la réduction des lois galiléennes de la chute des corps terrestres et celle des lois keplériennes du mouvement des planètes à la théorie newtonienne de la gravitation constituent des exemples de réductions homogènes. En revanche, on parle de réductions hétérogènes (ou micro-réductions) lorsque les théories mises en relation portent sur des phénomènes perçus comme qualitativement dissemblables et comme relevant de niveaux d'organisation différents. La réduction de la thermodynamique à la mécanique statistique constitue un cas de réduction hétérogène. La théorie réduite traite de phénomènes macroscopiques, les phénomènes thermiques, tandis que la théorie réductrice traite des éléments et processus microscopiques constitutifs de ces phénomènes macroscopiques.

La question des réductions interthéoriques a donné lieu à de nombreux débats en philosophie des sciences. Une partie de ces débats a porté sur la nature de la relation de réduction et sur le statut des identités énoncées par les lois de connexion mettant en correspondance les expressions des théories réduite et réductrice. Selon l'analyse classique de Ernest Nagel, la théorie réduite doit être logiquement déductible de la théorie réductrice et des lois de connexion. Cette conception réductionniste de la réduction a été critiquée par plusieurs auteurs, dont Popper qui a notamment montré que les lois de Kepler ne sont pas à proprement parler déductibles de la théorie newtonienne de la gravitation. Des critiques encore plus radicales ont été émises par Kuhn et Feyerabend qui ont mis en avant l'idée de changement de paradigme et d'incommensurabilité entre théories s'inscrivant dans des paradigmes différents. Selon eux, les mêmes termes employés dans deux théories successives n'ont pas la même signification, car la signification d'un terme est déterminée par la place qu'il occupe dans le réseau de propositions qui constitue la théorie. Ainsi, on aurait tort de dire que la mécanique relativiste constitue une réduction de la

mécanique newtonienne puisque des notions aussi centrales que celle d'espace ou de masse n'y ont pas la même signification, ce qui rend les théories incommensurables.

La réponse standard à ces critiques consiste à faire valoir que pas plus dans le cas de réductions homogènes que dans celui de réductions hétérogènes on ne doit exiger que les notions mises en correspondance aient même signification. De même que, comme le soulignent les avocats du réductionnisme classique tels que Hempel et Nagel, la réduction de la thermodynamique classique à la mécanique statistique ne suppose pas une synonymie entre les notions de « température » et d'« énergie cinétique moyenne » mais seulement une coextension de ces termes, de même les réductions homogènes ne demandent pas qu'il y ait synonymie entre les termes communs à des théories successives mais seulement qu'il y ait une continuité référentielle. D'autre part, reconnaissant le caractère trop fort de l'exigence de déductibilité imposée par Nagel, certaines versions récentes du réductionnisme scientifique formulent des conditions plus souples. Ainsi, selon le modèle développé par Hooker, on aura une réduction de la théorie T1 à la théorie T2 s'il est possible de construire dans le vocabulaire de la théorie réductrice T2 un analogue des lois de la théorie T1 qui soit logiquement déductible de T2 et d'un ensemble d'énoncés spécifiant des conditions spéciales (fixation de paramètres, idéalizations, etc.). Selon cette conception, la réductibilité d'une théorie à une autre peut être affaire de degré. Dans le meilleur des cas il est possible de construire et de déduire de la théorie réductrice un analogue très précis de la théorie à réduire et la réduction s'effectue en douceur. Mais bien souvent, il n'est pas possible de construire un analogue qui soit le reflet totalement fidèle de la théorie à réduire et lorsque les modifications à apporter deviennent trop considérables, il vaut mieux parler de remplacement que de réduction.

Toutefois, c'est la question des implications ontologiques des thèses réductionnistes qui a donné lieu ces dernières décennies aux controverses les plus vives. On considère généralement que le réductionnisme scientifique, en particulier les micro-réductions, entraîne avec lui un réductionnisme ontologique. Cette forme de réductionnisme est intimement liée à une conception ontologique et non pas simplement méthodologique ou épistémologique de l'unité de la science. L'idéal de l'unité de la science est conçu comme inséparable de l'idée que les objets apparemment divers dont s'occupent les différentes sciences empiriques relèvent ultimement d'une ontologie unitaire. La version du monisme des substances qui est défendue est un monisme matérialiste ou physicaliste qui fait de la physique microscopique le dépositaire de l'ontologie du réel. Dans un manifeste réductionniste classique, Oppenheim et Putnam proposent une classification hiérarchique à six niveaux des objets scientifiques : les groupes sociaux, les organismes multicellulaires, les cellules, les molécules, les atomes, les particules

élémentaires. L'étude de chaque niveau relève d'une discipline particulière. La réduction consiste, d'une part, à dériver les lois qui gouvernent un niveau de celles qui gouvernent le niveau immédiatement inférieur et, d'autre part, à identifier les types d'objets décrits au niveau réduit à des structures particulières d'objets du niveau immédiatement inférieur. Étant donné la transitivité de la relation de réduction et celle de la relation d'identité, le but ultime du programme réductionniste est de montrer que la totalité de la science peut être dérivée des lois qui gouvernent le niveau fondamental microphysique et des lois de connexions qui énoncent les identités entre objets d'un niveau et structures d'objets du niveau immédiatement inférieur. Selon Oppenheim et Putnam qui citent de nombreux exemples de micro-réductions, le réductionnisme renvoie à la fois à un état idéal de la science et à une tendance massive dans l'histoire récente des progrès scientifiques.

Le réductionnisme ainsi entendu soulève toutefois de nombreuses difficultés. On peut premièrement relever que la hiérarchie de niveaux d'organisation proposée par Oppenheim et Putnam est simplifiée à l'excès. Comme le souligne Dupré, les atomes et les molécules ne sont pas seulement les constituants des cellules vivantes mais aussi de nombreuses structures complexes inanimées. Pour donner leur place à des sciences telles que la géologie, la cosmologie ou l'électromagnétisme, il faut à tout le moins considérer que la hiérarchie des sciences comporte des embranchements. Il est en outre souvent faux que les objets dont s'occupe une science puissent être uniquement traités comme des structures constituées d'objets appartenant au niveau immédiatement inférieur. C'est le cas notamment en biologie où il existe des interdépendances complexes entre entités situées à de nombreux niveaux différents de complexité. Ainsi, les systèmes dont s'occupe l'écologie combinent généralement des éléments appartenant à plusieurs niveaux d'organisation, organismes multicellulaires, cellules individuelles, molécules, et la compréhension de ces systèmes fait intervenir des facteurs tels que le climat ou la géologie.

Le réductionnisme rencontre une difficulté plus profonde, liée à sa conception des relations entre taxinomies des différentes sciences. La vérité du réductionnisme impliquerait en effet que toute espèce ou type d'objet compris dans la taxinomie d'une science particulière soit identique ou coextensive à une espèce ou un type physique. Cette conséquence n'est guère plausible. Par exemple, comme le montre Fodor, le prédicat « échange monétaire » est fréquemment impliqué dans les lois ou généralisations formulées en économie, mais la monnaie échangée peut l'être sous les formes physiques les plus diverses, or, cuivre, coquillages, billets de banque, chèques, virements électroniques. Or, quelle probabilité y a-t-il que le prédicat formé par la disjonction des prédicats physiques disparates décrivant tous ces événements exprime finalement une propriété physique qui soit susceptible d'être l'antécédent du conséquent d'une loi physique ? S'il est vrai qu'il

y a des propriétés communes aux échanges monétaires qui justifient la formulation de lois économiques, ces propriétés ne sont pas celles qu'exprime une description physique. Formulées en termes physiques, une loi économique perd son pouvoir d'explication et de systématisation.

De manière générale, les opposants au réductionnisme soulignent que les sciences particulières résistent à la réduction parce qu'elles sont consacrées à la formulation de généralisations concernant les comportements de systèmes qui sont largement indépendants des détails de leur constitution physique. D'une part, même dans le cas favorable où le comportement macroscopique d'un système peut être déduit à partir d'une description macroscopique de celui-ci, la déduction du comportement n'en est pas nécessairement une explication. Ainsi, la rigidité d'un corps peut être déduite à partir d'une description de sa microstructure physique. Mais un grand nombre de faits concernant les corps rigides peuvent être expliqués simplement par leur rigidité et les principes de géométrie sans qu'il soit nécessaire de donner une explication de la rigidité elle-même. Une explication d'une propriété n'est pas nécessairement une explication de quelque chose que cette propriété sert à expliquer. D'autre part, les faits concernant les systèmes organisationnels de haut niveau dont s'occupent la biologie ou les sciences sociales ne sont en général pas déductibles des seules lois de la physique. Comme le souligne par exemple Putnam, revenu sur ses positions antérieures, les lois de la physique et de la chimie ne permettent pas de déduire l'existence d'êtres vivants et encore moins les lois de l'évolution. Celles-ci dépendent non seulement des lois physiques et chimiques, mais encore de conditions particulières, telles que la présence d'oxygène, qui sont accidentelles du point de vue de la physique.

Si la question de la possibilité et des conditions de la réduction de telle ou telle science ou théorie particulière à une autre fait encore l'objet de vifs débats, par exemple le débat sur les rapports entre génétique classique et génétique moléculaire, la plausibilité d'un réductionnisme général semble aujourd'hui remise en cause par beaucoup d'auteurs. Ce n'est pas dire toutefois que dans leur majorité les adversaires du réductionnisme soient aussi les adversaires du matérialisme. Au contraire, de multiples tentatives sont faites pour formuler des versions non réductionnistes du matérialisme ou du physicalisme. Par exemple, le physicalisme dit occasionnel soutient la thèse selon laquelle tout événement auquel s'appliquent les lois d'une science quelconque est identique à un événement physique tout en niant que les types d'événements que définissent les taxinomies des sciences particulières doivent nécessairement correspondre à des types d'événements physiques. Il entend ainsi préserver la thèse de la généralité de la physique tout en la désolidarisant du réductionnisme physicaliste.

► CARNAP R. « Logical Foundations of the Unity of Science », in NEURATH O., CARNAP R. & MORRIS C. dir.

International Encyclopedia of Unified Science, vol. I, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1938-1955, p. 42-62. — DUPRE J., *The disorder of things*, Harvard, Harvard Univ. Press, 1993. — FEYERBAND P.K., « Explanation, reduction and empiricism », in FEIGL H. & MAXWELL G. dir., *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, vol. III, Minneapolis, Univ. of Minnesota Press, 1962, p. 28-97. — FODOR J.A., « Special sciences » (1975), trad. fr. « Les sciences particulières », in JACOB P. dir., *De Vienne à Cambridge*, Paris, Gallimard, 1980, p. 417-440. — HOOKER C.A., « Towards a general theory of reduction, I, II, III », *Dialogue*, 20, 1981, p. 38-59, 201-236, 496-529. — KUHN T.S., *The structure of scientific revolutions* (1962), trad. fr. *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983. — NAGEL E., *The structure of science*, New York, Harcourt, Brace & World, 1961. — OPPENHEIM P. & PUTNAM H., « The unity of science as a working hypothesis », trad. fr. « L'unité de la science : une hypothèse de travail », in JACOB P. dir., *De Vienne à Cambridge*, Paris, Gallimard, 1980, p. 371-416. — POPPER K., *Realism and the aim of science* (1983), trad. fr. *Le réalisme et la science*, Paris, Hermann, 1990. — PUTNAM H., « Reductionism and the nature of psychology », *Cognition*, 2, 1973, 131-146.

Élisabeth PACHERIE

→ Cercle de Vienne ; Épistémologie ; Nagel ; Objectivité ; Physicisme ; Putnam ; Théorie ; Vérification.

RÉEL

PHYSIQUE

Longtemps, pour la science moderne — c'est-à-dire au premier chef pour ce que nous appelons la physique — le « réel » n'a pas fait question. Il allait de soi que c'était son objet ; et qu'il suffisait, pour se l'approprier, de suivre la bonne méthode. On pouvait certes discuter de cette méthode. On partageait la conviction que la démarche scientifique permettait de débarrasser la pensée humaine des chimères qui l'avaient encombrée pendant des millénaires.

En 1844, Auguste Comte (1798-1857), dans le *Discours sur l'esprit positif* qui sert de préface à son *Traité philosophique d'astronomie populaire*, exprimera fort bien cette conviction en s'expliquant sur l'usage qu'il propose du mot « positif ». « Considéré dans son acception la plus ancienne et la plus commune, écrit-il, le mot positif désigne le réel, par opposition au chimérique : sous ce rapport, il convient parfaitement au nouvel esprit philosophique, ainsi caractérisé d'après sa constante consécration aux recherches vraiment accessibles à notre intelligence, à l'exclusion permanente des impénétrables mystères dont s'occupait surtout son enfance. »

Le *Traité* de Comte se présente comme newtonien. Et de fait, depuis les *Principia philosophiae naturalis* de Newton (1687), l'affaire paraissait entendue : de la mécanique rationnelle au système du monde, une même loi semble gouverner la nature. L'ordre réel du monde se dévoilait à nos yeux. Il suffirait dès lors de partir des principes de la mécanique pour s'assurer de nouvelles conquêtes et établir contre les simples

apparences ou les simples opinions l'indubitable réalité des « faits ».

Au temps où régnait la « philosophie naturelle », s'instituèrent ainsi, en étroite solidarité, une conception de la science comme « théorie » qui retient du mot grec l'idée d'un pur voir et une conception du réel comme ce qui peut être ainsi dominé du regard. Dans un texte célèbre, P.S. Laplace a très bien exprimé cet idéal de la science moderne en son âge classique : « Tous les événements, ceux mêmes qui par leur petitesse semblent ne pas tenir aux grandes lois de la nature en sont une suite aussi nécessaire que les révolutions du Soleil... Dans l'ignorance des liens qui les unissent au système entier de l'univers, ou les a fait dépendre des causes finales, ou du hasard, suivant qu'ils arrivaient ou se succédaient avec régularité, ou sans ordre apparent ; mais ces causes imaginaires ont été successivement reculées avec les bornes de nos connaissances... »

Le réel n'est pas seulement ce qui s'oppose au chimérique, mais ce qui a une « cause », ce qui tient à une série de causes et d'effets que l'on puisse rattacher aux « grandes lois de la nature ». Le réel c'est l'effet, ou si l'on préfère « l'effectif », ce que le terme allemand *wirklich* donne encore à entendre : le réel se définit par rapport à ce qu'on appelle une « cause efficiente », et c'est la relation de cause à effet entendue sur le modèle de l'antécédent au conséquent qui prend le pas. Le réel, c'est donc ce qui est fiable dans la mesure où, en tant qu'effet, il se relie à une chaîne de causes et d'effets, à un système du monde. Dieu même, dont Laplace, il est vrai, rejetait l'hypothèse hors de son système, apparaît selon cette perspective comme la « cause première » dont tout le réel dépend.

La seule question que pose le réel dans cette perspective, c'est celle des procédures contrôlables qui permettent de s'en assurer contre ce qui pourrait égarer, entraîner, l'esprit du sujet qui pense sur la voie de causes imaginaires. Le réel dès lors sera défini comme ce qui est « objectif », la réalité identifiée à l'objectivité. La science se définira comme conquête ininterrompue de nouveaux domaines d'objets. Cette conquête procède de la première science moderne constituée, elle se règle sur sa démarche qu'elle entend prolonger. On sait que cette première science fut la mécanique, la théorie des lois qui régissent le mouvement des corps. Comme l'a magnifiquement expliqué Ludwig Boltzmann, à partir de Newton, qui ouvrit la voie du progrès, Lagrange, Laplace, Euler, Hamilton ont bâti un édifice théorique qui permet de transformer chaque cas de mouvement d'un corps en problème purement arithmétique. « Ensuite, on s'est donné une image (*Bild*) mécanique de la structure interne des solides et des liquides. On a obtenu alors des équations qui exprimaient les lois de l'élasticité des solides, expliquant leur déformation et leur compacité, ainsi que le mouvement des liquides. » Et Boltzmann de conclure : « Quand un ensemble de phénomènes est décrit sous formes d'équations, le physicien croit avoir accompli sa tâche ! »

La mécanique est ainsi très vite devenue hégémonique

dans l'ensemble de la physique. Elle a conquis d'abord l'acoustique, puis l'optique... Le véritable hymne à la mécanique que constitue la leçon inaugurale de Boltzmann prononcée à Leipzig en novembre 1900 se présente comme une réponse à ce qu'il appelle un contre-mouvement issu des réflexions sur l'électromagnétisme et sur la thermodynamique, qui venait de marquer le premier moment où le réel a fait ouvertement question dans la science moderne.

C'est plus précisément à Ernst Mach, auquel il succédera deux ans plus tard dans la chaire de philosophie des sciences inductives à Vienne, que Boltzmann répliqua fermement. Tirant les leçons de l'impossibilité d'accorder le principe de Carnot-Clausius, lequel implique un processus irréversible de dégradation de l'énergie, aux équations de la mécanique analytique, et réexaminant à cette lumière l'évolution tout entière de la mécanique, Mach croyait prendre Newton en flagrant délit de contradiction, il allait même jusqu'à parler de « mauvaise foi scientifique ». Newton n'avait-il pas hautement proclamé qu'il ne voulait étudier que des faits ? Or « personne ne peut rien dire de l'espace absolu et du mouvement absolu, qui sont des notions purement abstraites, qui ne peuvent en rien être le résultat de l'expérience ». À quel vice de pensée imputer ce subterfuge ? « En cherchant à appliquer au système solaire les principes mécaniques découverts depuis Galilée, Newton observa que, abstraction faite des actions et des forces [...] les planètes semblaient conserver leur direction et leur vitesse par rapport aux corps très éloignés de l'univers, de la même façon que les corps en mouvement sur la terre par rapport aux objets fixes placés à sa surface. » En réalité, affirmait Mach, « il n'existe pas de phénomène purement mécanique ». Et cela même quand deux masses se communiquent des accélérations réciproques, car à « ce mouvement sont, dans la réalité, toujours liées des variations thermiques, magnétiques et électriques qui, dans la mesure où elles se produisent modifient le phénomène... »

Les phénomènes purement mécaniques sont donc des « abstractions intentionnelles ou forcées, dont le but est une plus grande facilité d'examen ». D'où que : « L'opinion qui fait de la mécanique la base fondamentale de toutes les autres branches de la physique et suivant laquelle tous les phénomènes physiques doivent recevoir une explication mécanique est un préjugé. » Et la prescription épistémologique bien connue : « Limiter notre science physique à l'expression des faits observables, sans construire des hypothèses derrière ces faits, où plus rien n'existe qui puisse être conçu ou prouvé. »

De là aussi l'opposition résolue de Mach à la théorie atomique qui représente à ses yeux le type même de l'hypothèse mécaniste injustifiable. Mach a parfaitement conscience de ce qu'il lui faut en conséquence proposer une nouvelle conception de la science. Toute science se propose d'épargner les expériences « à l'aide de la copie et de la figuration des faits dans la pensée ». Ce qui entraîne philosophiquement fort

loin : il n'y a dans la nature aucune « chose » invariable — ce que nous donnent à croire les mots qui les désignent en réalité « par abstraction de tout l'entourage de la chose et des petites variations continues » qui affectent le « complexe de sensations » en question. Une chose est donc une abstraction. Un nom est un symbole pour un complexe d'éléments, dont on ne considère pas la variation. Et, en toute logique, les sensations ne sont pas des « symboles des choses ». Allusion à Helmholtz, mécaniste. La « chose » est au contraire un « symbole mental » pour un complexe de sensations d'une stabilité relative. Mais alors il faut admettre que ce ne sont pas les corps qui sont les « véritables éléments » du monde, mais bien les couleurs, les tons, les pressions, les espaces, les durées — ce que d'ordinaire nous appelons les sensations. Et l'on doit ajouter que « dans la nature, il n'y a ni causes ni effets » ; donc que, lorsque nous parlons de causes et d'effets, nous faisons arbitrairement ressortir, dans la copie mentale d'un fait, « des circonstances dont nous devons estimer l'enchaînement dans la direction qui est importante pour nous ». Donc aussi que, dans la nature, il n'existe pas de lois, par exemple pas de loi de la réfraction. « La loi de la réfraction est une méthode de reconstruction concise résumée, faite à notre usage et en outre uniquement relative au côté géométrique du phénomène. »

À cette philosophie qui procède au renversement sur ses propres bases de celle qui était implicite dans la science moderne et qui tend vers ce que l'évêque irlandais George Berkeley (1685-1753) avait appelé l'« immatéalisme », Boltzmann oppose qu'il y a un « malentendu total » sur le « mécanisme ». « Les images des choses ne donnent jamais un reflet exact de ce qu'elles sont. Ce ne sont que des images, ou plutôt des signes qui, nécessairement, représentent la signification d'une manière trop spécialisée et qui donc ne peuvent rien faire d'autre qu'imiter certains enchaînements sans pour autant trahir l'essentiel. » Et dans sa leçon inaugurale à Vienne en 1902 il dénonce le paralogisme séduisant de Mach, selon lequel « le monde n'est pas réel, qu'il n'est rien d'autre que le produit de notre imagination, et de nos rêves ». Position intenable qui mène au « solipsisme », affirme Boltzmann, et qui se réfute par le fait que l'« on est moins en mesure d'agir de façon appropriée quand on doute de l'existence de ce monde réel ».

Cet aperçu des arguments échangés avec passion durant cette période donne une idée des interrogations philosophiques qui furent celles des physiciens au cours de la « crise de la physique moderne ». La question du « réel » y apparaît centrale. Parti d'une très forte critique des présupposés « oubliés » de la physique de Newton, Mach s'engage sur une voie qui se veut expressément fidèle à l'idéal newtonien de la science. Sans doute a-t-il le raison de revendiquer cette fidélité, mais c'est la fidélité à un mirage cultivé par les newtoniens : celui que la science, en l'occurrence la physique, pourrait atteindre « le réel dans sa réalité » ; ce qui s'exprime alors par l'idée que l'on déchiffrerait

les « lois de la nature », donc le dessein de Dieu. Et l'intérêt des textes de Boltzmann, comme de Helmholtz, c'est qu'ils commencent à se soustraire à ce mirage par l'idée d'images-signes intervenant sur et dans le réel pour l'approprier aux buts de notre science.

Inutile d'insister sur les conséquences, dans les sciences physiques, de la position philosophique de Mach, renforcée par l'empirio-criticisme du philosophe Richard Avenarius et relayée par le chimiste Wilhelm Ostwald et les « énergétistes » : le refus d'accorder quelque réalité aux atomes, particulièrement bien accueilli en France par Marcelin Berthelot ou Sainte-Claire Deville a freiné considérablement les recherches.

À cette crise en fait écho une autre, ouverte par la Mécanique quantique, d'une plus grande gravité mais d'un intérêt tout particulier, parce qu'elle permet d'y voir plus clair dans les motifs de la première et aussi dans ce qui de la conception du réel qu'avaient élaborée les physiciens classiques se trouvait, en définitive, mis en question. En réponse à cette crise Max Planck a énoncé cet aphorisme qui a fait école : « Est réel ce que l'on peut mesurer. » Il s'exprime ici, selon une pente constante de sa pensée, dans le droit fil de la conception « classique » de la physique. Ce qui est réel est un objet. Cet « objet » n'est objet que parce qu'il a été objectivé par un « calcul » qui le rend « mesurable », selon la voie des mathématiques qui permettent d'y établir des relations d'ordre au moyen d'équations.

Planck met parfaitement en lumière ce qui relie la physique atomique à la physique classique. La nature s'y présente comme l'ensemble coordonné de mouvements de corps matériels. La physique classique représente les corps et leurs rapports comme une mécanique du point, et la physique contemporaine comme noyau et champ. Mais pour la physique classique, tout mouvement des corps qui remplissent l'espace est déterminable – pré-calculable – de façon non équivoque. Pour la physique atomique, un état de mouvement ne peut, par principe, être déterminé ni quant au lieu, ni quant à la grandeur du mouvement. On ne peut donc s'assurer des connexions objectives que sur le mode statistique.

Ce qui ne change pas a été très clairement exprimé par Heisenberg : « Le mode de représentation de la physique vise toujours, lui aussi, à pouvoir écrire une unique équation fondamentale de laquelle découleront les propriétés de toutes les particules élémentaires et par là le comportement de la matière en général. » Ce qui change, et déconcerte, mais qui s'avère très éclairant, c'est que l'« objet » disparaît. C'est désormais la relation « sujet-objet » dont il faut s'assurer. Là-dessus bien des physiciens déroutés ont enchaîné des considérations philosophiques sur la fin du « déterminisme ». Certains prétendraient que le « réel disparaît », d'autres qu'il restera à jamais voilé... Ce qui a pu, comme dans le cas de la première crise de la physique, mener à des spéculations teintées de mysticisme comme on l'a vu lors du fameux colloque de Cordoue. Mais ce qui s'avoue ici, c'est que l'identification du « réel » à « l'objectivité » n'allait nullement de soi, et qu'en

l'occurrence la physique n'a jamais procédé à cette description du monde dont on dit qu'elle la voudrait aussi adéquate que possible. Elle a toujours procédé, comme Boltzmann l'indiquait, à une intervention qui contraignait des secteurs de la nature à se présenter comme autant de « domaines d'objets ». Le réel n'y est jamais que le résultat d'une réalisation en vertu de ses possibilités selon le mot de Gaston Bachelard.

Pourquoi, alors, ce malaise perpétuel, cette inquiétude qui s'attache à la mécanique quantique ? Sans doute parce qu'elle met en question le mirage que la représentation scientifique pourrait comprendre, encercler toute la nature. Ernst Mach fut visiblement la proie de ce mirage. Déjà les *Naturphilosophen* en Allemagne au début du XIX^e s. avaient joué de cette désillusion pour restaurer des vues cosmothéologiques empruntées à la tradition mystique allemande. Schelling, critiquant le « mécanisme » de Newton et des newtoniens, affirmait l'existence d'une « Âme du Monde » comme Giordano Bruno en son temps ressuscitant une vieille tradition néoplatonicienne.

L'histoire du mot réel permet d'apercevoir ce qui constitue peut-être l'enjeu philosophique ultime de ces débats. Nous avons du mal à admettre l'acceptation étroitement épistémologique du mot réel. Ce mot ne porte-t-il pas, comme Heidegger l'a indiqué, l'écho de ses origines. On sait qu'il provient de *res*, mot latin qu'il ne faut pas s'empresse de traduire par « chose ». Comme en témoignent les expressions *res publica* (ou *res adversae* ou *res secundae*), ce vocable désigne d'abord ce qui touche les êtres humains, ce qui les affecte, ce qui les concerne... Et non pas seulement la « chose » en tant qu'elle se présente, qui se dit en latin *ens*. L'histoire de la pensée médiévale a identifié *res* et *ens*, et la pensée moderne n'a fait que recueillir cet héritage en installant le « réel » dans la représentation, comme ce qui y renverrait à ce qui est. Le réel ne serait qu'une modalité de la pensée de l'être, à côté du possible et du nécessaire. Mais, sous cette acception, a sans doute fait chemin le très ancien sens qui le déborde de beaucoup ; et c'est pourquoi le scientisme a toujours voulu étendre la prise du réel scientifique ainsi conçu au-delà de la physique ; et c'est pourquoi le réel de la science ne semble jamais nous satisfaire ; et c'est pourquoi encore il nous inquiète même : serait-il en voie de soumettre à son emprise tout « ce qui nous touche » ? Que cette inquiétude repose sur une menace pour l'essentiel illusoire, peu importe. Elle inspire aujourd'hui les discours « éthiques » qui prennent le plus souvent une tonalité antiscientifique. Peut-être parce que la « réalisation » scientifique se trouve implicitement identifiée à la réalisation technique ? Mais ce serait une autre histoire.

► CARNOT S., *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824), Paris, Librairie scientifique et technique A. Blanchard, 1953. – COMTE A., *Œuvres*, Paris, Anthropos, 12 vol., 1968. – GALILÉE, *Le opere di Galileo Galilei*, Florence, Antonio Favaro, 20 vol., 1890-1909, nouv. éd., 1965. – HEISENBERG W., *Physique et philosophie*, trad. fr., Paris, Albin Michel, 1961. – HELMHOLTZ H. VON, *Handbuch der Physiologischen*

Optik, Leipzig, 1856-1866 (trad. fr., 1867 ; rééd., Sceaux, J. Gabay, 1989) ; *Die Lehre von dem Tonempfindung*, Leipzig, 1863 (trad. fr., 1868 ; rééd., Sceaux, J. Gabay, 1990) ; *Populäre wissenschaftliche Vorträge*, Leipzig, 1865-1871. – LAGRANGE J.L., *La mécanique analytique*, Sceaux, J. Gabay, 1989 (reprod. en fac-sim. de l'édition de 1788). – LAPLACE P.S., *Exposition du système du monde*, rééd., Paris, Fayard, 1984. – MACH E., *La mécanique* (1883), trad. fr. E. Bertrand, Paris, Hermann, 1904 ; 1923 ; *Beiträge zur Analyse der Empfindungen*, Léna, 1886 ; *Contributions to the analysis of the sensations*, trad. C.M. Williams, Chicago, Open Court, 1897 ; *Popular scientific lectures*, trad. T.J. McCormack, Chicago, Open Court, 1898 ; *Erkenntnis und Irrtum*, Leipzig, Barth, 1905 ; *La connaissance et l'erreur*, trad. fr. M. Dufour, Paris, Flammarion, 1908 ; *Knowledge and error* (1922), trad. T.J. McCormack, P. Foulkes, Dordrecht, Reidel, 1976 ; *Space and geometry, in the light of physiological, psychological, and physical inquiry*, trad. T.J. McCormack, Chicago, Open Court, 1906 ; *Die Leitgedanken*, Leipzig, 1918. – NEWTON I., *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (1687), trad. de Madame du Châtelet, Paris, 1756 et 1759 (rééd., Paris, Gauthier-Villars, 1955) ; *Traité d'optique*, trad. Coste, Amsterdam, 1720 (rééd., Paris, Blanchard, 1966). – PLANCK M., *Vorlesungen über Thermodynamik*, Leipzig, 1897 ; *Der Physik im Kampf um die Weltanschauung*, Leipzig, 1935 ; *The new science*, New York, Meridian Books, 1959 ; *Initiations à la physique*, Paris, Flammarion, 1993 ; *Autobiographie scientifique*, Paris, Flammarion, 1960.

Dominique LECOURT

► Atome ; Déterminisme ; Espace ; la critique de Mach ; Immortalisme ; Quantique.

RÉFÉRENTIEL

Sous la rubrique « idonéisme », il est noté en fin d'exposé que le référentiel apparaît comme le concept central de la philosophie ouverte de Ferdinand Gonseth (1890-1975). Pourtant, celui-ci n'a dégagé cette notion que vers la fin de sa vie (dès 1968). Son ouvrage *Le référentiel, univers obligé de médiatisation* est sorti de presse en 1975, quelques mois avant sa mort. Mais en fait, le concept de référentiel était implicite dès son premier ouvrage *Les fondements des mathématiques* paru en 1926 ; dans l'introduction, il fait référence à ce qu'il appelle le « démon mathématique » qui crée ses constructions schématiques telles que la géométrie, la mécanique, etc., par suite d'une visée théorique en étroit rapport avec les données de l'intuition et les jeux expérimentaux. Même la logique est un schéma que construit un démon analogue. Gonseth s'emploie à défendre cette thèse. Dans ce livre, comme dans les suivants, ce qui s'impose au sujet connaissant, ce ne sont pas des réalités en soi ; ce sont des interprétations référentielles mises en situation, et ces interprétations concilient les deux exigences de vérité et de réalité.

Cela étant noté, il convient de montrer comment Gonseth introduit le concept de référentiel sans pourtant le définir de manière stricte ; il l'a fait, la première fois, en 1970 lors d'une conférence donnée à La Chaux-de-Fonds. Avec sa famille, dit-il, il montait par le train de Stansstad à Engelberg. À l'une des stations,

le wagon s'était arrêté devant un groupe de sapins : l'œil captait le message visuel à travers la vitre. Mais surprise ! Il semblait à Gonseth que les arbres n'obéissaient pas aux normes de la verticalité. Après investigation, il put se rendre compte que la voie, à cet arrêt, n'est pas horizontale. Si l'on regarde le cadre naturel du paysage, tout est en ordre ; si l'on examine la situation en prenant les vitres du wagon comme repères – comme référence – les verticales extérieures semblent être obliques. Gonseth a commenté son récit : dans le référentiel que constituait le wagon, les sapins paraissaient obliques ; dans le référentiel que constituait la région, les arbres reprenaient leur allure normale ; le passage d'un référentiel à un autre provoquait une mutation soudaine. Quelle remarque de caractères philosophiques peut-on faire ? On peut rapprocher l'expérience des sapins de maintes autres : on peut établir des analogies avec un grand nombre de phénomènes psychiques sur la gamme qui va du naturel au culturel. Chacun peut faire l'expérience que, d'un jour à l'autre, on est amené à juger tout autrement un ensemble de questions auxquelles on avait réfléchi, à considérer toute une conduite, voire une morale, sous un jour nouveau, à abandonner subitement une idéologie pour en intégrer une autre, etc. Pour des motifs méthodologiques, Gonseth refuse ici de donner du concept de référentiel une définition définitive, mais il accepte d'adjoindre à son approche par l'histoire des sapins obliques les expressions que voici : système d'axes de coordonnées en géométrie, univers propre à l'observateur en théorie de la relativité, corps des couleurs dont l'homme est le siège, ensemble des précieuses fautes desquels telle activité systématique ne peut s'inscrire dans le vécu de chacun, référentiel auquel recourt l'architecte quand il conçoit un plan, horizon de référence dans lequel l'homme en situation quotidienne propose sa façon de juger, d'être et d'agir... Partout où, par le fait d'exister, on s'aperçoit qu'on s'engage – que ce soit corporellement, affectivement, moralement ou intellectuellement –, la même constatation s'impose : un référentiel approprié préside avec plus ou moins de réussite à une participation au monde. On tient là un univers obligé de médiatisation entre l'univers subjectif de chacun et le monde auquel chacun appartient objectivement. Qu'il s'agisse de science, de morale, d'art, de technique, de sport, le référentiel est au service de tout être-au-monde et de tout être-avec-autrui.

Des précisions s'imposent encore ; elles sont données par les quatre énoncés suivants : 1) Le rapport de l'homme à la situation dans laquelle il peut se trouver se traduit en lui et pour lui par la formation et l'adoption d'un certain référentiel. 2) Ce référentiel peut changer brusquement s'il se produit pour l'homme un changement dans son rapport à la situation d'ensemble. 3) Quand l'homme passe ainsi d'un référentiel à un autre, il reporte de l'un à l'autre certaines exigences inaliénables (dans le cas des sapins obliques, l'exigence pour l'être humain d'une verticalité). 4) Une mutation de référentiel peut s'accompagner d'un

progrès dans l'objectivité du jugement et dans la justesse des comportements ; il arrive parfois qu'une mutation de référentiel soit la condition à remplir pour pouvoir franchir certains obstacles ou écarter certaines erreurs. Ainsi l'homme, dans son engagement, est toujours situé dans un horizon de réalité. Par conséquent, les réalités de cet horizon sont à la fois « formes pour le sujet » de ce qui a pour lui valeur de « significations extérieures » et « actualisations extérieures » de ce qui, venant de lui, s'impose comme « conditions obligées de son appartenance au monde ». Par exemple, la verticalité pour l'homme est un mixte, en ce sens qu'elle relève de la subjectivité et de l'objectivité : chaque homme normal porte en lui une quête subjective de verticalité ; le monde extérieur répond à cette quête en lui donnant des repères objectifs faute desquels il serait livré au malaise. En outre la verticalité s'installe en l'homme normal, dès sa tendre enfance ; on dit volontiers d'elle que c'est un référentiel naturel ; l'emploi de cet adjectif est quelque peu abusif, mais on est en droit de s'en satisfaire.

Ce qui est relevé jusqu'ici à propos d'un référentiel faisant de la verticalité une quête de l'homme pourrait être repris quant à l'exigence de la spatialité : l'enfant apprend à distinguer le haut du bas, la droite de la gauche, le proche du lointain, et, quand il se meut, les constances spatiotemporelles. Celles-ci font l'objet d'une série d'apprentissages perceptifs dont l'importance a été dégagée par de nombreux travaux, notamment les expériences d'Ivo Kohler qui mettent en scène des sujets qui portent des lunettes à verres prismatiques (les prismes dévient les rayons lumineux selon un angle qui varie en fonction de l'angle d'incidence). Après un certain temps les sujets s'adaptent aux lunettes s'ils les portent en permanence : l'univers des objets reprend sa forme et sa stabilité. Le référentiel relatif à la spatialité est plus complexe que le référentiel relatif à la verticalité ; mais il s'installe chez l'homme normal, dans sa tendre enfance ; on peut donc le considérer comme naturel. De là, une remarque importante : c'est en partant des éléments de la spatialité élémentaire qu'on apprend la spatialité géométrique selon Euclide. Ainsi, par exemple, le bachelier est en possession, quant à la spatialité géométrique, d'un référentiel culturel. On dit de lui qu'il est objectif parce qu'il est valable pour tous les hommes. Les maîtres forcent chez les élèves un tel référentiel en ayant recours à trois instances : les données de l'intuition, le jeu de l'expérimentation, les élaborations théoriques, soit qu'on les insère en système de pensées pré-axiomatiques, soit qu'elles visent une édification axiomatique. À ce propos, on peut regretter que l'homme du XX^e s. ne soit pas initié aux géométries non euclidiennes ; il n'est pas en état de saisir les vertus d'un effort d'axiomatisation et de faire, en géométrie, l'expérience du passage d'un référentiel partiel à un référentiel englobant. Un tel englobement de référentiels est bien illustré en mécanique : la théorie de la gravitation d'Einstein constitue un référentiel qui témoigne d'un progrès par rapport au référentiel de

Newton, car il l'englobe, Bachelard et Gonthier insistent sur cet état de choses ; en vertu du principe de sauvegarde de l'acquis, le référentiel newtonien n'est pas dévalué mais relativisé. Il reste à noter que ces référentiels (euclidien, non euclidien, newtonien, einsteinien) sont à considérer comme objectifs, car ils sont acceptés dans la cité des chercheurs. On pourrait donner beaucoup d'exemples de référentiels, dits objectifs, valables en mathématiques et en sciences de la nature, voire en logique.

Dans un article important : « L'homo phenomenologicus », Gonthier se met à la recherche du sujet quant à la vision colorée ; il évoque les résultats de la colorimétrie concrétisés dans le triangle des couleurs ; il dépéint la recherche des experts et des sujets en la prenant comme modèle de recherche en sciences humaines ; les experts ont des visées d'objectivité tout en sachant que leurs interlocuteurs ont à rendre compte de jugements subjectifs, mais authentiques ; il s'agit, pour eux, d'établir un système de référence propre à montrer que l'intersubjectivité favorise la communication entre les hommes quant aux couleurs et ils mettent en évidence l'existence d'individus hors norme : les daltoniens. Or, une distinction doit être faite entre les couleurs que l'homme extériorise sur papier et les couleurs potentielles dont il est le porteur en son intimité ; on dit, en fermant les yeux, qu'on voit en son espace mental une couleur rouge ou bleue ou verte. Ainsi, chaque conscience humaine est le siège d'un corps de couleurs, d'une structure du sujet. Ce corps de couleurs constitue un exemple, parmi toutes les structures de subjectivité, de référentiel individuel en interdépendance avec un référentiel collectif ; c'est la société qui apprend à l'homme à décrire les couleurs par le langage, véritable référentiel linguistique. Et cependant, pour la conscience humaine, le corps des couleurs est un référentiel subjectif, même si les colorimètres proposent un modèle statistique. Et les daltoniens illustrent les cas de référentiel pathologiques. Bachelard, comme le peintre Johannes Itten, a dégagé la notion de référentiels esthétiques essentiellement subjectifs. Il montre comment les artistes transmettent leur message à autrui ; aussi fait-il valoir le doublet résonance-retentissement qui favorise la transsubjectivité. Par les résonances, l'auditeur capte l'œuvre d'art ; par le retentissement, il la fait sien. Mais le doublet résonance-retentissement n'est pas durant la vie de tel amateur d'art une donnée stable ; il fluctue, il évolue, et dans le meilleur des cas, il gagne en pouvoir d'accueil. Il faut noter ici que Gonthier s'est intéressé au problème psychogénétique que pose la formation et l'adoption d'un référentiel. Dans *La philosophie du non*, Bachelard note que l'enfant naît avec un cerveau inachevé et non inoccupé ; il ajoute que la société devrait achever le cerveau comme l'organisme des fonctions psychiques ouvertes. Gonthier précise que l'enfant naît en étant porteur de structures en état d'incomplétude. Il est soumis, dès la naissance, à des forces endogènes et exogènes. La référence à Piaget est manifeste.

Mais Gonthier distingue deux catégories de développements psychogénétiques :

1) Les structures logico-mathématiques se forment en passant par des stades qui s'étagent du niveau sensorimoteur à celui de la représentation et de l'actualisation consciente, et, réserve faite des incidents de parcours, la genèse s'accomplit comme si elle était linéairement programmée ; l'aboutissement est univoque. 2) Beaucoup d'autres structures se développent en obéissant à une programmation ramifiée ; ainsi, les référentiels esthétiques, linguistiques, moraux et spirituels évoluent chez chaque homme en fonction des « pulsions » d'intimité et des « pressions » de société en présentant des caractères individuels plus ou moins affirmés. Par exemple, l'enfant naît avec la capacité de devenir un être moral ; mais la forme morale dont il témoignera sa vie durant n'est pas précisée au départ ; elle s'affirme et s'affermite lors de son intégration dans l'entrelacs des communautés qui l'accueillent ; les forces qui s'exercent sur lui sont telles qu'il est difficile, sinon impossible, de localiser l'originaire, le réactionnel ou l'événementiel. Et c'est bien là qu'il faut souhaiter avec Bachelard que le cerveau de l'enfant soit traité comme l'organisme de fonctions psychiques ouvertes : il existe bel et bien des référentiels ouverts et des référentiels fermés.

Pour élaborer cette étude, Gonthier a travaillé avec son fils Jean-Paul Gonthier, psychiatre ; aussi n'est-il pas étonnant qu'il l'ait achevée en parlant de référentiel pathologique. L'homme, dès sa naissance, soumis qu'il est à des forces endogènes et exogènes, développe lors de son itinéraire – parfois stable, parfois tourmenté – des référentiels obéissant à des quêtes d'idéalité et à des exigences de réalité qui sont malléables et fragiles. On a noté plus haut que des mutations de référentiels peuvent s'accompagner de progrès dans l'objectivité du jugement et dans la justesse des comportements. L'apparition de situations perturbatrices provoque chez l'homme soit des déséquilibres passagers susceptibles d'être surmontés à court, à moyen ou à long terme, soit des régressions ou des discordances graves avec le milieu ambiant, donc des pathologies qui exigent des soins attentifs. Bien plus, ce qui peut advenir, peut advenir des référentiels collectifs ; on en trouve des exemples dans l'histoire de l'humanité : conflits entre sociétés et individus, entre différentes sociétés, dictatures, fanatismes, démocraties déviées, minorités écrasées, inégalités flagrantes entre riches et pauvres, mal-développement et pollutions de toute nature.

On peut comprendre, dans ces conditions, que l'on ressente le besoin de dégager des philosophies de dialogue. Élaboration d'un système de valeurs adaptées à notre temps ? Qu'il soit permis en tout cas de recourir à l'idée de dialogue, à l'idée de recherche d'accord de référentiel, à l'idée de déployer la volonté commune et inébranlable de se parler, de se concerter, quitte à s'affronter parfois pour que le combat intransigeant de tous contre tous puisse se muer en un combat de tous pour tous.

Pour conclure, en retrouvant les thèmes traités sous la rubrique « idonéisme », il faut souligner qu'en tout domaine d'activités humaines – en sciences dites exactes, en sciences de l'homme, dans la vie quotidienne – les interprétations référentielles requises, comme on l'a dit au début de l'article, sont appelées à concilier les exigences de vérité et celles de réalité. Ces deux exigences sont dialectiquement solidaires ; elles sont l'une et l'autre irréductibles. Mais elles ne sont, l'une et l'autre, actualisables que selon les modalités mises en évidence par Gonthier au nom du principe d'idonéité et conformément à la méthodologie ouverte.

► ARAÚJO JORGE M.M., « Ce que Gonthier a d'important à dire à l'épistémologie contemporaine », *Dialectica*, vol. 44, 3/4, 1990. – BONSACK F., « Gonthier et les sciences humaines », *Revue du Jura Bernois et de Bienne*, Intervalles, n° 27, 1990. – ÉMERY É., « F. Gonthier – Pour une philosophie dialectique ouverte à l'expérience » (1985), *Pour une philosophie du dialogue*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1995. – GONTHIER F., *Le référentiel, univers obligé de médiatisation*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1975 ; *Sciences, morale et foi*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1990 ; *Le problème de la connaissance en philosophie ouverte*, Lausanne, L'Âge d'homme, 1995. – GONTHIER J.P., *Mon itinéraire philosophique d'après l'œuvre de F. Gonthier*, Vevey, L'Aire, 1995 ; *Figuratives verfahren und psychodrama*, Paderborn Junfermann, 1985. – ORY A., « Le dernier livre de F. Gonthier », *Revue du Jura Bernois et de Bienne*, Intervalles, n° 27, 1990. – POUGET P.M., *Pour un nouvel esprit philosophique d'après l'œuvre de F. Gonthier*, Vevey, L'Aire, 1994.

ÉRIC ÉMERY

→ Bachelard ; Gonthier ; Idonéisme.

RÉFÉRENTIEL EN PHYSIQUE → Gravitation ; Relativité

RÉFLEXE

Genèse du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e s.

Un acte réflexe est caractérisé par une excitation périphérique d'un nerf sensible qui détermine un mouvement de réponse.

Certains historiens des sciences physiologiques, à l'instar de F. Fearing, affirment que, dès 1640, Descartes pressent le mécanisme de l'action réflexe dans un schéma où est explicitée la marche des esprits animaux responsables du mouvement de retrait accompli par un homme qui se brûle. « Si le feu se trouve proche du pied les petites parties de ce feu [...] ont la force de mouvoir avec soi l'endroit de la peau de ce pied qu'elles touchent ; et par ce moyen tirant le petit filet que vous voyez y être attaché, elles ouvrent au même instant l'entrée du pore contre lequel ce petit filet se termine : ainsi que, tirant l'un des bouts d'une corde, on fait sonner en même temps la cloche qui pend à l'autre bout. Or l'entrée du pore étant ainsi ouverte, les esprits animaux de la concavité entrent dedans et sont portés par lui, partie dans les muscles qui servent à retirer ce

piéd de ce feu, partie dans ceux qui servent à tourner les yeux de la tête pour le regarder, et partie en ceux qui servent à avancer les mains et à plier tout le corps pour le défendre » (Descartes, *Traité de l'Homme*). Pour Descartes, la contraction est provoquée par les esprits animaux qui se déplacent dans les nerfs à la façon d'un courant d'air. Ces esprits animaux proviennent du cœur et transitent par le cerveau. Quand la traction des filets nerveux ouvre les pores de la cavité cérébrale, les esprits s'engagent dans les nerfs et viennent gonfler le muscle.

Cependant, d'autres historiens de la physiologie estiment avec G. Canguilhem qu'il est abusif de vouloir prêter à Descartes l'anticipation du concept de réflexe « que les idées fondamentales de son anatomie et de sa physiologie lui interdisaient de former » (G. Canguilhem, *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*, p. 42). Pour démontrer sa thèse, Canguilhem analyse minutieusement l'article 36 des *Passions de l'âme* de Descartes, où l'on trouve les mots « esprits réfléchis » pour qualifier la réflexion d'une image optique au niveau de la glande pinéale. Le texte de Descartes fait référence au réfléchissement de l'image optique d'une « figure fort étrange et fort effroyable » par la glande pinéale « qui excite en l'âme la passion de la crainte, et ensuite celle de la hardiesse, ou bien celle de la peur et de l'épouvante, selon les divers tempéraments du corps ou la force de l'âme ». Canguilhem croit pouvoir constater que l'exemple invoqué par Descartes dans *Les passions de l'âme* n'est pas celui d'un réflexe. Il s'agit d'une conduite affectant la totalité du corps et non d'un mouvement segmentaire. De plus, on a affaire à une conduite dans laquelle la réaction n'est pas univoquement déterminée et uniforme chez tous les sujets et dans tous les cas. Descartes est-il oui ou non un précurseur du concept de réflexe ? La réponse positive ou négative qui est donnée à cette question dépend des critères plus ou moins stricts que l'on retient pour définir la notion de réflexe. La volonté de faire ou de ne pas faire de Descartes un précurseur dépend donc aussi de motivations idéologiques. Nous reviendrons sur ce point plus loin. En bref, si on peut créditer Descartes d'avoir conçu l'ébauche de la notion de mouvement réflexe, il faut néanmoins reconnaître que son approche théorique du concept de réflexe ne préfigure guère les futures théories des physiologistes du XVIII^e et du XIX^e s.

La théorie de Descartes postulant le « gonflement » des muscles est bientôt infirmée par Jan Swammerdam (1637-1680). Par des expériences d'immersion de muscles isolés dans l'eau, le naturaliste hollandais montre que, lors de la contraction, le muscle change de forme mais garde le même volume. Un muscle excité directement peut aussi se contracter même après section du nerf. Francis Glisson (1597-1677) introduit à ce propos la notion d'irritabilité, définie comme une propriété qui permet à la fibre musculaire de réagir suite à un stimulus direct indépendamment du reste de l'organisme. Cette notion sera

reprise et développée par Albrecht von Haller (1708-1777).

Le médecin et anatomiste anglais Thomas Willis (1621-1675) introduit le terme de réflexe sous sa forme latine de *motus reflexus*. Selon lui, une partie des informations sensorielles transportées par les esprits animaux peut être réfléchie vers les muscles pour provoquer un mouvement. Alors que l'on ne trouve qu'une fois les mots « esprits réfléchis » dans l'œuvre de Descartes, on trouve abondamment l'expression *motus reflexus* dans les écrits de Willis. Pour Canguilhem, c'est Willis qui, le premier, a formé le concept de mouvement réflexe. Willis conçoit en effet le double mouvement de propagation centripète et centrifuge des esprits animaux « non seulement à l'image de la lumière, mais à l'image de tout phénomène susceptible d'inversion par réflexion, à l'image des ondes à la surface de l'eau comme à l'image du son et de l'écho » (G. Canguilhem, *op. cit.*, p. 66). Influencé par les iatrochimistes, Willis assimile les esprits animaux à une substance inflammable, explosive et élastique qui se propage de l'encéphale vers le muscle comme un rayon lumineux. En produisant un mélange détonant avec le sang artériel qui baigne les organes périphériques, les esprits animaux déclenchent une explosion intramusculaire à l'origine de la contraction. Pour illustrer sa définition, Willis choisit l'exemple du réflexe de grattage : « [...] Le mouvement est réfléchi, c'est-à-dire tel que dépendant immédiatement d'une sensation antécédente [...], il est retourné instantanément vers son point de départ. C'est ainsi qu'un léger chatouillement de la peau provoque le grattage de celle-ci [...] » (T. Willis, *De motu muscularis*). Le même exemple sera repris par le neurophysiologiste C.S. Sherrington dans son maître-ouvrage de 1906 où il accorde de longs développements à la notion de *scratch reflex*. Willis distingue deux types de mouvements : un « mouvement spontané » qui procède du cerveau avec conscience de l'initiative ; un mouvement naturel ou involontaire qui dépend du cervelet. Le mouvement réflexe dépend du cerveau s'il est volontaire ; du cervelet, s'il est involontaire. Le point de réflexion de l'influx des esprits animaux est donc encore situé, par Willis, dans les régions supérieures du système nerveux, au niveau du cervelet ou du cerveau. La réflexion de l'impression sensible vers la périphérie est censée ne s'opérer qu'au niveau de l'encéphale. Dans cette perspective, tout réflexe dépend de l'intégrité anatomique du système nerveux central. Une telle hypothèse sera reprise au XVIII^e s. par Jean Astruc (1684-1766) qui admet la réflexion des esprits sur un obstacle intracérébral. Ce mécanisme de réflexion localisé au niveau des régions cérébrales supérieures rend difficile l'explication des mouvements des membres observés chez des animaux décapités. Depuis la Renaissance jusqu'au XVIII^e s., le cerveau est donc considéré comme le siège du contrôle de l'ensemble de la motricité. Pour Canguilhem, la révolution copernicienne dans la physiologie du mouvement correspond à la dissociation des notions de cerveau et de centre

sensori-moteur et à la formation d'un concept de réflexe accordant un rôle-clé à la moelle épinière.

Au cours du XVIII^e s., le concept de mouvement réflexe se lève d'un poids croissant d'observations qui commencent à accorder à la moelle un rôle privilégié. L'étude de la contraction musculaire constitue en effet un des principaux centres d'intérêt des physiologistes du XVIII^e s. La grenouille devient l'animal de prédilection pour l'expérimentation dans le domaine des fonctions sensori-motrices. Les batraciens et les reptiles sont utilisés comme objets d'expériences. Les livres de physiologie du siècle des Lumières se peuplent de grenouilles, de vipères, de salamandres et de lézards. Robert Whytt (1714-1766), professeur à Edimbourg, est un des premiers à apporter des faits expérimentaux en rapport avec la fonction de la moelle épinière dans l'élaboration du mouvement réflexe : « Lorsqu'on blesse les pattes de derrière d'une grenouille, immédiatement après lui avoir coupé la tête, il ne se fait aucun mouvement dans les muscles de la jambe [...]. Mais quand on serre fortement une des pattes ou qu'on la blesse avec un canif, dix ou quinze minutes après que la tête de la grenouille a été coupée, il survient, pour l'ordinaire, les plus fortes convulsions, non seulement dans les jambes et dans les cuisses, mais encore dans le tronc et le corps proprement dit » (R. Whytt, *Traité des maladies nerveuses, hypochondriaques et hystériques*, Paris, Didot, 1777, p. 50-51). De plus, il constate que le mouvement réflexe est aboli chez l'animal décapité après destruction de la moelle de l'épine. L'impression sensible gagne le *sensorium commune* - localisé non plus seulement dans le cerveau mais aussi dans la moelle épinière - avant d'engendrer la contraction musculaire. Rattaché à la tradition animiste, Whytt pense encore que les mouvements sont des actions de l'âme en faisant dépendre le réflexe d'un principe sentant, circulant dans le cerveau, la moelle et les nerfs.

La notion de réflexe se précise avec l'Allemand Johann August Unzer (1727-1799) et le Pragois Georges Prochaska (1749-1820). Unzer forge la notion de phénomènes excito-moteurs dus à des impressions sensibles non senties, à des excitations sensorielles qui ne deviennent pas conscientes parce qu'elles n'atteignent pas le cerveau. L'impression sensorielle d'origine extérieure est transmise à la moelle épinière où un centre sympathique avant d'être réfléchi vers le muscle.

En 1784, Prochaska présente le réflexe comme un comportement observé en réaction à une excitation. Il compare le réflexe à un faisceau lumineux qui est réfléchi sur un miroir. Le nerf sensitif, coupé du cerveau et le nerf moteur inséré sur le muscle peuvent, par leur liaison dans le *sensorium commune*, transformer une impression en mouvement. Ce réflexe dépend d'une *vis nervosa*, une force nerveuse qui est propre à toute fibre nerveuse en relation avec le *sensorium commune* qui siège dans le bulbe rachidien et la moelle épinière. La preuve en est la persistance l'excitabilité du mouvement au dessous de la section chez la grenouille dont on a sectionné la moelle dorsale. Les

réflexes participent au principe de conservation du vivant : réactions de défense, d'écartement, de suppression de l'excitation douloureuse. Prochaska entrevoyait ainsi la notion d'homéostasie qui sera développée plus tard par Claude Bernard puis par Walter Cannon. Aux confins des XVIII^e et XIX^e s., le concept de réflexe est déjà bien circonscrit. Dans *La formation du concept de réflexe*, Canguilhem propose une définition historique récapitulative de la notion de réflexe telle qu'elle est envisagée en 1800, en indiquant les auteurs qui ont contribué à éclaircir la question : « Le mouvement réflexe (Willis) est celui qui, immédiatement provoqué par une situation antécédente (Willis), est déterminé selon des lois physiques (Willis, Astruc, Unzer, Prochaska) par la réflexion (Willis, Astruc, Unzer, Prochaska) des impressions nerveuses sensibles en motrices (Whytt, Unzer, Prochaska) au niveau de la moelle épinière (Whytt, Prochaska, Legallois), avec ou sans conscience concomitante (Prochaska) » (G. Canguilhem, *op. cit.*, p. 131).

Affinement du concept de réflexe au début du XIX^e s.

Chez les physiologistes du XIX^e s., le concept de réflexe trouve une consolidation expérimentale systématique. Dans les premières années de ce siècle, Legallois (1770-1814) confirme de façon expérimentale les vues de Whytt et de Prochaska concernant le rôle de la moelle épinière. Expérimentateur talentueux, Legallois établit pour la première fois que chaque segment de la moelle fonctionne comme un centre propre à la région dont il coordonne la sensori-motricité. En 1822, Magendie définit le rôle des diverses régions de la moelle épinière et établit le sens de la circulation de l'information dans les nerfs. La racine spinale antérieure est motrice : stimulée, elle produit de fortes contractions musculaires. La racine spinale postérieure est sensitive : si on la pique, l'animal manifeste de la douleur. Charles Bell s'engage dans une longue polémique et revendique la priorité de la découverte sur les nerfs spinaux. Dans un texte non publié de 1911, Bell avait montré la nature motrice des racines antérieures et la nature non-motrice des racines postérieures. On parle aujourd'hui de la loi de Bell et Magendie pour désigner la circulation des influx afférents et efférents dans la moelle épinière. En 1832-1833, Marshall Hall (1790-1857) et J. Müller (1801-1858) redécouvrent l'importance du phénomène réflexe. Pour Hall, les nerfs spinaux et la moelle forment un système indépendant constitué d'une branche excitatrice, d'un relais spinal et d'une branche motrice. Mais après la parution de son mémoire sur *La fonction réflexe du bulbe et de la moelle épinière*, on reproche à Hall de n'avoir pas cité ses sources (dans son ouvrage, Hall ne fait notamment aucune allusion aux travaux de Prochaska) et de n'avoir rien apporté de vraiment original à la théorie du réflexe. Ce conflit a pour toile de fond l'opposition idéologico-philosophique entre mécanisme et vitalisme. J.D. George, président de la Société de médecine de l'University

College de Londres montre que Hall a tiré grand parti des théories de ses prédécesseurs, et en particulier de celles de Prochaska. C'est à la suite de cette polémique que Prochaska est tiré de l'ombre. Des physiologistes comme Pflüger le placent au premier rang des précurseurs de l'étude du réflexe. Mais l'ampleur croissante de la renommée de Prochaska, dont les thèses ont un relent vitaliste, ne plaît pas aux partisans de l'école mécaniste en physiologie. Émile Du Bois Reymond (1818-1896), prestigieux spécialiste de la physiologie neuromusculaire, mais défenseur acharné du déterminisme mécaniste, réduit le prestige de Prochaska en considérant Descartes comme étant le premier à avoir décrit le mouvement réflexe. Du Bois Reymond préfère donner à Descartes, théoricien de l'animal-machine, la paternité du concept de réflexe plutôt que de la laisser à Prochaska dont les théories sur la *vis nervosa* sont teintées d'animisme. L'historique du réflexe est donc un terrain propice aux luttes scientifico-idéologiques. Un siècle plus tard, G. Canguilhem mettra en doute l'apport théorique du mécaniste Descartes à la notion de réflexe pour valoriser les travaux du iatrochimiste Willis et du vitaliste Prochaska.

En 1844, Rudolph Wagner (1805-1864) propose un schéma d'arc réflexe représentant le fonctionnement de l'organe électrique de la torpille qui dépend de deux cellules connectées : une cellule sensorielle et une cellule motrice. En 1853, E. Pflüger formule les lois longtemps classiques du réflexe (unilatéralité, symétrie, irradiation, généralisation) dans son ouvrage *Les fonctions sensitives de la moelle épinière des vertébrés*. Pour Hall, Magendie et la plupart des physiologistes de la première moitié du XIX^e s., le réflexe est un mécanisme rigide, uniforme, strictement déterminé. Cette conception va être remise en question par de nouveaux travaux expérimentaux qui vont montrer la modulation du réflexe par les régions supérieures du système nerveux. Mais, entre-temps, une vive controverse va s'engager autour des thèses de Eduard Pflüger relatives à la nécessité d'une activité consciente, intentionnelle ou spirituelle dans l'élaboration du réflexe.

Les expériences de Pflüger sur l'importance psychique des centres de la moelle épinière

Avec E. Pflüger (1829-1910), le débat reprend une orientation polémique. Il se demande si le réflexe ne joue pas un rôle dans l'homéostasie en produisant des comportements de défense de nature intentionnelle. Si la grenouille décapitée retire la patte, c'est pour la soustraire au stimulus nociceptif. Pflüger montre que des grenouilles et d'autres animaux décapités, même des queues de lézard séparées du corps, continuent à faire des mouvements auxquels nous ne pouvons, selon lui, refuser le caractère de la finalité. L'activité réflexe serait guidée par une conscience médullaire du but à atteindre. Dans l'expérimentation qu'il imagine, une grenouille décapitée reçoit une goutte d'acide sur le dos ou sur le haut de la cuisse. Par un mouvement

réflexe, la patte essuie la goutte. Mais, si on lui coupe alors cette patte, elle essaye d'abord avec le moignon et, après plusieurs tentatives inutiles, elle finit par prendre la patte opposée et exécute avec elle le mouvement. Ce n'est plus là, nous dit Pflüger, un simple mouvement réflexe. La grenouille paraît délibérer et conclure qu'avec une patte elle ne peut plus atteindre son but. Aussi essaye-t-elle d'y arriver avec l'autre. Pour l'expérimentateur, cette action orientée vers un but démontre qu'il y a une « âme » de la moelle épinière, que la moelle épinière peut penser. La grenouille tout entière est donc représentée dans sa moelle épinière. En cet organe, elle pense et se décide comme peuvent le faire les grenouilles. Des physiologistes vont contester les conclusions de Pflüger et procéder à d'autres expériences pour démontrer qu'il n'y a pas de conscience au niveau médullaire. Ainsi que le raconte délicieusement l'historien du matérialisme F.-A. Lange, « un adversaire scientifique (de Pflüger) prend alors une malheureuse grenouille, la décapite et la fait cuire lentement. Pour que l'expérience soit complète, il faut faire cuire en même temps une autre grenouille non décapitée, et qu'une troisième grenouille, celle-ci décapitée, soit placée près du vase afin d'obtenir une comparaison exacte. Or il arrive maintenant que la grenouille décapitée se laisse cuire sans résister à son malheur comme son compagnon d'infortune plus complet. Conclusion : il n'y a pas d'âme de la moelle épinière ; car, s'il y en avait une, elle aurait dû s'apercevoir du danger résultant de la chaleur croissante et penser à s'enfuir ! Les deux conclusions sont également logiques ; cependant l'expérience de Pflüger est plus importante, plus fondamentale. Que l'on élimine la personification ; que l'on renonce à chercher partout dans les membres de la grenouille des grenouilles qui pensent, sentent et agissent ; que l'on cherche au contraire à expliquer le fait par d'autres faits plus simples, c'est-à-dire par des mouvements réflexes, non par l'ensemble, par l'âme inexplicable. Alors on arrivera aisément à constater qu'il existe dans ces enchaînements déjà si compliqués de sensation et mouvement un commencement d'explication des activités psychiques les plus compliquées. Telle serait la voie à suivre » (F.A. Lange, *Histoire du matérialisme et critique de son importance à notre époque*). La conception de Pflüger d'une moelle consciente crée une vive controverse dans le monde des physiologistes. Les partisans de Pflüger s'opposent à ceux de R.H. Lotze pour qui la thèse d'une moelle consciente est inacceptable. C'est cette dernière thèse qui finira par s'imposer à la fin du XIX^e s.

Réflexes et niveaux d'intégration

La conception moderne qui intègre le réflexe à l'ensemble du système nerveux et au fonctionnement global de l'organisme s'est lentement imposée à partir de la seconde moitié du XIX^e s. Influencé par les doctrines du philosophe évolutionniste Herbert Spencer, le neurologue Hughlings Jackson pense que le trouble

neurologique constitue une « dissolution ». c'est-à-dire un processus de régression qui ramène le comportement à des formes plus automatiques, plus simples, plus rigides. Ainsi, une destruction du cortex cérébral moteur provoque une paralysie des membres du côté opposé, symptôme positif marquant la dissolution. Cette dissolution du niveau supérieur de comportement provoque une libération du niveau inférieur qui se traduit par une exagération de certains réflexes spinaux. De son côté, Johann Setchenov (1829-1905), professeur de physiologie à Moscou, constate que le réflexe de retrait de la patte chez la grenouille est augmenté après section du tronc cérébral. Le système nerveux central doit donc exercer une influence inhibitrice sur les réflexes spinaux. Setchenov crée ainsi le concept d'inhibition en neurologie. Il considère aussi le réflexe comme « un comportement adaptatif guidé par l'instinct de conservation ». La modulation des réflexes par des centres nerveux hiérarchiquement supérieurs mise en évidence par Jackson et Setchenov conduit à la notion d'intégration qui est au cœur de l'œuvre du neurophysiologiste britannique Charles Scott Sherrington (1857-1972). Avec son ouvrage *The Integrative Action of Nervous System*, il ouvre l'ère moderne de l'étude des réflexes. Le réflexe n'est pas un mécanisme isolé. Les structures nerveuses supérieures peuvent contrôler et modifier les activités réflexes médullaires. Les processus associés d'inhibition et d'excitation interviennent dans l'ajustement biologique de l'organisme à tous les niveaux d'intégration.

Les réflexes conditionnés et les bases neurales de l'apprentissage

La notion de réflexe est à la base des théories de Ivan Petrovitch Pavlov (1849-1936). Le physiologiste russe distingue des réflexes innés caractéristiques de l'espèce et des réflexes conditionnés qui sont acquis individuellement. Ces réflexes conditionnés apparaissent lorsqu'un stimulus indifférent agit dans le même temps qu'un excitant absolu du réflexe. Après plusieurs actions simultanées de l'excitant absolu et de l'agent indifférent, l'agent indifférent devient à lui seul capable de provoquer le réflexe. B.F. Skinner montre qu'une réponse à un stimulus conditionnel peut être aussi renforcée par ses propres conséquences : c'est le conditionnement opérant.

Selon Pavlov et Skinner, l'apprentissage résulte d'associations, c'est-à-dire de la jonction régulière de deux phénomènes étroitement associés dans le temps, qu'il s'agisse de sonnerie et de nourriture, ou d'appui sur un levier et d'aliments.

En 1913, John Watson, créateur du béhaviorisme, avance la thèse surprenante que le comportement n'a aucune cause mentale. Pour ce psychologue, le comportement d'un individu n'est rien d'autre que l'ensemble de ses réactions à des stimuli. Toute analyse introspective de l'esprit doit donc être rejetée : il faut se borner à recenser les lois déterminant les relations causales entre stimuli et réponses comportementales.

Le comportement doit être décrit à partir du modèle des réflexes conditionnés. Niant l'existence du mental, Watson, en béhavioriste radical, considère qu'il n'y a plus à expliquer la nature de la relation cerveau-esprit puisque, de son point de vue, cette relation n'existe pas. Cette conception qui constitue la théorie matérialiste de l'esprit par excellence a eu un succès considérable jusque dans les années 1950. À cette époque, par réaction aux lacunes manifestes du béhaviorisme radical considérant l'esprit comme une boîte noire, de nouvelles théories matérialistes de l'esprit qui intègrent la notion de causalité mentale sont apparues.

L'associationnisme inhérent aux théories de l'apprentissage de Pavlov et de Skinner fut intégré à la neurobiologie grâce au psychologue canadien Donald Hebb qui proposa une explication neuronale de l'associationnisme. Hebb essaya de comprendre les mécanismes neurophysiologiques du réflexe pavlovien classique du chien qui salive à l'audition d'une sonnerie. L'odeur et la vue de la nourriture activent des récepteurs sensoriels respectivement au niveau du nez et des yeux. Via les relais synaptiques, ces récepteurs activent des neurones des cortex visuel et olfactif, lesquels envoient à leur tour des messages aux glandes salivaires, activant ainsi la salivation. Lorsque la sonnerie retentit juste avant la présentation de la nourriture, les messages visuels et auditifs arrivent plus ou moins simultanément au niveau des neurones corticaux. Les signaux d'origine visuelle sont déjà capables par eux-mêmes de déclencher l'émission de potentiels d'action par les neurones corticaux. Selon Hebb, le couplage fréquent des deux messages dans un même neurone amène celui-ci à être suffisamment activé pour que cela consolide les synapses de la voie auditive. Ultérieurement, le signal auditif peut isolément provoquer le déclenchement des potentiels d'action des neurones corticaux et, indirectement, l'activation de la glande salivaire.

Hebb postule qu'une activité répétée tend à induire des changements cellulaires durables qui ont pour effet d'augmenter la facilité à déclencher des potentiels d'action. « Quand l'axone d'une cellule A est assez proche spatialement d'une cellule B pour l'exciter et qu'il participe fréquemment ou constamment au déclenchement de ses potentiels d'action, des processus de croissance ou des changements métaboliques prennent place dans l'une ou l'autre des cellules de telle sorte qu'est accrue l'efficacité de A à déclencher les potentiels d'action de B » (D. Hebb, *The Organization of Behaviour*, 1949, p. 62). Des changements analogues à ceux imaginés par Hebb ont été identifiés sur des organismes comme l'aplysie, une limace marine qui possède un système nerveux élémentaire. Le neuroscientifique américain E. Kandel a étudié, chez cet animal, un réflexe élémentaire, celui de la rétraction de la branchie et du siphon pouvant présenter des phénomènes d'habituation et de sensibilisation. Dans les années 1980, des chercheurs obtiennent la preuve d'un conditionnement classique prenant pour base les réflexes de rétraction de la branchie et du

siphon. Le stimulus inconditionnel est constitué par un choc de forte intensité sur la queue qui engendre un puissant retrait de la branchie et du siphon. Le stimulus inconditionnel est couplé à un stimulus conditionnel, consistant à toucher légèrement le siphon, qui, normalement, n'engendre qu'une réaction modérée de rétraction de cet organe. Après association répétée, le stimulus conditionnel provoque lui aussi une puissante rétraction. Les scientifiques travaillant sur l'aplysie soutiennent que le substrat neuronal de ce comportement peut être isolé au sein de l'animal : il s'agit de la connexion synaptique directe entre les neurones sensoriels et moteurs. Comme le constate le neurobiologiste britannique Steven Rose, la plupart des chercheurs qui travaillent en neurophysiologie sont persuadés qu'il se produit dans les réseaux nerveux quelque chose de similaire à ce que Hebb a suggéré. L'aspect attrayant du modèle de Hebb est qu'il semble offrir une traduction directe du phénomène d'association observé dans le domaine comportemental – le conditionnement classique – en termes de mécanisme neuronal.

► BRAZIER M.A.B., *A History of Neurophysiology in the 19th Century*, New York, Raven Press, 1988, p. 120-155 ; *A History of Neurophysiology in the 17th and 18th Centuries*, New York, Raven Press, 1988. – CANGUILHEM G., *La formation du concept de réflexe aux XVII et XVIII siècles*, Paris, PUF, 1955. – DESCARTES R., *Œuvres complètes*, éd. Adam & Tannery, Paris, Le Cerf, 12 vol., 1897-1910. – FEARING F., *Reflex Action : A study in the history of physiological psychology*, New York, Hafner Publ. Co, 2^e éd., 1964. – FINGER S., *Origins of Neuroscience*, New York, Oxford Univ. Press, 1994. – HEBB D., *The Organization of Behaviour* (1949). – JEANNEROD M., *Le cerveau-machine*, Paris, Fayard, 1983 ; *De la physiologie mentale*, Paris, Odile Jacob, 1996. – LANGE F.A., *Histoire du matérialisme et critique de son importance à notre époque*, Paris, Librairie Schleicher Frères, 1910. – LEGALLOIS C., *Expériences sur le principe de la vie*, Paris, A. Delahays, 1855. – PAVLOV I.P., *Les réflexes conditionnés. Étude objective de l'activité nerveuse supérieure des animaux*, Paris, PUF, 1927. – PROCHASKA J., *De functionibus systematis nervosi commentatio*, Prague, Gerbe, 1784. – ROSE S., *La mémoire. Des molécules à l'esprit*, Paris, Le Seuil, 1994. – SHERRINGTON C.S., *The Integrative Action of the Nervous System*, Londres, A. Constable, 1906. – SKINNER B.F., « The concept of the reflex in the description of behavior », *Journal of General Psychology*, 1931, 20, p. 427-458. – SOURY J., *Le système nerveux central*, Paris, Carré & Naud, 1899. – WATSON J.B., *Behavior : An Introduction to Comparative Psychology*, New York, Hornstein, 1967. – WHITT R., *Traité des maladies nerveuses, hypochondriaques et hystériques*, Paris, Didot, 1777. – WILLIS T., *Copera Omnia*, Lyon, 2 vol., 1681.

Jean-Noël Missa

→ Neurone : Pavlov ; Sherrington.

RÉFUTABILITÉ

Les Grecs inventèrent plusieurs techniques de réfutation : *modus tollens*, preuve par l'absurde, régression à l'infini. Ces techniques étaient avant tout dialogiques : dialoguer, c'est discuter une thèse, l'un cherchant à la

défendre, l'autre à la réfuter. L'idée de réfutation par des contre-exemples est familière à tout lecteur des dialogues socratiques. Un contre-exemple a une tout autre force logique qu'un exemple. On sait depuis Aristote que « la vérité de la conséquence n'entraîne pas celle de l'hypothèse » (*Physique*, II, 200a). Une hypothèse fautive a des conséquences fausses et des conséquences vraies (en nombre infini), alors qu'une hypothèse vraie n'a que des conséquences vraies. Le vrai et le faux sont asymétriques. L'exemple conforte, le contre-exemple tue. Si une hypothèse a une conséquence fautive, elle ne saurait être vraie. La vérité se transmet des prémisses à la conclusion, la fausseté se retransmet de la conclusion à l'une au moins des prémisses. Si l'on pouvait décider de la vérité des prémisses indépendamment des conclusions, on pourrait établir un système *more geometrico*, en ne se souciant que de la rigueur des inférences. Quand on est dans le vrai, on y demeure par déduction. Il serait inutile de contrôler la vérité des conséquences. Mais si l'on ne peut décider de la vérité des prémisses, il ne nous reste qu'à examiner rigoureusement certaines de leurs conséquences, en particulier celles qui se prêtent à la confrontation avec l'expérience. En dehors des mathématiques, la cohérence ne suffit pas : il existe une infinité de théories cohérentes incompatibles susceptibles de rendre compte des mêmes données. Si nous ne nous contentons pas de croire, et si c'est la vérité qui nous intéresse, nous devons concentrer nos efforts sur l'examen des conséquences de nos croyances. Du fait de nos limites cognitives, nous ne pouvons en embrasser la totalité. Nos décisions ne peuvent être qu'unilatérales : la découverte d'une conséquence fautive permet de décider de la fausseté d'une au moins des prémisses, la découverte d'une conséquence vraie n'autorise qu'à continuer l'examen, même si elle peut être psychologiquement motivante. Nous pouvons nous tromper en affirmant que telle conséquence est fautive, mais si nous acceptons une certaine proposition, nous devons accepter comme vraies toutes ses conséquences et réputer fausses les propositions qui entraînent sa négation.

Les théories doivent pour être scientifiques avoir un rapport à l'expérience possible. Une hypothèse peut être vérifiée ou réfutée par l'expérience. Or, comme Hume y a insisté, aucune hypothèse universelle ayant un contenu prédictif ne peut être *stricto sensu* vérifiée par l'observation : son contenu parle précisément de ce que nous n'avons pas encore pu constater, et en dit infiniment plus que ce que nous pourrions jamais constater. Nos théories portent (en partie) sur l'avenir, et toute expérience est présente (ou passée). Le contenu des théories transcende fortement l'expérience, qui les « sous-détermine ». Elles ne sont qu'unilatéralement décidables, comme l'avait vu Pascal (*Lettre au P. Noël*). Que faire ? Soit considérer les théories comme non descriptives, ni vraies ni fausses : elles ne seraient que des instruments de prédiction d'énoncés singuliers vérifiables. On hésite à dire que « tous les corbeaux sont noirs », qui est invérifiable (cet énoncé

porte sur tous les corbeaux dans le passé et dans l'avenir, voire tous les corbeaux possibles), n'a aucune valeur de vérité et ne permet que d'inférer (de manière faillible !) « a est noir » à partir de « a est un corbeau ». Il est plus raisonnable de réduire nos règles d'inférence au minimum (*modus ponens*) et de maintenir que la connaissance a pour but d'engranger le plus de vérités universelles possibles. L'instrumentalisme fait le lit de l'anti-science, en suggérant que la science n'a pour ambition que la prédiction mécanique d'événements observables, et non le dévoilement progressif des secrets de la nature. Soit on affaiblit le principe de vérification en principe de confirmation (Carnap), et l'on doit s'atteler au programme délicat de la construction d'une « logique inductive probabilitaire ». La tendance majeure de la philosophie des sciences anglosaxonne contemporaine s'inscrit dans cette tradition, dans sa version dite bayésienne. Soit enfin on renonce à la vérification au profit de la seule capacité à être réfuté. Tel est le programme « négativiste » de Popper, anticipé en particulier par Peirce.

Les néopositivistes du Cercle de Vienne considéraient dans les années 1920 que seuls avaient du sens les énoncés analytiques et les énoncés empiriques, c'est-à-dire vérifiables par l'observation (en un nombre fini d'étapes). Popper propose dès 1933 de modifier ce programme sur deux points : d'une part, renoncer à l'idée que ce qui n'est ni logico-mathématique ni empirique est dénué de sens ; d'autre part, remplacer le critère d'empiricité des positivistes (la déductibilité à partir d'un nombre fini d'énoncés d'observation possibles) par le critère de falsifiabilité (réfutabilité empirique, testabilité), qui a l'avantage de ne pas exclure toutes les théories universelles. Ce choix conduit à réhabiliter partiellement la « métaphysique », condamnée à mort par Wittgenstein et les positivistes. Le sens excède le rapport à l'expérience possible. Le critère de démarcation ne constitue donc pas une théorie de la signification, mais une théorie de l'expérience. Une hypothèse est empiriquement informative si et seulement si elle est incompatible avec au moins un énoncé d'observation possible. Un système théorique T peut être conjoint à des conditions initiales empiriques c, de telle manière que (T et c) implique une prédiction empirique e. T implique (c implique e), et est incompatible avec (c et non-e), qui en constitue un falsificateur potentiel (FP). Plus la classe des FP de T est grande, plus T est potentiellement informative, plus elle est falsifiable. Une théorie est scientifique si elle prend le risque d'être rejetée par des arguments empiriques. L'exigence d'augmentation du contenu informatif équivaut à celle d'augmentation du nombre de FP : « Plus un énoncé interdit, plus il dit. » Cette augmentation procède de deux manières : croissance de la précision (par la mesure), progrès en généralité, que Popper caractérise comme « voie quasi-inductive de la science » : il n'a jamais nié que nous ayons raison de tenter de généraliser nos hypothèses. Mais « toute généralisation est une hypothèse » (Poincaré), laquelle doit être soumise à la critique : or critiquer une position

ne peut se faire que sur la base de ses conséquences déductives, et non de ses supposées conséquences inductives. La démarche de la science n'est pas passivement et répétitivement inductive, elle est « sauvagement spéculative » (Einstein), critique, polémique et hypothético-déductive. Le but de la science n'est pas de mesurer la justification de nos croyances, mais de produire des théories vraies pour expliquer le réel. Ce n'est du reste pas la réfutation qui compte, c'est l'hypothèse : nous apprenons par nos erreurs, mais le contenu de notre savoir vient de nos conjectures théoriques.

La réfutabilité, comme la fausseté, ne se transmet pas nécessairement par déduction : du réfutable, de l'irréfutable s'ensuit ; mais elle est retransmissible de la conséquence au système des prémisses. Une théorie réfutable peut être affaiblie si l'on ne retient que certaines de ses conséquences irréfutables. « Éliminer la métaphysique » reviendrait à réputer dénuée de sens une infinité de conséquences non tautologiques de toute théorie scientifique. On ne peut isoler déductivement l'empiricité. Accepter la réfutabilité comme critère d'empiricité et la clôture déductive (toute conséquence d'un énoncé lui appartient) implique que le sens ne peut être réduit à l'empirique. On ne peut pas être falsificationniste et positiviste à la fois. Certains énoncés sont à la fois universels et existentiels. Ils ne sont donc ni vérifiables ni réfutables. « Tout a une raison d'être » est de ce type, clairement métaphysique. Si l'on désire rendre ces énoncés scientifiques, il conviendra de les renforcer en bornant le domaine spatio-temporel du quantificateur existentiel. « Tous les hommes sont mortels » est non réfutable : il équivaut à « Pour tout homme, il existe une date à partir de laquelle il n'est plus en vie ». Mais cet énoncé formellement métaphysique est la conséquence de l'énoncé logiquement plus fort : « Aucun homme ne vit plus de cent trente ans », qui est réfutable. La science a des implications métaphysiques. Ainsi, des principes non réfutables peuvent avoir une valeur heuristique, en suggérant par exemple le type de mécanismes causaux qu'une théorie scientifique est supposée exhiber. Les théories construites selon les préceptes d'un « Programme métaphysique de recherche », selon l'expression de Popper, devront se conformer à ses requisits, par exemple ceux du mécanisme cartésien. Lakatos insistera sur ce point, en proposant d'appeler « scientifique » le programme, ce qui l'amènera à récuser le critère de démarcation de son maître.

Le falsificationnisme se heurte à plusieurs difficultés. 1) Duhem avait mis en évidence les difficultés de la réfutation en physique : si une théorie est réfutée, l'expérience ne dit pas « où gît l'erreur », car on teste toujours des systèmes d'hypothèses. Le falsificationnisme naïf, au sens de Lakatos, est intenable. L'*experimentum crucis* de Bacon n'est pas une preuve par l'absurde de l'une des hypothèses en présence : les théories concurrentes sont incompatibles, mais pas contradictoires. Cela ne réfute cependant pas le falsificationnisme « non naïf » (ce n'est jamais un énoncé isolé qui est réfuté), et renforce le faillibilisme : décider

quelle partie de la théorie doit être conservée et quelle partie doit être abandonnée est toujours risqué, et rien (pas même une « logique non monotone ») ne saurait remplacer le débat critique entre scientifiques pour prendre ce type de décisions, dont certaines peuvent amener à mettre en cause des principes auparavant jugés irrésistibles. Bien des révolutions scientifiques sont le résultat de telles « sorties par le haut » de situations duhémiennes. Mais en science comme en droit, des erreurs judiciaires sont toujours possibles. Quine a étendu ce « révisionnisme » aux principes logiques, car pour lui tout est continu dans notre savoir : Popper préférerait soutenir qu'il ne serait pas rationnel d'affaiblir la logique classique dans les sciences empiriques, car cela reviendrait à affaiblir nos normes de critiquabilité.

2) Une prédiction de nature probabiliste ne saurait être réfutée par un nombre fini d'observations. Il faut se donner des règles qui restreignent les observations de fréquences atypiques acceptables. Popper consacra de longs développements à cette question. Elle demeure ouverte, mais il est clair que des décisions conventionnelles sont nécessaires. Les statisticiens ne considèrent pas comme irrationnelles leurs décisions d'abandonner telle ou telle hypothèse. Les bayésiens jugent toutefois que ce problème est fatal au falsificationnisme, et qu'il faut retrouver ce que celui-ci a de juste dans le cadre de la théorie subjective des probabilités.

3) Il est possible de « protéger » une théorie de la réfutation, si l'on se donne par exemple le droit de changer le sens des termes ou d'introduire des hypothèses *ad hoc*, qui autorisent à attribuer l'apparente réfutation à l'intervention d'éléments inaccessibles au contrôle empirique. Ce genre de « stratégies immunisantes » revient à subrepticement changer de théorie. Popper stipule que les règles du jeu doivent être fixées de telle manière que l'on se prive de la possibilité d'user de telles parades. Il ne faut pas pouvoir « gagner quoi qu'il arrive » dans le jeu avec la nature. La théorie de la méthode est donc une critique des usages dialectiques de la raison dans les sciences. Selon Popper, son critère provient d'une réflexion (1919) sur la différence de statut méthodologique entre la physique d'une part et le marxisme et la psychanalyse d'autre part. Marxistes et psychanalystes auraient trop tendance à faire appel à des stratégies immunisantes pour sauver leurs théories, capables dès lors d'expliquer « tous les événements possibles, alors qu'en réalité leurs théories sont trop faibles pour exclure des événements possibles. Quel que soit le comportement d'un individu, il est compatible avec l'explication psychanalytique de son comportement antérieur. Grünbaum a argué au contraire que la psychanalyse était réfutable, mais qu'elle ne se conformait pas aux critères (confirmationnistes) du bayésianisme. Selon Popper, une pseudo-science est prédictive, et donc en principe réfutable, mais ses partisans n'adoptent pas une attitude critique face à leur théorie lorsqu'elle est réfutée, car ils ne prennent pas les réfutations au sérieux. Si l'on montre que la psychanalyse est réfutable et non réfutée, c'est un argument

en sa faveur, plutôt que contre la réfutabilité.

4) Le problème de la base empirique. La relation de réfutabilité est une relation logique entre des énoncés, mais elle comprend une référence anthropologique à la notion d'observation, qui ne saurait être définie formellement. Plus proche sur ce point de Neurath que de Schlick, Popper proposa dès 1932 de n'accorder le statut d'énoncés de base (capables de réfuter une théorie) qu'à des énoncés singuliers décrivant le comportement macroscopique d'objets physiques situés, intersubjectivement détectables par les sens. Les scientifiques s'accordent « conventionnellement » sur certains énoncés à un moment donné, même s'il demeure toujours possible de les soumettre à l'examen critique. Sans ce consensus sur les énoncés de base, la science serait impossible. La différence de cette approche d'avec celle de Neurath ne sera manifeste qu'à partir du moment (1935) où, sous l'influence de Tarski, Popper fera clairement dépendre sa théorie d'une conception objectiviste et absolutiste de la vérité. Le consensus autour des énoncés d'observation se fait à la lumière de l'idée de vérité. Élie Zahar a cependant objecté à la théorie « conventionnaliste » de la base qu'elle risquait d'affaiblir le falsificationnisme, par excès de faillibilité. Se passer de tout psychologisme revient à tomber dans le sociologisme. Si les énoncés d'observation sont exprimés en langage physico-critique, ils transcendent le donné subjectif : ils sont faillibles et imprégnés de théorie, selon Popper. Pourquoi ne pas les refuser lorsqu'ils s'opposent à une théorie de haut niveau, également faillible ? Zahar propose une conception phénoménologique des énoncés de base, pour mettre un coup d'arrêt cartésien au scepticisme et empêcher que l'on puisse, tel Feyerabend, tirer des conséquences relativistes de la position conventionnaliste. Ce renforcement du falsificationnisme se fait au prix d'une complication du problème de Duhem : il faut ajouter aux théories des hypothèses psychophysiques faisant le lien entre le vécu de l'observateur et la théorie testée. Ce prix n'est pas trop fort selon Zahar, car il ne s'agit pas de revenir à une conception fondationniste ou réductionniste de type empiriste radical. La conséquence de ce retour partiel au psychologisme est que le réquisit de répétibilité et d'intersubjectivité n'est plus qu'une condition souhaitable, et non une condition nécessaire de l'objectivité. Robinson peut être objectif (alors que Popper pensait que cela relevait du miracle).

5) Le critère de réfutabilité paraît exclure certaines théories pourtant respectables, par exemple en économie ou en biologie. Il semble donc ne pas nous amener à un « équilibre réfléchi » satisfaisant. Popper a d'abord affirmé que la théorie darwinienne apparaissant peu ou pas testable, car très peu prédictive, il convenait de voir en elle un remarquable « programme métaphysique » au noyau quasi logique, et non une théorie scientifique *proprio sensu*. Il rejoignait en cela certains darwiniens qui critiquent le caractère quasi tautologique de la version « adaptationniste » de la théorie de l'évolution. Popper est revenu

RÉGULATION MOLÉCULAIRE

Le terme de régulation occupe une place centrale dans les concepts et modèles des biologistes contemporains. La régulation est devenue le fait biologique par excellence. En accord avec la vision actuellement dominante en biologie, cette régulation est située au niveau moléculaire. Les modèles de régulation sont le fruit des travaux réalisés par les biologistes moléculaires entre 1940 et 1960 et les principales caractéristiques en furent dessinées par François Jacob et Jacques Monod (1910-1976) entre 1960 et 1965. Nous n'évoquerons que rapidement les usages antérieurs du terme de régulation, qui seront développés plus longuement dans d'autres articles.

Une origine multiple

Le terme de régulateur, et non celui de régulation, fut utilisé pour désigner dès le XVIII^e s. un dispositif de contrôle du mouvement des machines. L'utilisation du terme en biologie résultera de l'assimilation analogique ou métaphorique de l'organisme à la machine (Canguilhem, 1977). C'est à Claude Bernard (1813-1878) qu'on doit attribuer la première démonstration claire de l'importance des régulations chez les êtres vivants – même s'il n'utilise pas lui-même le mot de régulation. Claude Bernard montre qu'une des caractéristiques fondamentales des êtres vivants est de maintenir constant le milieu intérieur dans lequel vivent les cellules de l'organisme (C. Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, Paris, 1878 ; nouv. éd., Paris, 1966). Le terme même de régulation va s'introduire peu à peu dans le vocabulaire des physiologistes à la fin du XIX^e s.

L'approche de Claude Bernard va être reprise et développée au début du XX^e s. par deux physiologistes de Harvard, Lawrence J. Henderson (1878-1942) et Walter B. Cannon (1871-1945) (Allen, 1978). Le premier, formé à la chimie physique, va caractériser les mécanismes qui maintiennent constante l'acidité (le pH) du sang. Il montre que cette régulation ne peut s'expliquer du seul point de vue physico-chimique, mais nécessite une appréhension globale de l'organisme. Il privilégie ainsi une approche matérialiste « holistique » des phénomènes observés chez les êtres vivants. Walter B. Cannon s'intéresse au phénomène de choc et au rôle des systèmes endocriniens et nerveux, et en particulier du système sympathique, dans l'adaptation des organismes vivants au stress. Il montrera que l'homéostasie, l'équilibre qui caractérise les êtres vivants, est un équilibre dynamique. De manière parallèle, l'importance des régulations dans le développement des organismes vivants va être démontrée par les travaux de Laurent Chabry (1855-1894), puis de Wilhelm Roux (1850-1924) et des autres biologistes qui vont fonder et développer la nouvelle discipline de l'embryologie expérimentale (ou mécanique). Enfin, la régulation occupe aussi une place importante dans les modèles élaborés par les biochimistes entre 1920 et

sur sa caractérisation du darwinisme comme « Programme », qui paraissait pouvoir affaiblir la position des darwiniens (face aux « créationnistes »). Le programme n'est pas lui-même réfutable, mais rien n'empêche que l'on puisse construire des théories darwiniennes réfutables. On peut voir dans cette situation l'indice d'une faiblesse du critère réfutationniste (qui serait trop exigeant), ou celui d'une difficulté propre des théories en question, qu'il conviendrait de rendre le plus possible testables, si l'on s'accorde à voir dans l'irréfutabilité un vice méthodologique. Quant aux théories économiques, elles sont souvent accompagnées d'une clause *ceteris paribus* (toutes choses égales par ailleurs), qui les protège de toute réfutation, car elle couvre un nombre indéfini de conditions initiales. Lakatos a argué que tel était aussi le cas des théories physiques. Si cela était vrai, on ne comprendrait pas comment une théorie pourrait prédire quoi que ce soit : toute déduction, et donc toute prédiction, comporte un nombre fini de prémisses (Zahar). Il faut finitiser les clauses *ceteris paribus*.

6) Selon Kuhn, la science n'est possible que dans le cadre de paradigmes non critiqués. Le réfutationnisme serait plutôt le propre des révolutionnaires, alors que la science, dans ses périodes normales, est conservatrice. Les scientifiques passent moins de temps à essayer de réfuter les théories qu'à les exploiter, ce qui est exact. Réfuter ses théories (ou celles de ses concurrents) n'est guère conforme à l'attitude scientifique, plus dogmatique que critique. Popper répond que la soumission aveugle aux paradigmes est dangereuse, que l'attitude audacieuse, inventive et critique dans le processus de résolution des problèmes (*problem solving*) est plus féconde que l'attitude conservatrice, et enfin que même la défense d'un paradigme est une activité légitime, puisqu'il faut critiquer la critique. Quant au passage d'un paradigme à un autre, Kuhn y voit un événement en grande partie irrationnel, alors que les réfutationnistes sont enclins à y voir un... paradigme de rationalité critique.

► BOYER A., *Introduction à la lecture de Karl Popper*, Paris, Presses de l'École normale supérieure, 1991. – DUHEM P., *La Théorie physique* (1906), rééd. Paris, Vrin, 1981. – FEYERABEND P., *Contre la Méthode* (1975), Paris, Le Seuil, 1979. – GRÜNBAUM A., *Les Fondements philosophiques de la psychanalyse* (1993), trad. fr., Paris, PUF, 1996. – HEMPEL C., *Éléments d'épistémologie* (1966), trad. fr., Paris, A. Colin, 1972. – HOWSON C. & URBACH P., *Scientific Reasoning. The Bayesian Approach*, Chicago, Open Court, 1989. – KUHN T., *La Tension essentielle* (1977), trad. fr., Paris, Gallimard, 1990. – LAKATOS I., *Histoire et méthodologie des sciences* (1978), trad. fr., Paris, PUF, 1996. – MILLER D., *Critical Rationalism*, Chicago, Open Court, 1994. – POPPER K., *La Logique de la découverte scientifique* (1934), trad. fr., Paris, Payot, 1973 ; *Le Réalisme et la science* (1983), trad. fr., Paris, Hermann, 1990. – ZAHAR E., *Essai d'épistémologie réaliste*, Paris, Vrin, 2000.

Alain BOYER

→ Cercle de Vienne ; Corroboration ; Duhem ; Expérience cruciale ; Méthode ; Paradigme ; Popper ; Reproductibilité ; Test ; Vérification.

1950. L'existence d'une régulation est inséparable de celle des voies métaboliques. La régulation biochimique est omniprésente, mais « naturelle » : elle ne résulte que des lois de la thermodynamique qui régissent les échanges chimiques se produisant au sein des êtres vivants.

Le concept de régulation se développe donc d'abord en physiologie et en embryologie, puis en biochimie. Il va être incorporé au corpus des concepts de la cybernétique, discipline qui connaît un grand succès après la publication de l'ouvrage de Norbert Wiener (1894-1964), *Cybernetics*, en 1948 (*Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Act. Sci. Ind. n° 1053, Paris). Norbert Wiener et les cybernéticiens vont cependant prêter plus d'attention aux régulations du comportement liées aux propriétés du système nerveux qu'aux régulations physiologiques de l'organisme. De plus, l'utilisation du concept de régulation en biologie n'aboutira jamais à la formalisation mathématique qu'avaient espérée les premiers adeptes de la cybernétique.

Mais l'importance du concept de régulation fait aussi partie de l'histoire propre de la génétique. Dès qu'ils eurent quitté le terrain bien balisé de la cartographie génétique pour aborder celui du mécanisme d'action des gènes et de leur rôle dans le développement embryonnaire, les généticiens ont été obligés, à la suite de Thomas Morgan (1866-1945), de postuler que l'activité des gènes ne devait pas être constante, mais pouvoir varier, tant en fonction de l'environnement qu'au cours du développement ontogénétique (*Sci. Monthly*, 41, 1935, p. 5-18).

La régulation chez les micro-organismes

C'est grâce à l'étude des bactéries et de leur métabolisme que le concept de régulation moléculaire va trouver sa forme finale. Les origines physiologiques de ces travaux apparaissent clairement : le laboratoire d'André Lwoff (1902-1994), dans lequel vont être élaborés les principaux modèles de régulation moléculaire, s'appelaient le service de physiologie microbienne de l'Institut Pasteur. De plus, l'une des protéines régulatrices qui va être le plus étudiée et qui servira de modèle est l'hémoglobine qui assure dans le sang le transport de l'oxygène : il s'agit donc de l'extension au niveau moléculaire des travaux antérieurs du groupe de Henderson (Debru, 1983).

Entre les années 1950 et 1960, plusieurs mécanismes régulateurs vont être découverts chez les bactéries : 1) L'activité de la première enzyme intervenant dans une voie de biosynthèse est contrôlée par le produit final de cette voie ; c'est le phénomène de la rétro-inhibition ou feedback, application parfaite au métabolisme bactérien des modèles de la cybernétique (Umberger, *CSHSQB*, 26, 1961, p. 301-312). 2) La synthèse des enzymes d'une voie métabolique est également dépendante de la présence ou de l'absence des substrats ou des produits de cette voie : c'est le phéno-

mène d'adaptation enzymatique, rebaptisé par Jacques Monod et ses collègues « induction enzymatique » (J. Monod, *Science*, 154, 1966, p. 475-483). 3) Enfin les virus qui peuvent infecter les bactéries, les bactériophages, sont aussi soumis à un contrôle, une régulation analogue à celle des enzymes bactériennes (F. Jacob, *The Harvey Lectures 1958-1959*, 1960, p. 1-39).

La première observation va conduire à la conception du modèle dit allostérique selon lequel les protéines, les enzymes, peuvent voir leur structure et leur activité modulées sous l'action de petites molécules dites régulatrices. Les deux autres observations vont aboutir à la conception du modèle de l'opéron : selon celui-ci, il existe dans le génome deux types de gènes : 1) les gènes structuraux qui codent pour les protéines et les enzymes ; ces gènes structuraux sont regroupés pour former des opérons ; 2) les gènes régulateurs, qui codent pour des protéines appelées répresseurs ; ces répresseurs viennent se fixer en amont des gènes structuraux et réguler l'expression de ceux-ci, la transcription de l'information contenue dans ces gènes en ARN messagers (F. Jacob & J. Monod, *CSHSQB*, 26, 1961, p. 193-211).

F. Jacob et J. Monod élaborèrent donc deux mécanismes distincts de régulation : l'un concernait l'activité des enzymes et des protéines, l'autre celle des gènes. Ces deux mécanismes étaient cependant liés : les répresseurs qui contrôlent l'activité des gènes sont eux-mêmes des protéines régulatrices. La régulation génique ou protéique trouve donc son origine dans les propriétés structurales d'une classe particulière de protéines, les protéines régulatrices. La mise en évidence des propriétés de ces protéines constituait, selon J. Monod, la découverte du « second secret de la vie » (Judson, 1979). Elle représentait une rupture brutale avec les conceptions antérieures des biochimistes. Cette régulation est en effet « gratuite », affranchie des contraintes thermodynamiques : n'importe quelle molécule peut réguler n'importe quelle protéine. « En utilisant certaines protéines non seulement comme catalyseurs ou transporteurs, mais comme des récepteurs moléculaires et des transducteurs de signaux chimiques, la liberté est conquise sur des contraintes chimiques autrement insurmontables, permettant à la sélection de développer et d'interconnecter la circuiterie immensément complexe des êtres vivants » (J. Monod, J.-P. Changeux & F. Jacob, « Allosteric Proteins and Cellular Control Systems », *J. Mol. Biol.*, 6, 1963, p. 325).

Avec la découverte des protéines régulatrices, la régulation moléculaire se révèle à la fois omniprésente et omnipotente.

Les caractéristiques des protéines régulatrices

Les deux composantes des modèles régulateurs forgés par F. Jacob et J. Monod vont connaître de légères modifications, mais surtout une extension considérable. Le modèle allostérique proposé en 1965

par Jacques Monod, Jeffries Wyman et Jean-Pierre Changeux était un modèle très « rigide », imposant aux protéines régulatrices un ensemble de propriétés structurales précises. J. Monod était lui-même « effrayé » par les possibilités ouvertes par l'existence des protéines régulatrices : « Le côté arbitraire, chimiquement parlant, de certains effets allostériques apparaît presque choquant au premier regard » (Monod *et al.*, 1963, *op. cit.*). Il souhaitait maintenir ces possibilités dans des contraintes structurales et évolutives étroites.

L'analyse d'un nombre croissant de protéines régulatrices montra que les mécanismes de régulation étaient non pas simples mais complexes et multiples. La famille des protéines régulatrices s'agrandit : aux enzymes et aux facteurs régulant la transcription vinrent s'adjoindre les récepteurs membranaires qui permettent la communication des cellules avec le milieu environnant (et les autres cellules). Enfin la régulation allostérique, par changement de forme, se vit doublée, en particulier chez les organismes supérieurs, par une régulation par modification chimique stable, telle la phosphorylation. Mais les deux types de régulation, bien qu'utilisant des mécanismes distincts et obéissant à des signaux différents, reposent néanmoins sur la même propriété des enzymes et des protéines : pouvoir adopter des états de structure et d'activité différents. Les deux mécanismes régulateurs sont également indépendants des contraintes de la thermodynamique. Ils offrent à l'organisme vivant des possibilités quasi infinies de régulation.

La régulation de la structure et de la fonction des protéines occupe donc toujours une place centrale en biologie. Sa compréhension au niveau élémentaire, infra-moléculaire, demeure néanmoins encore incomplète.

La régulation de l'expression des gènes

Ce sont certainement les modèles de régulation de l'expression (l'activité) des gènes qui ont été les plus importants pour le développement de la biologie contemporaine, et en même temps les plus critiqués. Ces modèles ne visaient en effet pas seulement à décrire la régulation physiologique, mais aussi les mécanismes moléculaires qui conduisent au développement embryonnaire des organismes multicellulaires. Dès 1961 F. Jacob et J. Monod suggèrent que les modèles qu'ils avaient proposés étaient susceptibles d'expliquer les variations d'activité génique qui se produisaient au cours du développement embryonnaire, et de réconcilier génétique et embryologie (J. Monod et F. Jacob, *CSHSQB*, 26, 1961, p. 389-401). C'est donc à une double critique que vont être soumis ces modèles de régulation. Critique expérimentale : ils ne peuvent être appliqués directement, tels qu'ils ont été conçus chez les bactéries, à l'étude des organismes supérieurs. Ils doivent être revus ; d'autres niveaux de régulation doivent être pris en compte. Critique de principe : le développement embryonnaire ne peut pas

être interprété en termes de variation dans l'activité des gènes, ne peut pas être réduit au contrôle de l'expression des gènes. Certains concepts « classiques » de l'embryologie, la compétence, la détermination, étaient irrédutibles, selon le biologiste Boris Ephrussi, aux modèles de la génétique moléculaire (R.M. Burian, J. Gayon & D.T. Zailen, *Dev. Biol.*, 7, New York, 1991, p. 207-227). Ces deux critiques se rejoignent pour donner à la chromatine, à l'organisation structurale et spatiale des gènes chez les organismes supérieurs, un rôle majeur dans la régulation de l'activité de ces gènes. Derrière ces critiques précises se cachait une opposition plus profonde à la conception mécaniste du vivant que cherchaient à imposer les biologistes moléculaires. Les termes utilisés par ces derniers, empruntés de manière superficielle à la théorie de l'information, ne doivent pas tromper : la régulation dessinée par les biologistes moléculaires est très simple. Elle assimile les êtres vivants à des machines élémentaires.

Les critiques évoluèrent au cours du temps. Accueillis avec enthousiasme en 1961, les modèles proposés par F. Jacob et J. Monod furent peu à peu remis en cause, essentiellement parce que les techniques accessibles aux biologistes ne leur permettaient pas de les tester (et de les confirmer). Au début des années 1980, il était devenu de bon ton de considérer qu'il n'existait pas de « programme » génétique chez les organismes supérieurs, que le développement y était « illogique » (R. Lewin, *Science*, 224, 1984, p. 1327-1329). Mais la découverte, au milieu des années 1980, des gènes à boîtes homéotiques, conservés tant structurellement que fonctionnellement tout au long de l'évolution, provoquaient un rapide retournement d'attitude et confirmait que les schémas régulateurs de F. Jacob et J. Monod avaient été des anticipations remarquables de ce que l'analyse moléculaire des gènes du développement révélait.

Que reste-t-il donc aujourd'hui de ces schémas régulateurs et des critiques qui leur ont été adressées ?

Certains des composants du modèle de l'opéron ont dû être modifiés pour tenir compte des résultats obtenus par l'étude des organismes supérieurs : il n'existe pas d'opérons chez ces derniers et les gènes régulés sont en général (mais pas toujours) dispersés sur le génome. De plus la régulation négative est loin d'y être le mécanisme principal : la régulation de l'expression des gènes n'est pas due à l'action négative de quelques répresseurs de haute affinité, mais à la fixation en amont des gènes d'un ensemble complexe de protéines activatrices de faible affinité. F. Jacob a proposé le concept d'« agrégulat » pour rendre compte de ces assemblages protéiques complexes (F. Jacob, *CRAS*, 316, 1993, p. 331-353).

Si les modèles régulateurs proposés par F. Jacob et J. Monod ont dû être en partie corrigés, tous les travaux réalisés ont néanmoins confirmé que l'essentiel de la régulation de l'expression des gènes se place au niveau de la transcription, de la copie des gènes en ARN messagers. Certes il existe de nombreux autres mécanismes

permettant à une cellule de contrôler l'activité de ses gènes. Ces mécanismes peuvent jouer au niveau de l'ADN : amplification de certains fragments d'ADN, modifications stables le rendant inactif (par méthylation), réarrangement de certains fragments du génome. Ils peuvent aussi intervenir lors du décodage de l'information contenue dans les gènes en structures protéiques : dans l'épissage qui convertit l'ARN lourd copié sur les gènes en ARN messager fonctionnel, lors du transport de cet ARN vers le cytoplasme ou lors de sa traduction. Enfin, comme nous l'avons vu précédemment, les protéines elle-mêmes peuvent être soumises à de multiples régulations : elles peuvent être modifiées de manière stable (ce qui change leur activité) ou voir leur durée de vie altérée. Si tous ces mécanismes de régulation existent, ils n'ont cependant pas une valeur aussi générale que la régulation de la transcription. C'est avec raison, mais il faut le reconnaître une étonnante prémonition compte tenu de l'information limitée qui leur était accessible, que F. Jacob et J. Monod avaient placé le niveau essentiel de régulation de l'expression des gènes à l'étape de copie de l'ADN en ARN.

Les critiques de principe adressées contre l'extension des modèles bactériens de régulation à l'étude du développement embryonnaire se sont aussi avérées vaines. F. Jacob et J. Monod avaient eux-mêmes vu dès 1961 que l'extension de leurs modèles aux organismes supérieurs impliquait deux modifications : d'une part celle de la structure des circuits régulateurs pour pouvoir rendre compte d'états de fonctionnement, sinon irréversibles, du moins stables. D'autre part inclure le fait que, chez des organismes complexes, la majorité des signaux qui vont réguler l'activité des gènes ne sont pas de petites molécules diffusant librement dans le milieu, mais des messages provenant des autres cellules et devant transiter à travers la membrane cellulaire. Cette dernière était donc appelée à jouer un rôle essentiel dans le contrôle de l'activité des gènes.

Mais l'idée que des mécanismes différents étaient responsables de la détermination et de la différenciation, que les schémas régulateurs proposés par F. Jacob et J. Monod ne rendaient compte, dans le meilleur des cas, que de ce deuxième processus, ne devait jamais trouver ne serait-ce qu'un début de confirmation. Tous les mécanismes avancés dans les années 1960-1970 pour expliquer la détermination (modification de l'état de la chromatine, rôle des séquences répétées, modification par méthylation de l'ADN, réarrangement ou amplification des gènes) se révélèrent limités en importance, et plus souvent la conséquence des modifications d'expression des gènes que la cause de celles-ci. Aucun territoire du vivant n'est resté inaccessible aux mécanismes régulateurs proposés par les biologistes moléculaires.

Un paradigme stable

Les modèles de régulation ont donc assez peu évolué durant ces trente dernières années. On peut, sans sim-

plifier indûment, dire que la biologie moléculaire vit encore aujourd'hui dans le cadre du paradigme moléculaire établi dans les années 1960. Les caractéristiques de ce paradigme méritent une mise en perspectives historiques plus approfondie. Insistons d'abord sur l'importance du concept de régulation dans la biologie contemporaine. Nous avons évoqué en introduction les raisons internes qui expliquent cette importance : l'influence des travaux réalisés en physiologie, l'évolution des recherches en génétique qui, après la description des gènes, va conduire à s'interroger sur leur mécanisme d'action, l'application des modèles issus de la cybernétique. Cette dernière influence conduit bien évidemment à s'interroger sur le rôle des facteurs externes dans l'évolution de la biologie et de ses modèles. Le concept de régulation s'étend bien au-delà des travaux réalisés en biologie, ou, plus généralement, dans les sciences exactes, pour rejoindre une des préoccupations majeures de nos sociétés contemporaines.

L'acceptation générale de l'importance des mécanismes régulateurs dans le fonctionnement et le développement des êtres vivants n'a pas empêché de très vifs débats sur la nature de ces mécanismes régulateurs et leur niveau d'intervention. Beaucoup ont reproché à la vision régulateur de la biologie moléculaire sa rusticité. Elle repose sur des modèles chimiques mécanistes auxquels les chimistes eux-mêmes ont renoncé depuis le début du siècle. On peut penser — beaucoup l'espèrent — que cette vision grossièrement mécaniste n'est qu'une étape dans la description progressive des phénomènes vivants au niveau élémentaire de la matière. Il faut néanmoins reconnaître que, forts des outils dont ils disposent, les biologistes moléculaires n'ont guère fait d'efforts, ces dernières années, pour préciser cette vision encore très « simpliste ».

Comment expliquer, en outre, les aléas des modèles issus de la génétique bactérienne, leur remise en cause, puis leur retour en grâce ? Cette histoire complexe nécessite une analyse à un double niveau. D'abord celui de l'organisation sociale et disciplinaire des sciences. Les modèles régulateurs élaborés dans les années 1960 n'avaient été par des biologistes moléculaires travaillant sur les bactéries. La transposition directe de ces modèles à l'embryologie semblait faire fi de la complexité des organismes supérieurs et de leur spécificité. La remise en cause des modèles de régulation était donc le reflet de l'affrontement disciplinaire entre biologistes moléculaires et biologistes plus traditionnels. Au-delà des biologistes moléculaires étaient surtout visés les généticiens. Le déterminisme génétique semblait nier la richesse adaptative du vivant. La critique du déterminisme génétique trouvait dans les années 1970-1980 un écho favorable auprès d'un large public qui découvrait ou redécouvrait les abus auxquels l'eugénisme, étroitement lié à la génétique entre les deux guerres, avait pu mener.

Du point de vue fondamental, le cœur du débat était la valeur de l'approche réductionniste prônée par

les biologistes moléculaires pour l'étude du développement embryonnaire. Les opposants étaient dans l'erreur quand ils niaient que le développement soit dû à la régulation de l'expression des gènes. Mais certains biologistes moléculaires se trompaient aussi quand ils pensaient que l'on pourrait décrire le développement embryonnaire en termes de programme génétique, sans avoir à en préciser les étapes et la logique. Lewis Wolpert faisait remarquer que pour pouvoir décrire en termes de molécules le développement embryonnaire, il fallait d'abord connaître « ce » que l'on voulait décrire (L. Wolpert Oct., *Sci. Am.*, 239, 1978, p. 124-137).

Mais ces critiques des modèles bactériens étaient aussi et surtout la conséquence de l'absence de techniques moléculaires adaptées permettant d'aborder l'étude des organismes complexes. Ce n'est qu'avec les outils fournis par le génie génétique que les biologistes moléculaires purent rechercher les gènes régulateurs chez les organismes supérieurs et... les mettre en évidence, coupant court en quelques années à de longs débats qui, rétrospectivement, apparaissent vains et confus. Cette évolution doit-elle rendre pessimiste sur le fonctionnement des sciences, celles-ci étant guidées par les techniques — le génie génétique — plus que par les concepts et les modèles ? Ou bien optimistes, les spéculations théoriques s'effondrant devant les résultats expérimentaux ? Sans doute la vérité est-elle située entre les deux : l'importance des données expérimentales ne peut être niée, mais il ne faut pas oublier que le choix d'une technique, d'un modèle, limite et déforme le champ des connaissances accessibles à l'expérimentateur (R. Burian, *J. Hist. Biol.*, 26, 1993, p. 351-367). La mise en évidence des gènes à boîte homéotique et des autres gènes du développement conservés chez les êtres vivants n'est d'ailleurs pas une simple redécouverte des modèles de F. Jacob et J. Monod : ce que ces derniers avaient suggéré, c'est que les principes de régulation trouvés chez les bactéries pouvaient expliquer le contrôle de l'activité des gènes lors du développement embryonnaire ; ce que les résultats récemment obtenus montrent, c'est que ce n'est pas seulement la logique des régulations qui est conservée, mais la nature même des réseaux régulateurs et de leurs composants, les protéines régulatrices. Extraordinaire résultat qu'aucun biologiste moléculaire des années 1960 n'aurait osé imaginer.

▶ ALLEN G.E., *Life Science in the Twentieth Century*, Cambridge, 1978, chap. IV. — CANGUILHEM G., « La formation du concept de régulation biologique aux XVIII^e et XIX^e siècles », *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, Paris, 1977. — DEBRU C., *L'esprit des protéines : histoire et philosophie biochimiques*, Paris, 1983. — JUDSON H.F., *The Eighth Day of Creation : The Makers of the Revolution in Biology*, New York, 1979, chap. 10.

Michel MORANGE

→ ADN ; Bactériophage ; Génétique ; Jacob ; Lwoff ; Microorganisme ; Monod.

RELATIVITÉ

PHYSIQUE

En physique, le terme relativité renvoie à deux théories distinctes mais reliées, la théorie de la relativité restreinte et la théorie de la relativité générale. Elles ont en commun d'être toutes les deux des théories de l'espace-temps ou des structures cinématiques qui régissent le comportement de toute particule ou de tout champ censés exister dans l'espace-temps (la nature des contraintes imposées sera examinée ci-dessous). En revanche elles se distinguent par la nature de la structure de l'espace-temps. Fixées et données, les structures spatio-temporelles de la relativité restreinte déterminent une cinématique universelle qui est indépendante des lois possibles de la dynamique (classique ou quantique) auxquelles obéissent ces particules et ces champs, mais qui joue un rôle important car elle impose certaines restrictions aux diverses possibilités. À l'inverse, les structures d'espace-temps de la relativité générale sont des champs dynamiques — incluant la gravitation, qui dès lors cesse d'être considérée comme une force à part — qui obéissent aux équations de champ qui les associent à toute la matière et aux champs non gravitationnels. Ainsi aucune séparation entre cinématique et dynamique n'est possible en relativité générale : l'espace-temps vide possède de toute façon une structure qui englobe la gravitation, et par conséquent obéit à des équations de champ dynamique. Les deux théories sont largement l'œuvre d'Albert Einstein, qui a développé la théorie de la relativité générale à partir de celle de la relativité restreinte. C'est en essayant d'inclure la gravitation dans le cadre de cette théorie qu'il énonça le principe d'équivalence d'où il tira la conviction qu'il fallait modifier considérablement sa première théorie pour y inclure la gravitation. Einstein choisit de parler de « relativité » à propos de ses deux théories, mais l'application de ce terme à la théorie générale et la nature exacte de la relation entre les deux théories suscitent encore bien des polémiques. Chacune des théories d'Einstein se présente de fait comme une structure assez lâche, composée d'un noyau de concepts centraux, reliés les uns aux autres par une série de principes, et de concepts périphériques, théorèmes, modèles et autres éléments d'interprétation et d'application physique qui se déduisent du noyau central. La répartition entre le noyau central et la périphérie varie suivant les interprétations et au fil du temps, mais certains traits communs à toutes les interprétations justifient de regrouper les deux théories sous l'appellation commune « théorie de la relativité ».

La relativité restreinte

La théorie de la relativité restreinte développée en 1905 par Einstein repose sur deux principes, baptisés par lui « principe de relativité » et « principe de la lumière » (ou principe de la constance de la vitesse de la lumière). Ces principes mettent en jeu certains

concepts cinématiques tels que l'espace, le temps, la vitesse, etc. On doit à Einstein l'utilisation, devenue traditionnelle en physique, d'instruments de mesure idéaux — en l'occurrence des règles et des horloges —, utilisation destinée à mettre en évidence le lien entre la structure de la théorie et les mesures physiques indispensables si l'on veut donner un contenu empirique aux énoncés théoriques. Le principe de relativité affirme l'existence d'une classe privilégiée de référentiels non accélérés (référentiels « inertiels ») et pose que les lois de la physique n'établissent aucune distinction entre les référentiels de cette classe. Le « principe de la lumière » impose non seulement que la vitesse de la lumière soit la même dans un sens et dans le sens opposé dans tous les référentiels inertiels, mais aussi que la vitesse de la lumière soit une constante entre deux points quelconques — ce qui implique de pouvoir comparer les temps en deux points distants. Einstein suppose que la comparaison des temps en un même point de l'espace peut être réalisée en utilisant une horloge idéale. À la suite de Poincaré, il prend acte de ce que la simultanéité de deux événements distincts comporte nécessairement une part de convention : en effet, synchroniser des horloges distantes l'une de l'autre par échange de signaux lumineux exige que la vitesse de la lumière soit constante dans une direction donnée. Bien que cette formulation du « principe de la lumière » comporte un élément conventionnel, cette convention ne garantit pas que cette exigence puisse être satisfaite de façon cohérente dans chaque référentiel inertiel, qui plus est que la valeur numérique de la vitesse de la lumière soit numériquement la même dans tous les référentiels inertiels ; que ce soit possible, tel est le contenu physique du « principe de la lumière » (en réalité, il est possible d'éviter d'avoir recours à une telle convention en se limitant à des énoncés portant sur la vitesse de la lumière dans un sens et dans le sens opposé). L'adoption de la même convention dans chaque référentiel inertiel conduit à imposer que la simultanéité de deux événements distants dépend du référentiel. Le temps absolu (au sens d'indépendant du référentiel) de la théorie newtonienne cède la place à un temps dépendant du référentiel (la loi de transformation, dite de Lorentz, des coordonnées spatiales et temporelles lors d'un changement de référentiel est donnée à l'entrée ESPACE-TEMPS) Einstein insiste sur le contenu essentiellement cinématique de la théorie de la relativité restreinte ; les conséquences dynamiques de la théorie s'obtiennent en introduisant les lois dynamiques propres à la mécanique, l'électromagnétisme, etc. ; avec comme résultat que les relations entre les grandeurs dynamiques se trouvent modifiées. Ainsi, par exemple, les transformations de l'énergie et de la quantité de mouvement, lors d'un changement de référentiel inertiel à un autre, ne sont plus les mêmes qu'en dynamique newtonienne. Plus même, la masse inertielle, invariante en dynamique newtonienne, est intégralement convertible en énergie, elle aussi conservée de façon séparée en mécanique classique). L'équation $E = mc^2$, donnant le facteur de conversion de l'une à

l'autre, est certainement l'équation la plus célèbre de la physique. La relativité restreinte définit également un ensemble de contraintes cinématiques imposées à la structure possible de toute loi dynamique. En ce sens, et comme Einstein l'a lui-même fait remarquer, les deux principes sur lesquels repose la théorie de la relativité sont comparables aux principes de la thermodynamique, lesquels définissent les contraintes imposées à la structure possible de tout système thermodynamique macroscopique et aux relations que doivent satisfaire les variables d'état d'un tel système. L'ensemble des contraintes cinématiques définit la structure commune à toutes les interprétations de la relativité restreinte, quels que soient les concepts considérés comme centraux. Le groupe de symétrie propre à la relativité restreinte, ou groupe de l'espace-temps de Minkowski, est appelé groupe de Poincaré ; l'exigence d'invariance par ce groupe de transformations contraint le choix des théories dynamiques possibles. À chaque invariance est associée l'existence d'une grandeur conservée, pour des systèmes isolés : l'invariance par l'ensemble des translations de l'espace-temps est associée à la conservation de l'énergie-quantité de mouvement totale ; l'invariance par rotation à la conservation du vecteur moment angulaire et l'invariance par les transformations de Lorentz à la conservation du vecteur définissant le centre de masse.

On verra, en se reportant à l'entrée ESPACE-TEMPS, que les structures spatio-temporelles de la relativité restreinte correspondent au champ de tenseur (pseudo)métrique de Minkowski, lequel détermine la chronogéométrie (comportement des horloges et des règles idéales), et à la connexion inertielle, déterminant le comportement des particules libres sous l'effet d'un champ inertiel. Les deux structures sont plates et compatibles entre elles (une horloge et une règle idéales en chute libre conservent leur capacité à mesurer les temps et les longueurs, respectivement).

La relativité générale

À l'entrée PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE, on montre que l'égalité des masses inertielle et gravitationnelle conduit à envisager la gravitation non comme une force mais comme une modification de la structure inertielle de l'espace-temps. La structure inertio-gravitationnelle qui en résulte devient un champ dynamique qui n'est plus plat, sa courbure dépendant de la matière et de l'énergie présentes dans l'espace-temps. Si l'on veut préserver la compatibilité de la connexion avec la métrique il faut que le champ de tenseur métrique soit lui aussi dynamique et non plat, raisonnement qui mène à la théorie générale de la relativité. La cinématique fondamentale de l'espace-temps, caractérisée par la compatibilité des structures chronogéométrique et inertio-gravitationnelle, est déterminée par les équations dynamiques du champ, souvent appelées équations d'Einstein, qui rattachent ces structures au contenu en matière-énergie de l'espace-temps. Ces

équations de champ reposent sur une variété différentiable dont les points sont reliés par certaines relations topologiques et certaines conditions de différentiabilité purement mathématiques. Tant que le champ de tenseur métrique et/ou un autre champ physique n'est pas spécifié sur la variété considérée, il est impossible d'associer aux points de la variété la moindre relation spatio-temporelle. En particulier, il est inexact d'affirmer, comme on l'entend souvent dire, que les points de la variété représentent des événements dont l'intervalle est donné par le champ de tenseur métrique, car cela suppose que les points de la variété représentent des événements avant qu'un champ de tenseur métrique (ou plus généralement physique) leur soit assigné. Il en résulte la différence peut-être la plus déterminante (et souvent la moins bien comprise) entre relativité restreinte et relativité générale. Selon la théorie de la relativité restreinte, il est possible d'individualiser physiquement les points de l'espace de Minkowski au moyen de règles idéales, immobiles dans un ensemble de règles idéales, immobiles dans un certain référentiel inertiel, chaque point du référentiel étant aussi muni d'horloges idéales destinées à donner le temps propre en chaque point, ces horloges étant par ailleurs synchronisées à l'aide de la convention de Poincaré-Einstein). Dans la mesure où chaque point peut être ainsi individualisé, il est possible d'attribuer une signification physique à la considération de deux configurations physiques d'un même système dynamique ne différant que par le fait que l'une est la transformée (active) de l'autre par une opération du groupe de Poincaré. C'est ce qui n'est plus possible en relativité générale ; en effet, dans la mesure où les points de la variété tiennent l'ensemble de leurs propriétés spatio-temporelles du champ de tenseur métrique, distinguer deux configurations ne différant que par un difféomorphisme (i.e., une transformation active ponctuelle de la variété différentiable) n'a pas de sens. Toute théorie de la relativité générale doit donc être invariante par les difféomorphismes de cette variété ; ce qui implique de modifier les questions physiquement pertinentes jusque dans leur formulation même. Ainsi, par exemple, s'il est possible en relativité restreinte de se demander quelle est la valeur du champ électrique en un point donné de l'espace de Minkowski, il est absurde, en relativité générale, de se demander ce que vaut le champ gravitationnel en un point donné de l'espace-temps — puisque ces points ne sont donnés qu'une fois spécifié le champ de tenseur métrique qui précisément détermine aussi la structure inertio-gravitationnelle de l'espace-temps. Toutes les questions physiquement pertinentes doivent, en relativité générale, être formulées de façon difféomorphiquement invariante si l'on veut pouvoir donner un sens physique aux réponses. Les problèmes que soulève cette exigence dans le cadre de la théorie quantique font l'objet de l'article MÉCANIQUE QUANTIQUE ET RELATIVITÉ (Compatibilité entre).

Que veut dire « relativité » dans les théories de la

relativité ? S'agissant de la théorie restreinte, la réponse est assez simple : l'utilisation du terme dans l'expression « principe de relativité » renvoie à l'équivalence de tous les référentiels inertiels au sein de cette théorie. L'emploi du mot relatif à propos de concepts tels que ceux d'intervalles de temps et de longueur ou de vitesse renvoie au fait que ces quantités n'ont de signification que par rapport à un certain référentiel inertiel — l'idée étant de les opposer aux quantités absolues, tels que la vitesse fondamentale c (« vitesse de la lumière ») et l'intervalle s entre deux événements, qui, elles, sont indépendantes du système de référence. Le temps propre, c'est-à-dire l'intégrale des intervalles temporels le long de toute trajectoire du genre temps, est peut-être la plus importante de ces quantités invariantes. À un niveau plus profond, la « relativité restreinte » désigne l'invariance des cinématiques et des dynamiques relativistes par toutes les transformations du groupe de Poincaré. Dans le cas de la relativité générale, il n'est pas si facile de répondre à la question, d'ailleurs amplement débattue : il n'existe pas de classe de référentiels globaux privilégiés au sein de cette théorie qui vienne remplacer les référentiels inertiels (globaux) de la relativité restreinte ; en conséquence il n'y a pas non plus de « principe de relativité » en relativité générale. Il existe des référentiels inertiels locaux et ils jouent un rôle important dans l'interprétation physique de la théorie : par rapport à un référentiel inertiel local, les composantes d'une quantité tensorielle non gravitationnelle (le champ électromagnétique par exemple), souvent appelées composantes physiques du tenseur, sont les entités théoriques qui correspondent aux quantités mesurées en laboratoire (par exemple, les composantes des champs électrique et magnétique dans ce référentiel). Comme le montre cet exemple, en relativité générale bien des quantités physiques n'ont effectivement de sens que rapportées à un référentiel, et dans cette mesure on peut les qualifier de relatives. L'intervalle ds qui sépare des événements voisins reste invariant, tout comme son intégrale le long de toute trajectoire du genre temps, le temps propre. Même s'il constitue une solution des équations de champ d'Einstein, un champ de tenseur métrique générique ne possède pas de symétries, et il n'y a donc pas en relativité générale de groupe de Lie à paramètre fini qui puisse se substituer au groupe de Poincaré de la théorie restreinte (naturellement, des solutions particulières peuvent admettre de tels groupes de symétrie). Quant aux équations de champ (que l'on peut considérer comme la section d'un fibré métrique sur une variété quadridimensionnelle), on a vu plus haut qu'elles sont invariantes par le groupe des difféomorphismes de cette variété. On a donc essayé d'interpréter cette invariance comme celle qui correspondrait au groupe de relativité de la théorie. Ce groupe étant à certains égards analogue aux groupes de jauge de l'électromagnétisme et autres théories non abéliennes de Yang-Mills, on a en particulier tenté d'interpréter la relativité générale comme une théorie de jauge du groupe difféomorphique. Il existe cependant des

différences importantes entre les difféomorphismes et les transformations de jauge de Yang-Mills (les difféomorphismes sont des symétries de la variété de base, alors que les transformations de jauge correspondent aux symétries des fibres construites sur la variété ; aussi l'analogie est-elle loin d'être complète.

► ELLIS G. & WILLIAMS R., *Flat and Curved Space-Times*, Oxford, Clarendon Press, 1988. — LICHNEROWICZ A., *Théories relativistes de la gravitation et de l'électromagnétisme*, Paris, Masson, 1955. — MISNER Ch.W., THORNE K.S. & WHEELER J.A., *Gravitation*, San Francisco, Freeman, 1973. — OHANIAN H.C. & RUFFINI R., *Gravitation and Spacetime*, New York/Londres, W.W. Norton, 2^e éd., 1994. — STACHEL J., « History of Relativity », *History of Twentieth Century Physics*, vol. I, éd. L. Brown, A. Pais & B. Pippard, Philadelphia, AIP Press, 1995. — TONNELAT M.-A., *Histoire du principe de relativité*, Paris, Flammarion, 1971. — TORRETTI R., *Relativity and Geometry*, Oxford, Pergamon, 1983. — TRAUTMAN A. & KOPCZYNSKI W., *Spacetime and Gravitation*, Varsovie/New York, PWN/Wiley, 1992. — UGAROV V.A., *Special Theory of Relativity*, Moscou, Mir, 1979. — WALD R., *General Relativity*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1984.

John STACHEL
(trad. F. Balibar)

→ Champ ; Constantes physiques ; Déterminisme ; Einstein ; Élémentarité ; Equivalence (Principe d') ; Espace ; La critique de Mach ; Espace-temps ; Expansion de l'univers ; Gravitation ; Masse ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Mesure en mécanique quantique ; Michelson ; Mouvement ; Relativité ; Temps ; Trou noir ; Univers.

RENORMALISATION

PHYSIQUE

Pour avancer dans l'exploration du monde de l'infiniment petit, il faut lever les difficultés conjointes de la relativité et de la mécanique quantique. C'est ce que fait la théorie du champ quantique. Le concept de champ quantique, ou de champ local d'opérateurs, permet de prendre en compte la complémentarité ondes/corpuscules spécifique de la mécanique quantique : l'aspect ondulatoire est associé à la notion de champ (structure étendue à l'ensemble de l'espace-temps) et l'aspect corpusculaire à la notion d'opérateur. Un champ quantique correspond à la donnée, en chaque point de l'espace-temps, d'un opérateur de création ou d'annihilation d'une particule ou d'une antiparticule. La propriété de localité spatio-temporelle permet de prendre en compte la causalité relativiste selon laquelle aucune interaction ne peut se propager instantanément à distance : elle consiste à ne considérer que des particules et des interactions strictement ponctuelles.

Les équations de la théorie des champs quantiques sont exactement solubles pour des champs libres, sans interaction. Mais des difficultés considérables surgissent en présence d'interaction, à cause du conflit entre la localité spatio-temporelle et la mécanique quantique. Lorsque l'on essaie de calculer, avec la théorie

des champs quantiques, la probabilité d'un processus de réaction particulière, il faut envisager l'ensemble des voies quantiquement indiscernables que peut emprunter (serait-ce virtuellement) le processus en question (c'est l'objet du programme de l'intégrale de chemins de Feynman). Ces processus sont symbolisés par les diagrammes de Feynman. Des règles strictes et précises permettent d'associer à chaque diagramme de Feynman représentant une voie indiscernable, une amplitude probabilité (un nombre complexe dont le carré du module est une probabilité). Pour chaque réaction particulière il convient donc d'envisager toutes les voies indiscernables par lesquelles elle peut se produire (ou ce qui revient au même, de dessiner tous les diagrammes de Feynman possibles), de calculer l'amplitude de probabilité associée à chaque voie, de sommer toutes ces amplitudes pour obtenir l'amplitude totale de la réaction dont le module au carré donne la probabilité, ou section efficace, mesurable expérimentalement. Le conflit entre la localité et la mécanique quantique se manifeste par l'apparition d'infinis (des intégrales qui divergent) dans le calcul des amplitudes associées aux diagrammes de Feynman dès qu'ils sont un tant soit peu complexes. Ces divergences sont liées aux inégalités d'Heisenberg : une interaction strictement ponctuelle peut impliquer un transfert d'énergie arbitrairement élevé. Malheureusement, ces divergences menacent toute la cohérence de l'entreprise. En effet le programme de Feynman est une démarche par approximations successives ; il s'agit d'un développement (appelé développement perturbatif) en série de puissances d'un paramètre, appelé constante de couplage, qui caractérise l'intensité de l'interaction au niveau élémentaire. Pour peu que cette constante de couplage soit petite, le développement perturbatif peut converger assez vite, et, avec un petit nombre de diagrammes de Feynman, on peut espérer avoir une bonne approximation de l'amplitude de réaction. Or, les intégrales qui permettraient d'associer des amplitudes aux diagrammes divergent : le coefficient de la puissance de la constante de couplage est égal à l'infini !

La théorie de la renormalisation permet de résoudre ce problème. Pour simplifier à l'extrême, la renormalisation consiste à redéfinir la théorie de telle sorte que toutes les quantités physiques observables puissent s'exprimer sans infini à partir des paramètres fondamentaux de la théorie (les masses des particules et la constante de couplage) qui sont redéfinis (on dit renormalisés) en fonction de la résolution avec laquelle on observe la réalité microphysique. Comme cette résolution est nécessairement finie, il est inutile de vouloir déterminer à tout prix les valeurs des paramètres à résolution infinie. Les divergences ne surviennent que lorsque l'on tente d'atteindre ce but illusoire.

Une théorie est dite renormalisable si toute la renormalisation, impliquée par l'ensemble des diagrammes de Feynman, peut être effectuée à l'aide de la redéfinition d'un nombre fini de paramètres. Ces paramètres ne sont pas fixés par la théorie ; il faut faire appel à l'expérience pour déterminer leur valeur. Mais comme ils

sont en nombre fini, une fois qu'ils ont été mesurés, la théorie renormalisable devient complètement calculable et donc prédictive.

La théorie de la renormalisation, qui a d'abord été considérée comme une astuce idoine permettant de se sortir de graves difficultés, a acquis un statut plus ambitieux lorsque l'on a découvert des théories renormalisables pour toutes les interactions fondamentales, à l'exception de la gravitation : l'électrodynamique quantique pour l'interaction électromagnétique, la chromodynamique quantique pour l'interaction forte et l'unification électrofaible pour l'interaction faible.

Une des implications surprenantes de la théorie de la renormalisation est que les paramètres fondamentaux d'une théorie renormalisable ne sont plus fondamentaux mais effectifs : ils dépendent de la résolution. Mais cette dépendance est contrainte par les équations du groupe de renormalisation qui expriment l'indépendance par rapport à cette résolution de la physique décrite par les amplitudes de Feynman. Pour une théorie renormalisable, les équations du groupe de renormalisation expriment le contenu intrinsèque et fondamental de la théorie : les observables physiques s'expriment sans infinis au moyen de masses et de constantes de couplages qui dépendent de la résolution, mais d'une manière théoriquement prédictible.

Dès sa création, la théorie du champ quantique s'est inspirée des méthodes de la physique statistique. Il y a plus qu'une simple analogie entre la méthode de l'intégrale de chemins et la méthode de la fonction de partition de Boltzmann en thermodynamique statistique. On peut établir une correspondance mathématique précise entre les deux méthodes. Lors d'une transition de phase du second ordre, deux phases (liquide et vapeur par exemple) s'interpénètrent de manière inséparable. À toutes les échelles, on observe des fluctuations de densité : on voit des bulles de vapeur qui contiennent des gouttes de liquide, qui contiennent des bulles de vapeur qui contiennent des gouttes, etc. On dit que l'on a affaire à un phénomène critique. L'idée de la méthode du groupe de renormalisation consiste à effectuer, échelle après échelle, des moyennes sur ces fluctuations. Tout comme en physique des particules, déterminer les opérations du groupe de renormalisation qui laissent invariant le système critique permet de complètement caractériser ses propriétés intrinsèques. Il est tout à fait remarquable qu'au cours des années 1970, deux grandes synthèses soient ainsi intervenues dans des domaines de la physique en apparence très éloignés : la physique des particules et la physique des phénomènes critiques. On définit comme appartenant à une même classe d'universalité des systèmes relevant soit de la théorie des champs quantiques soit de la physique des phénomènes critiques, qui sont invariants par le même groupe de renormalisation.

Cette façon d'appréhender la signification de la théorie de la renormalisation a conduit à reconsidérer la portée du critère de renormalisabilité. Dans les années 1970 et 1980 on avait eu tendance à ériger en absolu ce critère. Or on s'est aperçu que, ce faisant, on risquait de

laisser de côté d'éventuelles théories, non renormalisables, ou renormalisables à un sens un peu plus faible, qui pourraient se révéler très fécondes. C'est le cas des théories effectives des champs, qui ne sont pas nécessairement renormalisables au sens ancien, mais qui, dans le cadre défini par la résolution expérimentalement accessible à un moment donné, sont appropriées à la description de la physique importante. C'est ce que note Howard M. Georgi (in Davies P. dir., *La nouvelle physique*, Paris, Flammarion « Sciences », 1993, p. 456) : « Dans cette représentation des choses, la présence d'infinis dans la théorie quantique des champs n'apparaît ni comme un défaut désastreux ni comme un avantage. Elle a pour fonction simplement de nous rappeler à la réalité pratique de la situation : nous ne savons pas ce qui se passe à des distances inférieures à celles qui nous sont accessibles à l'observation directe. Quoi qu'il arrive à courte distance, cela ne change en rien ce que nous faisons réellement pour étudier la théorie aux distances qui nous sont accessibles. Simplement, nous n'avons plus la prétention de vouloir comprendre ce qui se passe aux distances infiniment petites. C'est là la force du langage de la théorie effective des champs. »

► BREZIN É., « Fluctuations statistiques et fluctuations quantiques », *Prédiction et probabilité dans les sciences*, Gif-sur-Yvette, Frontières, 1998. — BROWN L.M., *Renormalization from Lorentz to Landau (and Beyond)*, New York/Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1993. — COHEN-TANNOUJJI G., « Le temps des processus élémentaires I », *Le temps et sa flèche*, Gif-sur-Yvette, Frontières, 1994. — GEORGI H., « Les théories effectives des champs », *La nouvelle physique*, Paris, Flammarion, 1993. — ITZYKSON C. & ZUBER J.B., *Quantum field theory*, New York, Mac Graw Hill, 1980.

Gilles COHEN-TANNOUJJI

→ Champ ; Feynman ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Quantique.

REPRODUCTIBILITÉ

Le concept de reproductibilité n'appartient pas au répertoire classique des concepts de l'épistémologie. Il désigne pourtant un caractère essentiel des résultats des sciences expérimentales. Le concept possède des zones de recouvrement avec ceux d'objectivité, d'universalité de la science et rend compte de l'articulation entre science et technique.

Approche générale

Dans ses *Mémoires*, le cardinal de Retz (1613-1679) rapporte l'histoire d'un miracle. À Saragosse, où il faisait escale, on lui avait montré un homme dont plusieurs témoins affirmaient qu'il avait recouvré une jambe perdue en frottant le moignon avec de l'huile sainte. Le Cardinal raille les témoignages qu'il rapporte. Il les considère comme le produit d'une crédulité dévote et superstitieuse. Il ne juge d'ailleurs pas utile de réfuter les témoins. L'histoire qu'ils racontent porte

en elle les marques de sa fausseté. David Hume, dans son *Enquête sur l'entendement humain*, se demande à son tour ce qui pourrait être opposé aux récits des témoins d'un pareil miracle : « Qu'avons-nous à opposer à une telle nuée de témoins, sinon l'impossibilité absolue ou la nature miraculeuse des événements qu'ils rapportent et ce caractère, assurément, aux yeux de tous les gens raisonnables, sera à lui seul regardé comme une réfutation suffisante. » Mais il aperçoit aussitôt un problème qui se situe dans le prolongement d'une telle affirmation : que devient l'« histoire » dont nous n'avons connaissance que par l'intermédiaire de témoignages plus ou moins directs ?

Renversons la question et demandons à présent : « Qu'est-ce qui peut convaincre un témoin de la chose qui lui paraîtrait la plus invraisemblable (par exemple qu'une jambe repousse après avoir été amputée ?) » Réponse : la reproduction de la même séquence d'événements. Il se peut qu'après une telle reproduction, une explication dans laquelle l'huile sainte figurerait comme une composante nécessaire soit jugée insuffisante ou fantaisiste. Mais une chose du moins se trouve modifiée par la reproduction : elle assure qu'il y a bien là quelque chose à expliquer.

Si telle ou telle expérience, aussi incroyable que soit son résultat, s'avère reproductible, il faudra bien la tenir pour exacte. Inversement, un résultat aussi plausible et attendu soit-il ne pourra être tenu pour exact que dans la mesure où il est reproductible.

Pour Hume, la reproductibilité des expériences est le fondement de l'idée de causalité. Il enclenche ainsi un questionnement métaphysique sur la notion de causalité. Et c'est sur ce point que la science diverge de la métaphysique. Elle ne poursuit pas le questionnement en direction du concept mais abandonne au contraire sa poursuite en faisant porter sa confiance dans le fait de la reproduction effective d'une séquence d'événements. De ce fait les résultats de la science, aussi spectaculaires soient-ils, ne se tiennent jamais au-delà d'une critique métaphysique, sans que pourtant une telle critique soit en mesure d'entraver son progrès ni d'entamer sérieusement sa confiance en elle-même qui repose dans le « c'est comme ça » de la reproductibilité.

Que dit en effet la reproductibilité sur l'expérience ? Elle dit que c'est bien ainsi que les choses se passent, elle dit « c'est comme ça » : on a ceci puis cela, serait-ce donc que si ceci alors cela ? Pour le savoir voyons si de nouveau on a ceci puis cela. La manière dont le ceci puis cela devient un ceci alors cela est sans raison. La métaphysique peut attaquer ici, il y a faille. Car personne n'a jamais dit (à part par hypothèse) comment le puis devient un alors. Il y a lieu de croire que jamais cette borne ne sera outrepassée et que rien par conséquent ne garantira les résultats de la science expérimentale si ce n'est leur reproductibilité.

La question de la reproductibilité, centrale pour la science

La question de la reproductibilité est centrale pour la science. Elle se présente à trois niveaux : 1) comme

critère d'objectivité ; 2) comme indice du caractère universel des connaissances scientifiques ; 3) comme point de départ des applications pour la technologie.

Objectivité. – Si la science a pu être qualifiée par son caractère objectif, c'est tout d'abord en raison du fait qu'elle s'appuie sur des résultats reproductibles. Ainsi, si une jambe repousse à Saragosse par application d'huile sainte elle doit aussi repousser à Édimbourg ou à Prague, et aussi bien le 23 janvier que le 3 octobre : ce n'est plus alors un miracle, mais une donnée expérimentale. Que l'on puisse affirmer d'une expérience qu'elle est reproductible, c'est ce qui assure son entrée dans le domaine de ce qui est ouvert à l'interprétation scientifique. Reproduire signifie donc confirmer. De ce qui n'arrive qu'une fois, il n'y a pas de science. Ainsi, il n'y a pas de science de l'univers, mais seulement de ce qui est arrivé dans l'univers. Lorsque la science s'aventure à parler de ce qui n'arrive qu'une fois, elle devient métaphysique ou théologie.

Le critère de réfutabilité proposé par K. Popper selon lequel une théorie, pour pouvoir être tenue pour scientifique, doit être réfutable est une idéalisation négative de l'idée de reproductibilité. Le critère est négatif, dans le sens où il prévoit qu'une idée, pour être scientifique, doit pouvoir être rejetée par une expérience (et non à quelles conditions elle peut être prise en considération), et il est idéalisé dans le sens où il ne tient pas compte des expériences effectivement disponibles, mais des expériences virtuellement envisageables. Le critère met l'accent sur la qualité de la théorie et non sur la qualité des faits pris en considération dans la théorie. Il peut être regardé comme une introduction de la forme de raisonnement de la théologie négative dans l'épistémologie (la théologie négative postule que la connaissance que nous avons du fini permet de conjecturer l'infini quoique celui-ci ne puisse rigoureusement être connu ; de même la vérité, selon Popper, ne peut jamais être atteinte, quoique les progrès des théories scientifiques s'en approchent sans cesse davantage). Ce qui est élevé au rang de critère de scientificité n'est rien d'autre, cependant, qu'une forme idéalisée de la reproductibilité des expériences (caractère positif mais relatif puisqu'on ne dispose jamais, pour en juger, que d'un nombre fini d'expériences). La réfutabilité est en effet l'idée d'une limite négative de la reproductibilité : idée d'une expérience fictive qui limiterait l'étendue des phénomènes reproductibles envisageables à partir d'une théorie. Il n'est donc pas étonnant que Popper s' imagine avoir « résolu le problème de Hume ». Un tel effet s'ensuit sur l'imagination lorsque la charge d'une question métaphysique est transférée dans une réponse de forme théologique.

Universalité. – L'histoire qui raisonne sur des événements passés n'est pas reproductible. Ce qui est nommé historique est précisément la narration d'événements non reproductibles (par exemple, les conquêtes d'Alexandre, la Révolution française, etc.). Cette remarque peut être formulée aussi bien au sujet

de l'histoire de l'univers, de la vie sur terre ou de l'histoire politique. La connaissance scientifique est également le produit d'une histoire. Mais la question se pose de savoir si un autre chemin historique aurait ou non conduit au même savoir.

Le terme d'universalité de la science comporte une réponse implicite à cette question. Il entend que l'ensemble des sciences de la nature est dans ses lignes générales aussi bien que dans son détail reproductible. Que les résultats scientifiques soient reproductibles dans leur détail, c'est là un point qui a précédemment été examiné sous l'angle de la notion d'objectivité de l'expérience. Qu'ils le soient aussi dans leurs grandes lignes, c'est ce qui est en outre compris par le terme « d'universalité ».

L'intuition de l'universalité de la science repose sur le fait qu'elle se construit sur la base d'expériences individuellement reproductibles, ce qui laisse penser que l'édifice est, dans son ensemble, reproductible. Autrement dit, que si tout le savoir de la science devait disparaître en une nuit, les hommes qui seraient amenés à le reconstruire aboutiraient au bout d'un temps plus ou moins long – et après, peut-être, des péripéties historiques différentes – à un savoir comparable. C'est-à-dire évaluable selon les normes de notre actuelle connaissance.

L'histoire des sciences serait donc une histoire particulière, elle ne serait pas le récit des épisodes qui ont façonné le visage d'une vérité disponible à une certaine époque, comme l'est, par exemple, l'histoire politique pour un groupe humain ou une nation. Mais elle serait, comme le disait G. Bachelard, une histoire jugée. Jugée à l'aune de la dernière vérité retenue, supérieure à celle qui l'ont précédée.

T. Kuhn a contesté ce point en faisant valoir que l'histoire effective des sciences comportait des périodes de « révolution » au cours desquelles la manière de considérer un problème change radicalement. De ce fait, le jugement historique sur la science serait erroné à chaque fois qu'il se fonderait sur la dernière théorie considérée comme « plus vraie » que les précédentes. Dans cette version de l'histoire des sciences, c'est simultanément l'idée de la reproductibilité de l'édifice de la science dans son ensemble et celle de son universalité qui se trouve critiquée, indice supplémentaire de l'étroite connexion des concepts.

Technique. – Heidegger rapporte à une même essence la science et la technique. Il n'identifie pas pourtant le caractère commun entre la science et la technique autrement que sous l'angle d'une position métaphysique à l'égard de l'étant dans son ensemble. Le vocable de « techno-science » est apparu, dans les années 1960, pour signifier l'étroite intrication de la science et de la technique. Toutefois, le rapport de l'un à l'autre n'a pas été clairement élucidé.

La reproductibilité des expériences est prise comme critère d'objectivité de l'expérience sur son versant théorique. Mais, sur un autre versant, ce même caractère est aussi le moyen d'une reproduction effective et,

par là, il ouvre la voie à une utilisation technique des résultats scientifiques. Pourquoi, en effet, la science donne-t-elle lieu à des applications techniques ? Parce que la reproductibilité des résultats scientifiques est aussi ce qui assure qu'un assemblage donné de pièces produira toujours le même effet. Par exemple l'assemblage de toutes les pièces d'un moteur produit toujours un objet capable de développer une force motrice. Et c'est pourquoi nous pouvons dire : un moteur, c'est de la science, des moteurs, c'est de la technique. La technique est l'utilisation judicieuse des phénomènes identifiés (ou découverts) comme reproductibles. Ce qui était critère d'objectivité pour la science, la technique en tire profit, à son tour, comme moyen effectif de reproduction.

Lorsque Enrico Fermi montre que l'uranium subit une désintégration sous l'effet d'un choc de neutrons, il rapporte là une découverte dont il s'est lui-même assuré en reproduisant plusieurs fois l'expérience qui en démontre la justesse. Lorsqu'à partir de cette découverte vient l'idée qu'il serait possible de réaliser des bombes de forte puissance, qu'une équipe de recherche est effectivement constituée et réunie pour parvenir à cette réalisation et que celle-ci produit finalement un engin explosif de forte puissance, c'est de science qu'il s'agit. Mais lorsque cette bombe est réalisée en plusieurs exemplaires (reproduite) c'est de technique qu'il s'agit et lorsqu'elle est effectivement utilisée dans un but de destruction, c'est cette fois de politique qu'il s'agit. Produire une bombe atomique, c'est de la science, mais non pas produire des bombes atomiques. Des bombes atomiques, c'est de la technique. Si la technique manifeste un remarquable pouvoir invasif, ce n'est pas parce qu'elle s'appuie sur la science, mais plutôt parce qu'elle tire de la science l'assurance de pouvoir reproduire les effets qu'elle convoite. Et c'est parce que la science est, sous un certain rapport, un réservoir de phénomènes reproductibles que la technique peut y puiser des moyens de reproduire effectivement des objets fonctionnels.

La reproductibilité de l'expérience est, pour la science, confirmation du caractère objectif de l'observation ; prise comme moyen de reproduire effectivement un phénomène, elle devient technique.

Critique de la sociologie des sciences

Lorsqu'il faisait rouler des billes de bois sur un plan incliné, ce n'est pas d'une unique expérience que Galilée se contentait pour produire une conclusion sur la nature du mouvement et de son accélération. Ce n'est pas non plus d'une unique expérience que se recommandent les données que la science moderne relate dans sa littérature spécialisée. Au contraire, chaque expérience, à moins d'être réalisée plusieurs fois (en variant éventuellement un petit nombre de conditions), n'est pas considérée comme décisive.

Ce caractère de la reproductibilité des expériences scientifiques a été adroitement contesté par la sociologie dogmatique (le terme de sociologie dogmatique

désigne ici la sociologie fondée sur un programme comme l'est l'ensemble des travaux qui se sont inscrits dans la continuation du « programme fort » de David Bloor). Ainsi, il a été affirmé que si, en principe, les expériences publiées étaient reproductibles, elles n'étaient en fait jamais reproduites. Cette observation est erronée. Elle procède d'une confusion sur le terme « reproductibilité ». En fait, les résultats importants (ceux qui comportent d'importantes conséquences théoriques ou pratiques) sont toujours reproduits d'une manière ou d'une autre. S'il est vrai que les résultats de moindre importance ne le sont pas, ils le doivent surtout au fait que, peu importants, ils sont aussi quelque peu indifférents.

L'édifice qui a pour matrice l'ensemble des expériences reproductibles est la science expérimentale. Mais cette définition ne dit pas comment un tel édifice a pu être constitué et peut encore de nos jours s'enrichir et se diversifier. Il faudrait pour accéder à cette deuxième question comprendre comment a pu être acquis, historiquement, le goût particulier de la recherche de ce qui est reproductible. Ce goût constitue une acquisition de la culture plus fondamentale peut-être que les résultats qu'il a permis de produire. C'est la forme particulière de ce goût qu'il faudrait chercher à identifier dans une histoire de la reproductibilité.

► BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1938. — BLOOR D., *Sociologie de la logique ou les limites de l'épistémologie*, Paris, Association Pandore, 1983. — HEIDEGGER H., « La question de la technique » (1954), *Essais et conférences*, trad. fr. A. Préau, Paris, Gallimard, 1958. — HUME D., *Enquête sur l'entendement humain* (1748), trad. fr. A. Leroy, Paris, Flammarion, 1983. — KUHN T., *La structure des révolutions scientifiques* (1962), trad. fr. L. Meyer, Paris, Flammarion, 1983. — POPPER K.R., *La logique de la découverte scientifique* (1934), trad. fr. N. Thyssen-Rutten & P. Devaux, Paris, Payot, 1973.

Pascal NOUVEL

→ Corroboration ; Expérience ; Heidegger et la question de la technique ; Objectivité ; Paradigme ; Popper ; Réfutabilité.

RÉSEAU

Le terme réseau, dérivé de rets, provient étymologiquement du latin *retis*, filet, dont dérivent par exemple l'adjectif réticulaire et le nom résille, pour donner un exemple de la richesse de la famille lexicale. La reconnaissance d'un maillage régulier, plus ou moins géométrisable, est dès l'origine associée à celle de la fonctionnalité. Comment oublier dans l'Antiquité romaine le combat inégal des gladiateurs qui oppose le rétiaire, armé d'un trident et d'un filet à un adversaire empêtré dans une armure, le filet lui permettant, s'il est suffisamment rusé et mobile, de capturer son adversaire (épisode popularisé par le film *Spartacus*) ? Le filet de pêche est au moins depuis Socrate l'instrument métaphorique par excellence pour désigner la capture de l'interlocuteur dans les mailles de la sophistique ou

la capture de la vérité au cours d'un raisonnement impeccable, suggérant à la fois la description d'une forme et la compréhension d'une dynamique, l'association de ces deux éléments permettant de comprendre les utilisations ultérieures et la fortune épistémologique du concept.

Les sciences physiques et biologiques ont au cours de l'histoire offert de nombreux exemples d'application du terme à la description phénoménale. Aujourd'hui, les sciences de l'organisation et de la communication se sont emparées du terme. L'utilisation actuelle par l'épistémologie du terme réseau, venu des sciences physiques et biologiques, et plus récemment des sciences de l'organisation et de la communication, illustre bien l'interaction contemporaine entre la réflexion sur les formes de la vie sociale et économique et les instruments conceptuels retenus pour accroître l'intelligibilité du réel. Au cours du temps, les aspects formels ou instrumentaux ont été à tour de rôle mis en valeur.

Description d'une forme

Le terme de réseau désigne donc un maillage régulier par lequel une structure est indéfiniment capable de se reproduire semblable à elle-même dans la nature. En cela, il s'inspire de formes naturelles géométriques, répétitives d'un motif initial, comme la ruche des abeilles ou les cristaux. Le réseau comporte ainsi la propriété d'accroître sa forme en maintenant sa structure, faisant appel à différents axes de symétrie. Les réseaux sont alors descriptibles en fonction de paramètres qui permettent de les identifier et de les classer.

La disposition régulière des ions ou des atomes à l'intérieur de certains corps dits cristaux (réseaux cristallins) a permis ainsi d'étudier des images régulières de diffraction de rayonnements variés, des rayons X aux ondes hertziennes (réseaux de diffraction). La cristallographie a servi à classer les substances chimiques d'après les paramètres de ces réseaux de diffraction. Elle a joué un rôle important dans l'identification et la description de nouveaux éléments comme les acides nucléiques dans les débuts de la biologie moléculaire, avec l'identification de la double hélice par Jim Watson et Francis Crick, dans les années 1950.

Le mouvement structuraliste de l'après-guerre a représenté un mouvement de pensée à la recherche de totalités organisées et des lois d'inclusion de leurs éléments, dans un souci de formalisation et de recherche de lois logiques communes, dans des domaines aussi variés que les faits de langage et de société, et les mathématiques.

La structure semble proche du réseau avec lequel elle partage un certain nombre de caractères comme le pouvoir d'organiser une matière et de suggérer des propriétés communes. Mais la structure diffère en ce qu'elle renvoie à l'exigence d'embrasser la totalité où par définition l'ensemble jouit de propriétés distinctes de celles de ses éléments et qui s'étend par absorption de nouveaux éléments répondant à des critères précis

d'inclusion. Par contraste, le réseau se définira par son ouverture sur le milieu, son absence de référence à la totalité, sa capacité d'extension centrifuge, sa réactivité avec le milieu environnant et le caractère flou de ses limites. De la structure on passe ainsi au réseau, en mettant l'accent sur son caractère à la fois opérationnel et infiltrant, caractéristique par exemple des organisations clandestines : « Rien de ce qui concerne l'occupant n'échappe à nos réseaux » (Charles de Gaulle, *Mémoires de guerre*, t. II, p. 280).

Compréhension d'une dynamique

Le réseau associe donc les caractères rigides et contraignants de la structure avec une certaine fluidité. Cette fluidité est aussi manifeste en ce que le réseau associe la mise en relation d'éléments à l'idée de circulation. Le réseau, venu du monde textile, a été très tôt utilisé, par exemple, pour exprimer dans le corps humain la circulation des fluides. Si le mouvement des humeurs a d'abord été décrit comme un mouvement de vaporisation-condensation, à partir du début du XVII^e s. il prend la forme d'une circulation de fluides dans des canaux. Le terme de réseau est employé à propos du système vasculaire, par exemple les capillaires dans le derme : le réseau admirable (*rete mirabilis*) est l'appellation consacrée de l'anatomie classique pour désigner l'arborescence en étoile des vaisseaux capillaires.

La métaphore réticulaire est récurrente dans l'histoire de la pensée médicale, confrontée à la nécessité de penser l'organisme. Elle se confond ainsi avec la pensée de systèmes ou organisations spatio-temporelles souples caractérisées par une fonction. Le système nerveux en est un bon exemple au XIX^e s., le système immunitaire en est un autre au XX^e s. ; ils associent le regroupement d'éléments caractéristiques à l'idée d'un mouvement ou d'une circulation (influx nerveux, molécules messagères ou réceptrices). En ce qui concerne le système immunitaire, le recours récent à la dénomination de réseau (voir Jeme, 1975, dans « Immunologie »), a permis de souligner la « connectivité » du système, caractérisé par la possibilité de faire apparaître une relation entre deux éléments quelconques du réseau, ce réseau jouissant par ailleurs des propriétés d'autorégulation et de déformabilité.

Le réseau et les voies de communication

Le concept de réseau offre aux recherches socio-historiques des systèmes de communication un fil conducteur dans l'évaluation des logiques mises en œuvre. À toutes les périodes, il est possible en effet d'effectuer un rapprochement entre les conceptions de la monnaie, des échanges commerciaux et des voies de communication. Il est employé très précocement pour désigner l'organisation du trafic postal, déjà très efficace dans la France de l'Ancien Régime où le maillage régulier des relais de poste, organisé dès le règne de Louis XI, assure une distribution efficace du courrier d'un point à l'autre du royaume. Mais alors que la logique du réseau

semble naturellement applicable à l'ensemble des voies de communication, historiquement elle s'est inégalement appliquée aux différents aspects de ces voies.

Dans l'Ancien Régime, les routes par exemple sont répertoriées, mais sans conception d'ensemble du réseau routier, et conçues avant tout dans un esprit de compétition entre villes. Le repérage des routes est subordonné à la mise en valeur des centres locaux plus que mis au service d'une pensée de l'ensemble, mettant l'accent sur le caractère fécond des échanges. À partir de 1830, le saint-simonisme joue un rôle dans l'évolution de la pensée de la communication. Comme il a influencé nombre de grands projets internationaux mobilisant capitaux et idées originales. Saint-Simon est préoccupé d'associer les vertus du solide et du fluide, et persuadé de la fécondité de leur association, le premier étant garant de la permanence, le dernier de la vie et du changement qui en est le synonyme. C'est effectivement au XIX^e s. que voies routières, fluviales, et ferroviaires sont unifiées dans les États-nations, dans le but de favoriser le commerce et les échanges, mais ils franchissent aussi les frontières pour favoriser les divers impérialismes, les raccords entre grands axes (chemins de fer ottomans) suscitant des conflits significatifs des luttes d'intérêts nationaux.

Mot-clé de la modernité

On a vu que le réseau pourrait passer pour un cas particulier de structure s'il ne s'en différenciait par son caractère illimité. Il a été adopté comme un des mots-clés de la modernité parce qu'il renvoie à l'extension illimitée des formes et suggère des potentialités et une dynamique. La sensibilité à la notion de réseau est venue de l'apparition, avec l'informatique et les nouveaux media, de mises en relation inédites d'individus ou d'institutions, la création improvisée de nouveaux circuits remplaçant les circuits traditionnels. Le réseau a été reconnu pleinement comme une forme inchoative, particulièrement favorable à la mise au point et à la diffusion de l'innovation. C'est ainsi une notion avant tout socio-économique qui a été importée en sociologie par des chercheurs résolus à briser les barrières disciplinaires en raison de leur caractère sclérosant. Les changements de l'économie, l'ouverture du marché à des formes nouvelles de coopération et d'invention, associant des acteurs inédits, ont servi de prétexte et de fil conducteur à une nouvelle façon de penser la réalité. L'inventivité scientifique et technique a remplacé la création abstraite et intellectuelle, la globalisation des marchés a rendu caducs les anciens schémas. L'appellation de réseau, non explicitement rattachée à une idéologie politique antérieure (marxisme notamment), est venue à point proposer un terme neuf à un lexique en mal de renouvellement.

La sociologie des sciences, sous la forme des « Social Studies of Science », s'est emparée d'un terme qui lui est apparu approprié à ses objectifs propres, en particulier pour décrire la science « telle qu'elle se fait », en mettant l'accent sur les pratiques

(ethnométhodologie) et en s'efforçant de créer des passerelles entre les mondes de la science, de la technique, du droit, du marché et des finances.

Du réseau, elle a retenu le caractère opératoire et promoteur tout en lui donnant un sens nouveau, celui de la mise en relation d'objets hétérogènes, comme la machine et l'homme, le vivant et le non vivant. Le décentrage déjà opéré par le structuralisme par rapport à une philosophie du sujet (Michel Foucault et d'autres avaient évoqué la « mort du sujet ») est ainsi encore accentué dans une mise en perspective où sujets et choses sont mis sur le même plan. Partis d'une structure homogène ouverte par opposition à la structure fermée, nous aboutissons ainsi à un outil pour penser l'hétérogène et le préformel, adapté au changement et privilégiant la mobilité.

Les collèges invisibles

Une application implicite de la notion de réseau en sociologie des sciences est illustrée par l'importance donnée aux « collèges invisibles ». L'expression *invisible college* avait déjà été employée par les cercles de savants se réunissant entre eux à Oxford avant de fonder la Royal Society en 1660. Derek de Solla Price l'a popularisée en insistant plus sur les aspects de pouvoir que sur l'ésotérisme que cette invisibilité suggère. Il entendait par là opposer au monde des organisations officielles des rapports informels malaisés à saisir en premier lieu mais cependant décisifs au niveau opérationnel, proches des réseaux d'espionnage ou des organisations clandestines. Il étudiait des liens complexes d'amitié et de collaboration scientifique qui unissaient des hommes issus de différents laboratoires, l'invisibilité faisant la force et la souplesse de ce mode d'échange et de recrutement. La question restait ouverte de l'évolution de ces collèges invisibles, au fur et à mesure de leur développement et de l'échec ou de la réussite de leurs projets fédérateurs, scientifiques et/ou politiques.

Le but avoué de ce type de sociologie des sciences a été la construction sociale des soi-disant « faits » scientifiques. Un fait scientifique a pour corrélat le réseau d'acteurs sociaux qui le tiennent pour tel. La logique de la persuasion consiste à agrandir le réseau des adeptes qui permet d'asseoir la scientificité du fait en question. Dans cette perspective, il est possible d'assurer le même traitement aux vérités entérinées et aux erreurs puisque les deux manifestent un pouvoir d'attraction sociale mesurable (principe de symétrie proposé par David Bloor pour les doctrines vraies et fausses dans le cadre du *strong program* ou programme dur de la sociologie des sciences).

Une application plus explicite a été revendiquée par la sociologie des sciences de Callon et Latour, version française des « Social Studies of Science », opposant au domaine abstrait et idéaliste des théories la réalité confuse où s'articulent phénomènes de science et phénomènes sociaux. L'accent a été mis sur le laboratoire, au sens iconique du terme, comme un lieu de désordre

et de bruit, où se confrontent et se joignent le vivant et le non-vivant. Le réseau figure ici un moyen de penser l'hétérogène, la confrontation de logiques jugées jusqu'à présent incommensurables, comme des objets de statut différent, hommes et machines, ou niveaux d'organisation différents, firmes, états, associations d'usagers...

Il a été considéré (Callon) comme un outil descriptif de phénomènes typiques de la modernité, correspondant à l'invention de nouveaux rapports entre la science, la technique, le marché et la finance, la clé des interactions associant des logiques *a priori* incommensurables comme celles de la science et de l'économie, modifiant les hiérarchies anciennes, introduisant la nécessité de prise en compte mutuelle de valeurs hétérogènes, et offrant par là même, hors de tout préjugé, de nouvelles possibilités d'action.

En mettant l'accent sur la fluidité et la dynamique de ces « mises en réseau », Callon a insisté sur la difficulté de les formaliser en renvoyant au problème classique de la mathématisation de l'informel. En effet, la définition d'un réseau doit rester minimaliste si l'on veut respecter son caractère de mobilité et d'ouverture. Il existe donc toutes sortes de réseaux dont la typologie a pu être tentée, en fonction de leur degré d'homogénéité ou de convergence. L'augmentation de leur convergence ou de leur homogénéité les fait basculer du côté des structures, avec perte de la fluidité et de la flexibilité qui faisaient leur force opératoire, mais avec le gain d'une information claire et limitée et d'un fonctionnement sans surprise.

La difficulté logique est donc de donner au réseau une extension de plus en plus grande tout en réussissant à en formuler une définition. Le réseau est frappé de mort quand il devient irréversible, c'est-à-dire chosifié. Il doit garder sa structure d'hybride et éviter tout excès de contrainte pour rester opératoire. L'ouvrage *Ces réseaux que la raison ignore* (voir bibliogr.) va plus loin en suggérant qu'à cause de leur caractère invisible les forces mises en jeu échappent à la conscience, sinon à la rationalisation, et que ce type de fonctionnement est source de son efficacité. Les forces qui nous enserrant dans un réseau d'habitudes appartiendraient en fait à notre inconscient. Il peut sembler préférable de les décrire comme de nature intermédiaire entre le conscient et l'inconscient, de façon à la fois à rendre compte de leur pouvoir et de la possibilité de les contrôler et de les manipuler. Si le réseau est un outil, il ne saurait manquer d'émerger quelque part à la conscience opératoire, c'est là une difficulté à laquelle les sociologues des sciences sont nécessairement confrontés et qui laisse présager de nouvelles aventures épistémologiques du terme, confrontés qu'ils sont aux difficultés de transformer le réseau en doctrine, voire en idéologie.

► BARNES B., *Interests and the growth of knowledge*, Londres, Routledge, 1977. — BLOOR D., *Knowledge and Social Imagery*, Londres, Routledge, 1976. — BOLTANSKI L. & THEVENOT L., « Les économies de la grandeur », *Cahiers du Centre d'Études*

de l'Emploi, Paris, PUF, 1988. — CALLON M. éd., *La science et ses réseaux. Genèse et circulation des faits scientifiques*, Paris, La Découverte, 1988 ; (dir.), *Ces réseaux que la raison ignore*, Paris, L'Harmattan, 1992 ; « Réseaux technico-économiques et irréversibilité », in BOYER R. éd., Paris, Éd. EHESS, 1991. — CANGUILHEM G., *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1968. — CRANE D., *Invisible Colleges*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1972. — DUPUY G., « Réseaux, Philosophie de l'organisation », *Encyclopædia Universalis*, p. 875-881. — HUGHES T.P., *Networks of Power, Electrification in Western Societies, 1880-1930*, Baltimore, Johns Hopkins Univ. Press. — LATOUR B., *Les Microbes*, Paris, A.M. Métailié, 1984 ; (éd.), *La science en action*, Paris, La Découverte, 1989. — MULKAY M. éd., *Science observed. New Perspectives in the Sociology of Science*, Londres, Sage, 1982. — MUSTAR P., « Immigration et réseaux de communication », in CERTEAU M. DE & GIARD L. éd., *L'ordinaire de la communication*, Paris, Dalloz, 1983. — SOLLA PRICE D. DE, *Little Science, Big Science*, Columbia Univ. Press, 1963. — SHAPIN S., « History of Science and its sociological reconstructions », *History of Science*, 1982, 20, p. 157-211.

Anne Marie MOULIN

→ Épistémologie.

RÉTROVIRUS

Les virus sont des particules infectieuses ne pouvant se reproduire que grâce aux cellules qu'ils infectent. La cellule leur fournit tous les éléments nécessaires à la synthèse des protéines qui les composent et à la réplication de leur matériel génétique. Ces caractéristiques sont communes à tous les éléments regroupés sous le nom de « virus ». À l'intérieur de cette catégorie, on distingue les virus dont le matériel génétique est constitué d'ADN de ceux dont le matériel génétique est constitué d'ARN. Les rétrovirus appartiennent à ce second groupe. On distingue ensuite, à l'intérieur de ce groupe, un certain nombre de familles qui diffèrent notamment par les modalités de leur cycle de réplication. Sous ce rapport, les rétrovirus se distinguent de tous les autres virus à ARN par l'existence, dans leur cycle de réplication, d'une étape de conversion de l'ARN en ADN nommée *reverse-transcription*. Cette étape, assurée par une enzyme particulière nommée « *reverse-transcriptase* » a lieu après l'entrée du rétrovirus dans la cellule. Le terme de « *reverse* » (ou *rétro*)-transcription, indique qu'on a affaire, avec cette opération de conversion de l'ARN en ADN, à une transformation inhabituelle, ou en tout cas, qui fut considérée comme telle au moment de sa découverte. Et, en effet, avant cette découverte (due à Temin et Baltimore), l'idée a prévalu que l'information génétique circulait toujours et uniquement dans le sens de l'ADN vers les autres macromolécules biologiques. Le postulat d'un transfert de l'information génétique dans une direction exclusive n'ayant pas de fondement logique très clair, avait été nommé « *dogme central* » de la biologie moléculaire par Francis Crick lors d'une conférence demeurée célèbre prononcée à la Société

britannique de biologie expérimentale en 1957 (Crick F., *On protein synthesis*, 1958). Lorsque, quelques années plus tard, fut découvert l'ARN messager et que les étapes de la conversion de l'information génétique furent précisées, le dogme en question prit une forme plus raffinée : le monde biologique terrestre apparaissait structuré selon une hiérarchie en tête de laquelle figuraient l'ADN, puis l'ARN, puis les protéines (ces dernières constituant les acteurs moléculaires de la très grande majorité des transformations chimiques nécessaires à la vie de la cellule). Les conversions d'information d'un type de macromolécule en un autre avaient lieu toujours dans le même sens, toujours en descendant cette hiérarchie informative : ADN → ARN → Protéine. Cet axiome était censé assurer une sorte de « *darwinisme* » au niveau moléculaire : il posait qu'aucune information en provenance des protéines ne pouvait s'inscrire dans l'ADN (une telle conversion aurait pu en effet s'interpréter comme assurant une forme d'hérédité de caractères acquis). La découverte de l'existence de particules infectieuses dont le cycle de réplication comportait une étape de conversion d'ARN en ADN, montrait qu'au moins une part de ces affirmations était erronée (pour une présentation plus détaillée de ces conceptions et de leurs conséquences, voir M. Morange, 1994). Cependant, le principe selon lequel l'information génétique ne remonte jamais de la protéine à l'acide nucléique demeure valable.

Découverte de la reverse-transcriptase

L'existence d'une enzyme telle que la *reverse-transcriptase* (capable de synthétiser de l'ADN à partir d'une matrice ARN) avait été proposée en 1962 par Howard Temin sur la base d'une comparaison des propriétés du virus du sarcome de Rous (un rétrovirus infectant les cellules de poulet) avec le virus SV40 (un virus à ADN infectant les cellules de singe). Ce dernier est capable d'immortaliser les cellules dans le génome desquelles il s'intègre. Temin, ayant remarqué que le virus du sarcome de Rous était également capable d'immortaliser des cellules, en avait conclu que le génome de celui-ci devait s'intégrer dans le génome cellulaire tout comme celui du virus SV40, ce qui impliquait que le matériel génétique du rétrovirus soit converti de la forme ARN qui était la sienne hors de la cellule en une forme ADN. L'hypothèse d'une telle transformation ne fut cependant admise qu'avec la publication conjointe mais indépendante par David Baltimore (« *Viral RNA-dependent DNA polymerase* », *Nature*, vol. 226, 1970, p. 1209-1211) et Howard Temin (« *RNA-dependent DNA polymerase in virions of Rous sarcoma virus* », *Nature*, vol. 226, 1970, p. 1211-1213) de deux articles décrivant l'isolement et la caractérisation de l'enzyme permettant de réaliser la synthèse « *reverse* » de l'ARN en ADN. H. Temin et D. Baltimore recevront le prix Nobel de médecine et de physiologie pour cette découverte en 1975.

*Façonnage des génomes modernes
par l'activité reverse-transcriptase*

Les informations accumulées depuis lors, portant notamment sur la structure des génomes d'organismes eucaryotes, ont permis de montrer que loin qu'il s'agisse d'une activité marginale concernant un type particulier de virus, l'activité de reverse-transcription avait contribué à façonner une part importante de ces génomes. Au moins dix pour cent d'un génome de mammifère, par exemple, portent des marques caractéristiques montrant qu'ils ont été acquis par suite d'opérations de reverse-transcription. Dans certains cas, ces séquences ont une fonction. Ainsi par exemple, l'amylase (une enzyme digestive) présente dans la salive et dans les sucs pancréatiques et excrétée respectivement par les glandes salivaires et le pancréas chez l'homme est-elle synthétisée à partir d'une série de gènes groupés dans un même locus (*cluster*). Certaines copies du gène s'expriment dans les glandes salivaires, d'autres, dans le pancréas. L'analyse moléculaire du locus amylase a permis de retracer son histoire évolutive de manière détaillée : il y a quarante millions d'années environ, il s'est produit une première insertion de séquences reverse-transcrites en amont du gène. Cette séquence, par ses propriétés régulatrices, commande actuellement l'expression du gène dans le pancréas. La duplication de cet ensemble suivie de l'insertion d'un rétrovirus dans la partie régulatrice de l'une des copies a fait apparaître un autre type de régulation qui détermine actuellement l'expression du gène dans les glandes salivaires (Samuelson *et al.*, 1990 ; Ting *et al.*, 1992). Ainsi, c'est par des séquences régulatrices apportées par des insertions successives de séquences reverse-transcrites qu'est actuellement commandée l'expression des gènes du locus amylase dans chacun des tissus où il s'exprime spécifiquement. L'évolution a donc sélectionné certaines fonctions acquises par suite d'une reverse-transcription suivie de l'intégration de ces séquences dans le génome. L'activité enzymatique de reverse-transcription elle-même s'avère ainsi avoir joué un rôle (dont l'ampleur reste partiellement à évaluer) dans le façonnage des génomes modernes (pour une revue sur ces questions voir A.M. Weiner *et al.*, 1986 ; H.A. Wichman *et al.*, 1992 ; P. Nouvel, 1994).

Cycle de réplication du rétrovirus

Si on fait commencer le cycle de réplication viral par un virion libre, la première étape du cycle est l'entrée du virus dans la cellule et l'amorçage du processus de réplication (reverse-transcription). La présence à la surface de la cellule de récepteurs ayant une affinité avec la protéine d'enveloppe du virus est nécessaire à son entrée dans la cellule. C'est ainsi que certaines cellules sont résistantes à tel rétrovirus, tandis que d'autres y sont sensibles ou bien résistantes à tel rétrovirus et sensibles à tel autre : c'est la présence à leur surface d'un récepteur ayant une affinité avec la

protéine d'enveloppe du virus qui détermine cette restriction de l'infection.

Après introduction du génome viral (sous forme d'ARN) dans la cellule, commence la série d'opérations qui vont conduire à sa conversion en ADN. L'ensemble de ces opérations requiert l'activité enzymatique portée par la reverse-transcriptase. Une fois achevée la reverse-transcription, le génome viral (maintenant sous forme d'ADN) transite vers le noyau de la cellule. Une autre protéine virale spécifique (l'intégrase) intervient alors pour permettre l'intégration obligatoire du génome viral dans le génome cellulaire. C'est là une seconde étape du cycle qui distingue cette classe de virus de toute autre : l'intégration du génome viral dans le génome de l'hôte. Chez de nombreux autres virus (comme le virus SV40, par exemple), une telle intégration peut avoir lieu, mais seulement sporadiquement. Le génome viral, une fois intégré dans le génome de l'hôte, est nommé « provirus ». Il fonctionne alors comme un locus cellulaire semblable aux autres loci (séquences régulatrices déterminant l'initiation de la synthèse par la RNA polymérase cellulaire, séquence de polyadénylation marquant l'extrémité de la séquence transcrite, etc.). Il produit des ARNs qui constitueront pour partie le génome de nouveaux virions et pour partie les ARNs messagers orientés vers la production des protéines virales.

Les protéines ainsi produites s'assemblent spontanément, dans le cytoplasme, pour former la capsid du virion autour de deux molécules d'ARN viral identiques (le génome rétroviral se trouve ainsi constitué de deux brins d'ARN). Dans le même temps, les protéines d'enveloppe du virus (transmembranaires) s'accumulent dans la membrane de la cellule. La partie interne de ces protéines se rassemble autour de la capsid et il en résulte la formation d'une particule virale qui bourgeonne progressivement à la surface de la cellule. Le bourgeonnement s'achève par la libération de la particule virale qui peut produire une nouvelle infection selon le même cycle. L'ensemble des étapes qui viennent d'être décrites constitue un cycle rétroviral complet. La cellule infectée conserve le rétrovirus intégré sous forme de provirus.

Les vecteurs rétroviraux

Le système d'intégration dans le génome dont dispose le rétrovirus est particulièrement adapté pour réaliser des transferts génétiques dans des cellules eucaryotes (il permet une intégration précise d'ADN étranger quoique en un site imprévisible). C'est ce qui a fait songer très tôt à l'utilisation des rétrovirus comme vecteurs de gènes. Dans de tels vecteurs, on cherche à conserver les propriétés d'infection et d'intégration du rétrovirus, tout en supprimant (en général) ses propriétés de multiplication. Ceci est obtenu par une modification génétique du génome viral qui est réalisée par les techniques devenues classiques du génie génétique. Dans la plupart des vecteurs rétroviraux, les gènes viraux sont partiellement délétés (autre

le fait qu'on souhaite généralement supprimer la propriété de réplication du virus, il existe une contrainte qui limite la taille du génome viral et oblige à supprimer des gènes viraux pour en ajouter d'autres). Ce type de système s'est révélé suffisamment efficace pour envisager une utilisation de vecteurs rétroviraux dans le cadre de thérapies géniques (pour une revue sur les vecteurs rétroviraux, voir A.D. Miller, 1992).

La génétique rétrovirale

Cependant, un certain nombre d'applications qu'on avait d'abord cru pouvoir tirer des vecteurs rétroviraux se sont heurtées à leur instabilité génétique au cours du cycle infectieux. Temin écrit en 1988, dans un article intitulé « Les vecteurs rétroviraux, promesses et réalités » : « Les problèmes [rencontrés avec les vecteurs rétroviraux] sont des obstacles pour ceux qui cherchent à utiliser ces vecteurs, tandis qu'ils sont des sources d'observations nouvelles pour ceux qui sont principalement intéressés par la réplication rétrovirale. » Un certain nombre de vecteurs rétroviraux, initialement mis au point dans la perspective d'une application pratique quelconque (les articles qui décrivaient leurs propriétés commençaient, assez rituellement, par l'énumération des avantages que présentaient les vecteurs rétroviraux par rapport aux autres modes d'introduction de matériel génétique dans les cellules), vont alors être utilisés pour servir à l'élucidation plus précise des particularités de la génétique rétrovirale, en particulier dans le laboratoire de H. Temin à Madison (Wisconsin). C'est ainsi que seront déterminées successivement, dans ce laboratoire, la fréquence de mutations ponctuelles au cours de l'infection, la fréquence de recombinaisons, la fréquence de délétions, la nature des remaniements observés, etc. (pour des rétrovirus de la souris et du poulet). Dans tous les cas, ces fréquences apparaîtront nettement plus élevées (d'un facteur mille à dix mille) que les valeurs connues de ces mêmes fréquences pour les gènes cellulaires. Autrement dit, la fréquence de mutation au cours d'un cycle de réplication virale est mille à dix mille fois plus importante qu'au cours d'un cycle de réplication cellulaire. Ces données ont ouvert la voie à une analyse directe des propriétés de la reverse-transcriptase dans des systèmes acellulaires. Dans de tels systèmes, il est possible de contrôler précisément le rôle de la reverse-transcriptase. On a pu ainsi montrer qu'un certain nombre de caractéristiques particulières de la génétique rétrovirale (en particulier le fort taux de mutation et de recombinaison qui la caractérise) pouvaient être directement reliées aux propriétés de la reverse-transcriptase elle-même (DeStefano *et al.*, 1992 ; Negroni *et al.*, 1995).

Les rétrovirus oncogènes

Des insertions de matériel génétique étranger au virus lui-même sont également observées avec une fréquence élevée. Les rétrovirus oncogènes, d'abord

caractérisés comme virus capables de générer des tumeurs (*onkos* = tumeur), ceci, dès 1911, puis, à partir de 1976, comme virus porteurs d'un oncogène d'origine cellulaire, constituent un exemple particulièrement net et important de ce type de modifications génétiques. L'acquisition des fonctions oncogènes se solde en général par la perte d'une au moins des fonctions virales de sorte que les virus oncogènes sont défectifs pour la réplication. Le virus RSV (virus du sarcome de Rous) constitue une exception à cette règle. Il est l'unique rétrovirus oncogène identifié jusqu'ici qui possède par ailleurs tous les gènes nécessaires à sa propre réplication. Ce virus, porteur de l'oncogène viral *src* a permis, d'autre part, d'identifier le premier oncogène cellulaire par une recherche d'homologie entre la région oncogénique du virus RSV et le génome de ses cellules hôte. Ce résultat obtenu en 1976 par Dominique Sthelin dans l'équipe de Harold Warmus et Michael Bishop (Sthelin *et al.*, *DNA related to the transforming gene of avian sarcoma virus is present in normal avian DNA*, 1976) a pu ensuite être généralisé : tous les oncogènes trouvés dans les rétrovirus dérivent d'un oncogène cellulaire. L'oncogène intégré dans un rétrovirus se distingue cependant par plusieurs caractéristiques (en particulier par l'absence d'introns), ce qui a conduit à conserver les dénominations d'oncogène viral et oncogène cellulaire pour les différencier (pour une revue sur les rétrovirus oncogènes, voir M. Vasseur, 1989).

Variabilité génétique et thérapie

Les divers aspects de la génétique des rétrovirus qui viennent d'être brièvement évoqués ont pour point commun de mettre l'accent sur leur variabilité génétique. Le concept d'une semblable variabilité a été développé sous le nom de *quasiespécies* (quasi-espèce) par Manfred Eigen (Eigen *et al.*, 1981). Initialement proposé pour rendre compte du caractère hétérogène des populations d'ARN, le concept est apparu adapté pour décrire les populations rétrovirales au cours d'une infection (Fisher *et al.*, 1988). Ces populations, en effet, ne sont pas constituées d'un ensemble homogène de particules virales mais d'une série de variants. C'est tout particulièrement dans la recherche d'une thérapie efficace contre le virus HIV (un rétrovirus) responsable du SIDA (syndrome d'immuno-déficience acquise) que l'importance de ce caractère particulier des populations rétrovirales est apparue : les thérapies mises au point, un temps efficaces, se heurtaient à l'apparition de variants résistants. C'est par les particularités liées à certains traits fondamentaux de la génétique rétrovirale que l'on interprète la résistance inhabituelle aux traitements qui a été rencontrée dans la recherche d'une thérapie efficace contre le SIDA. C'est d'ailleurs de l'identification d'un motif stable dans la protéine d'enveloppe du virus (un motif de taille réduite mais qui paraît être partagé par toutes les particules infectieuses d'une population) que proviennent actuellement quelques-uns des espoirs

les plus prometteurs de vaccination et d'amélioration des thérapies.

Génétique rétrovirale et évolution

H. Temin a avancé l'idée selon laquelle la forte instabilité génétique des rétrovirus constituait, paradoxalement, un facteur d'adaptation pour les rétrovirus (H. Temin, *Sex and recombination in retroviruses*, 1991). À ce titre, elle pourrait avoir été sélectionnée par l'évolution. L'instabilité génétique, conférant aux rétrovirus la capacité de contourner les défenses de l'hôte qu'elles infectent, aurait constitué un avantage sélectif qui se serait, de ce fait, trouvé conservé. Comme toutes les interprétations évolutives, celle-ci venant « après coup », et constatant simplement une situation, se borne à l'interpréter dans les termes d'un « avantage ». Il est en tout cas certain que la faible fidélité de réplication des rétrovirus est incompatible avec la réplication d'un génome d'organisme pluricellulaire (qui exige un degré de fidélité de la réplication bien plus élevé). Elle ne paraît pas être incompatible avec la réplication des rétrovirus, et ceci suffit peut-être à expliquer que la génétique des rétrovirus diffère sensiblement de la génétique cellulaire.

► BALTIMORE D., « Viral RNA-dependent DNA polymerase », *Nature*, vol. 226, 1970, p. 1209-1211. - CRICK F., « On protein synthesis », *Symposium of the society of experimental biology*, vol. 12, 1958, p. 138-163. - DE STEFANO et al., *Journal of Virology*, vol. 66, 1992, p. 6370-6378. - EIGEN M. et al., « The origin of genetic information », *Scientific american*, vol. 244, 1981, p. 88-118. - FISHER A.G. et al., « Biologically diverse molecular variants within a single HIV-1 isolate », *Nature*, vol. 384, 1988, p. 444-447. - MILLER A.D., « Retroviral vectors », *Current topics in microbiology and immunology*, vol. 158, 1992. - MORANGE M., *Histoire de la biologie moléculaire*, Paris, La Découverte, 1994. - NEGRONI M. et al., « Homologous recombination promoted by reverse-transcriptase during copying of two distinct rDNA templates », *Proceedings of the national academy of science, USA*, vol. 92, 1995, p. 6971-6975. - NOUVEL P., « The mammalian genome shaping activity of reverse-transcriptase », *Genetica*, vol. 93, 1994, p. 191-201. - SAMUELSON L.C. et al., « Retroviral and pseudo-gene insertion sites reveal the lineage of human salivary and pancreatic amylase genes from a single gene during primate evolution », *Molecular and cellular biology*, vol. 10, 1990, p. 2513-2520. - STEHLIN D. et al., « DNA related to the transforming gene of avian sarcoma virus is present in normal avian DNA », *Nature*, vol. 260, 1976, p. 170-173. - TEMIN H.M., « Retrovirus vectors, promise and reality », *Science*, 1989, p. 983 : « Sex and recombination in retroviruses », *Trends in genetics*, 1991, vol. 7, p. 71-74. - TEMIN H.M. & MIZUTANI S., « RNA-dependent DNA polymerase in virions of Rous sarcoma virus », *Nature*, vol. 226, 1970, p. 1211-1213. - TING C.N. et al., « Endogenous retroviral sequences are required for tissue-specific expression of a human salivary amylase gene », *Genes and development*, vol. 6, 1992, p. 1457-1465. - VASSEUR M., *Les virus oncogènes, introduction à la biologie moléculaire du cancer*, Paris, Hermann, 1989. - WEINER A.M. et al., « Non-viral retroposons : genes, pseudogenes and transposable elements generated by the reverse flow of genetic information », *Annual review of biochemistry*, vol. 55, 1986, p. 631-661. - WICHMAN H.A. et al., « Transposable elements and the

evolution of genome organization in mammals », *Genetica*, vol. 86, 1992, p. 287-293.

Pascal Nouvel

→ ADN ; Gène ; Génétique ; Oncogène ; Sida ; Virus.

RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE

Cette notion naît avec l'histoire des sciences elle-même, au XVIII^e s. C'est alors que le terme révolution, d'usage classique en astronomie pour désigner le mouvement cyclique des astres, « descend du ciel sur la terre », comme le remarque Alain Rey. Ses premières occurrences appliquées à l'histoire d'une science s'inscrivent dans un type de littérature académique. Louis Bernard Bovier de Fontenelle, chargé de rédiger les *Mémoires et Histoire de l'Académie des sciences*, s'efforce de récapituler en un tableau l'état d'avancement des disciplines représentées à l'Académie. À propos du calcul infinitésimal, Fontenelle écrit, en 1727, que c'est l'époque d'une « révolution presque totale dans la géométrie ». Le mot se répand très vite pour parler de l'œuvre de Newton et se banalise dans l'*Encyclopédie*. À chaque discipline ses révolutions, même si l'histoire de la mécanique reste un modèle. Les révolutions, souvent associées au nom d'un savant, marquent le début d'une époque. L'origine astronomique du terme reste prégnante puisque les révolutions sont des événements répétables, voire périodiques, qui rythment et périodisent l'histoire des sciences comme celle des peuples. Le sens de renversement et de rupture avec un système, qui prédominera après la Révolution française, émerge à la fin du XVIII^e s., notamment lorsque Lavoisier et ses disciples parlent d'une « révolution en chimie » pour dire le renversement de la théorie du phlogistique au bénéfice de la doctrine, alors couramment désignée comme antiphlogistique. Dans ce contexte très polémique, la révolution est perçue comme un programme à accomplir qui prend la dimension de fondation d'une science nouvelle, moderne. C'est en un sens voisin que Kant évoque la « révolution copernicienne » dans la préface à la seconde édition de la *Critique de la raison pure* (1787). Cet épisode historique, correspondant au passage d'un système géocentrique à un système héliocentrique, est proposé comme un modèle pour réformer la connaissance : « obliger la nature à répondre à ses questions et ne pas se laisser conduire pour ainsi dire en laisse par elle », ou encore régler les objets sur notre intuition.

L'historiographie positiviste du début de ce siècle a encouragé le thème de « La Révolution scientifique », fondatrice de la science moderne. Cet événement, commencé au XVI^e s., est supposé s'étendre sur deux siècles au moins et se propager de l'astronomie à la mécanique puis à la chimie, etc.

Aujourd'hui « révolutions scientifiques » est plutôt au pluriel et pensé par référence à la définition qu'en donne Thomas Kuhn dans *La Structure des révolutions scientifiques*. Cet ouvrage, publié en 1962, définit

un modèle pour penser l'évolution des sciences. Par révolution scientifique Kuhn entend un changement scientifique par rupture. Il s'oppose à l'idée d'une avancée graduelle et cumulative du savoir par collection de données observables ou de résultats expérimentaux. Pour Kuhn une théorie n'est pas renversée parce que des évidences expérimentales s'accumulent contre elle mais parce qu'une autre vient la remplacer qui semble plus efficace pour résoudre un ensemble de problèmes ou d'énigmes. Kuhn souligne ainsi que le système copernicien a triomphé parce qu'il permettait de résoudre les problèmes que l'astronomie ptolémaïque soulevait sans être capable de les résoudre. Bien souvent des solutions ont été proposées des siècles auparavant mais ces anticipations ne peuvent être reconnues comme événements précurseurs qu'après coup, quand la révolution a été accomplie.

La révolution scientifique est plus que le simple remplacement d'une théorie par une autre. C'est un changement de paradigme (*paradigmatic shift*). Le terme paradigme désigne, d'une part, les exemples bien connus de solutions à des problèmes qui peuvent fonctionner comme des règles pour résoudre d'autres problèmes. D'autre part, il recouvre « l'ensemble de croyances, de valeurs reconnues et de techniques qui sont communes aux membres d'un groupe donné ». Cette double dimension cognitive et sociale du paradigme, souvent dénoncée comme une ambiguïté, a fait la fortune du concept introduit par Kuhn qui autorisait à la fois une histoire des sciences, centrée sur la formation des concepts et théories et une histoire sociale des sciences, attentive aux institutions et aux communautés scientifiques. Le paradigme, constituant une sorte de complexe de connaissances et de pratiques partagées, d'affiliations sociales, institutionnelles et de valeurs éthiques transgresse la barrière entre histoires interne et externe des sciences.

La notion de révolution scientifique appelle d'autres notions. Elle se définit par rapport à la « science normale », au cours ordinaire de l'avancée des connaissances. Pour Thomas Kuhn c'est avant tout l'activité de résolution de problèmes qui définit la science normale. L'activité normale consiste à chercher des solutions aux problèmes qui se posent dans le cadre du paradigme, en faisant jouer les règles dans le paradigme, en ajustant les résultats expérimentaux et les prédictions théoriques par exemple. La science normale ne cherche pas à innover ; c'est, selon Kuhn, une activité foncièrement conservatrice qui consiste à actualiser le potentiel de solutions offertes par un paradigme.

Les crises sont une condition préalable à l'apparition d'une nouvelle théorie. Elles sont provoquées par des échecs répétés dans l'activité normale de résolution des problèmes, faisant apparaître des anomalies irréductibles. La science en état de crise, ou science extraordinaire, se caractérise par une prolifération de versions différentes du paradigme qui distendent les règles habituelles de résolution des problèmes, et le recours à la philosophie pour discuter les fondements

théoriques. Mais le paradigme en crise ne disparaît jamais s'il n'est remplacé par un autre qui émerge et parvient à le supplanter soit par le pouvoir de la persuasion suivi de changements institutionnels, soit par disparition de ceux qui soutenaient l'ancien paradigme.

Enfin le choix entre deux paradigmes est une alternative car les modes de pensée et vie communautaire propres à chacun sont incompatibles. Kuhn insiste sur cette idée d'incommensurabilité. Elle implique qu'il n'y a pas de langage d'observation neutre qui serait susceptible de plusieurs interprétations. On ne peut pas supposer un quelque chose de commun auquel se référerait le terme « masse » dans le paradigme newtonien et dans le paradigme einsteinien. Malgré leur schéma commun de discontinuités radicales, la théorie kuhnienne du changement par révolutions scientifiques se distingue profondément du progrès par ruptures décrit par Gaston Bachelard. Kuhn ne considère pas la victoire d'un paradigme sur un autre comme une meilleure approximation de la vérité. Chaque paradigme posant ses propres problèmes, on ne peut pas, en toute rigueur, comparer leur efficacité pour les résoudre. Bien que Kuhn concède qu'un nouveau paradigme doit au moins conserver la capacité de résoudre les problèmes déjà résolus par ses prédécesseurs, il ne pense pas l'histoire des sciences en terme de progrès.

► COHEN I.B., « The Eighteenth-Century Origin of the concept of Scientific Revolution », *Journal of the History of Ideas*, 37, 1976, 257-288 ; *Revolution in Science*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1985. - KUHN T., *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Gallimard, 1972 (éd. originale, 1962, et postface, 1969) ; *La Révolution copernicienne*, Paris, Fayard, 1973 (éd. originale, 1959). - LINDBERG D. & WESTMAN R.S., *Reappraisals of the Scientific Revolution*, Cambridge Univ. Press, 1990. - REY A., *Révolution, histoire d'un mot*, Paris, Gallimard, 1989.

Bernadette Bensaude-Vincent

→ Continuité ; Découverte ; Épistémologie ; Kuhn ; Paradigme ; Progrès ; Rupture ; Théorie.

ROUX Wilhelm, 1850-1924

Biologiste allemand. Considéré comme étant l'un des fondateurs de l'embryologie expérimentale moderne. Roux, alors étudiant de Schwabe, consigne le fruit de ses premières recherches visant à établir la relation existant entre la forme et la fonction au niveau embryonnaire, dans un ouvrage paru en 1874 et devenu rapidement célèbre, intitulé *Körperform und das Physiologische Problem ihrer Entstehung*. Dans un second livre, publié en 1881, *Der Kampf der Theile im Organismus*, Roux soutient qu'une lutte pour l'existence a lieu à l'échelon cellulaire et moléculaire. Il considère que les stimuli nutritif et fonctionnel fournissent les conditions environnementales nécessaires à l'exercice de cette même lutte. Si ces stimuli persistent, ils finissent par se manifester sous la forme de variations visibles. Cette conception semble ainsi corroborer la

théorie de la sélection naturelle. Pourtant, comme la plupart de ses contemporains, dont Haeckel, Roux note l'incapacité de cette même théorie à rendre compte de la multitude de changements devant se produire à chaque étape phylogénétique du développement d'un organisme. Sur les plans anatomique et physiologique, la défense de la thèse de l'adaptation fonctionnelle des parties du corps humain dans les *Beiträge zur Morphologie der funktionellen Anpassung* (1883-1885) conduisit Roux à analyser les stress et les tensions qui contraignent les parois des vaisseaux à réagir aux effets de la pression du sang et les os, les cartilages et les tendons à s'adapter aux malformations, maladies et accidents. Travaux témoignant de l'appartenance de Roux (avec Herbert Spencer, Cope, Osborn et Hyatt) à l'école néolamarckienne dont les membres se sont attachés à définir le rôle joué par l'effort ou la tension – mécanique – que les organismes déploient pour s'adapter aux conditions du milieu extérieur dans l'apparition d'espèces nouvelles. Enfin, ses recherches en embryologie expérimentale aboutirent à la conception d'un projet d'analyse causale du développement de l'embryon, base de son *Entwicklungsmechanik*, comme interprétation mécaniste (et non simple méthode d'analyse) de ce dernier processus.

« Körperform und das Physiologische Problem ihrer Entstehung (1874). – Der Kampf der Theile im Organismus (1881). – Beiträge zur Morphologie der funktionellen Anpassung (1883-1885). – Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen, 2 vol. (1895). – Für unser Programm und seine Verwirklichung, Archiv für Entwicklungsmechanik der Organismen, 5, 1897, 1-80, 219-342. – Die Entwicklungsmechanik, ein neuer Zweig der biologischen Wissenschaft (Vorträge und Aufsätze über Entwicklungsmechanik der Organismen) (1905).

▶ ALTMANN K., « Zur kausalen Histogenese des Knorpels. W. Roux's Theorie und die experimentelle Wirklichkeit », *Ergebnisse der Anatomie und Entwicklungsgeichte*, 37, 1964, p. 5-31. – CHURCHILL F.B., « Chaby, Roux, and the Experimental Method in Nineteenth-Century Embryology », *Ronald N. Giere and Richard S. Westfall. Foundations of Scientific Method: The Nineteenth Century*. Bloomington (Ind.), 1973, p. 161-205 ; « Roux », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1975, t. XI, p. 570-575. – MORGAN T.H., « Developmental Mechanics », *Science*, n.s. 7, 1898, p. 156-158. – OPPENHEIMER J.M., « Analysis of Development: Methods and Techniques », *Essays in the History of Embryology and Biology*. Cambridge (Mass.), 1967, 62-91, p. 173-205. – RUSSELL E.S., *Form and Function. A Contribution to the History of Animal Morphology*, 1916, p. 314-334 ; *The Interpretation of Development and Heredity*, 1930, p. 95-111.

ÉRIC HAMRAOUI

— Embryogenèse ; Lamarckisme ; Régulation moléculaire.

ROYAL SOCIETY

The History of the Royal Society of London for the Improving of Natural Knowledge (Thomas Sprat) date de 1667, un an après le grand incendie que Sprat

évoque pour présenter son projet fondateur : « Il faut ériger une nouvelle philosophie comme il faut bâtir une nouvelle Londres. » L'ouvrage fut traduit en français dès 1668, sous le titre de *Histoire de l'institution, dessein et progrès de la Société Royale de Londres*. Cette nouvelle philosophie est la « philosophie expérimentale » dont l'*Histoire* est le manifeste. La connaissance aura connu deux époques, « avant » et « après » la Royal Society qui néanmoins a eu ses précurseurs, en premier lieu le chancelier Bacon. Selon Sprat, le programme de la Royal Society s'attaque aux « causes par lesquelles les études ont été supprimées dans tous les siècles précédents ; qui ont été l'intérêt des sectes, la violence des disputes, les arts plausibles de l'éloquence, les controverses religieuses, les opinions dogmatiques, la pauvreté des entrepreneurs et le défaut d'une lignée continue d'expérimentateurs ».¹ Sprat critique aussi un autre réformateur, Monsieur Descartes, accusé des péchés d'individualisme (il « dédaigne » que ses pensées « soient mesurées ou confirmées par l'assistance d'autrui ») et d'idéalisme. Car ceux « qui veulent seulement transcrire leurs propres pensées... posent des choses générales qui leur sont particulières à eux-mêmes seulement ». Sprat conteste également la possibilité et l'avantage de révoquer tout en doute et récuse le scepticisme autant que le dogmatisme.

À l'inverse des philosophies du passé, la philosophie expérimentale se veut neutre à l'égard des controverses religieuses qui constituent les disputes « les plus dangereuses ». Elle n'a pas de prérogatives à préserver, elle puise dans un « fonds commun » (*common stock*) acquis dans les « laboratoires » et non dans les Écoles, « où quelques-uns ont enseigné, et tout le reste a soutenu ». Seule « l'observation égale et sans dépendance » peut prétendre à l'« impartiale, constante et universelle revue de toute la création ». Égale et sans dépendance, cela signifie que l'observation se trouve à l'abri de l'« esclavage des intérêts particuliers » et, d'une façon plus positive, qu'elle doit se construire sur des assises indiscutables. Une recherche empirique collective – la Royal Society devrait être un *melting pot* de nationalités, religions et professions différentes – s'acquittera de ces deux exigences. L'assemblée plénière de la Société se prononce et sur les questions de fait (*matters of fact*), et sur la « recherche des causes ». On recueille et on trie le donné, on procède aux expériences dont on évalue la portée, pour aboutir à des conclusions partagées par le collectif des chercheurs puisqu'elles portent sur les « arguments silencieux, effectifs et incontestables » des « productions réelles » de la nature. Sprat souligne le contraste entre la « méthode d'enquête » de la Société, qui efface les idiosyncrasies et étouffe les passions partisans, avec les arguments des philosophes. La rhétorique vit du manque des expériences cruciales que Bacon réclamait, alors que la connaissance expérimentale n'est pas une affaire d'opinion. La nouvelle science se soutient de l'« union » naturelle des « mains » qui font les

expériences, et des « yeux » et du « cerveau » qui les « enregistrent ».

La connaissance expérimentale effectue une « inspection » directe et « réitérée » des « choses », sans intermédiaire et sans voile. Sprat énonce là le mythe fondateur de la physique moderne, que le président de la Société entre 1703 et 1727, Isaac Newton, exprimera dans le *hypotheses non fingo*. Il s'agit bien d'une fondation : « Je poserai comme leur loi fondamentale [des Messieurs de la Royal Society] que toutes fois et quantes qu'ils ont de *manier* l'objet, l'expérience (*experiment*) a toujours été faite par quelques-uns des Membres. » On « touche » et on « voit » la Nature même, la Royal Society a l'« expérimentation » en vénération car celle-ci se révèle être un procédé inartificiel (elle serait une opération naturelle si elle n'était sur une artefact), que Sprat oppose à l'« habileté (*acuteness*) de quelque commentateur sur elle ». La matière de fait s'établit par des descriptions qui transcrivent sans déformation le donné.

Sprat met l'accent sur la fixation du fait plutôt que sur la recherche des causes. Les sciences ne sont pas mûres pour l'explication. Si l'assemblée décide définitivement de la matière de fait – « il faut nécessairement que cet examen critique et réitéré des choses qui sont les simples objets de leurs yeux mette hors de doute... la réalité de ces opérations que la Société aura positivement déterminé d'avoir réussi » –, la réflexion sur les causes est en général condamnée à rester conjecturale. Sprat fait l'éloge de l'« hésitation de pensée », de la « fluctuation » et de la « tardiveté à conclure », propre aux assemblées (nous dirions : à la communauté scientifique). Il sait les insuffisances des sciences expérimentales naissantes, aussi lui importe-t-il surtout de définir une méthode qui permettra d'atteindre plus tard à l'explication théorique. « Par cette belle, égale et soumise manière de ne rien enregistrer que des histoires et des relations, elle [la Société] a laissé lieu aux autres qui succéderont de changer, d'augmenter, d'approuver et de lui contredire selon qu'ils trouveront à propos. Par là elle a fait une ferme confédération entre ses propres labours présents et l'industrie des siècles à venir. » Cette pratique cumulative et publique, strictement contrôlée par l'expérimentation, lancée sur bases d'une expansion sans borne supérieure. « Ils ont essayé de mettre la connaissance de la nature en un état de s'augmenter perpétuellement, en établissant une correspondance inviolable entre la main et le cerveau. Ils se sont étudiés à la faire non seulement une entreprise d'une saison mais une affaire de temps, un ouvrage assuré, permanent, à l'usage de tout le monde et qui ne peut être interrompu. » La science ainsi conçue sera à l'abri de « la perte d'une bibliothèque [...], de la ruine d'un langage ou de la mort de quelque peu de philosophes ». Pour être « détruite », il faudrait « que les hommes perdent leurs yeux et leurs mains ».

L'expérimentation fait saisir l'objet dans sa plénitude et assure la communication entre les sciences.

« De cette union des yeux et des mains procèdent ces deux avantages. Par là il y aura une entière compréhension de l'objet en toutes ses apparences ; et ainsi il y aura une communication mutuelle de la lumière d'une science à l'autre ; au lieu que les labours d'un particulier ne sont que comme un profil qu'on ne voit que d'un côté. » La nouvelle science est par vocation une entreprise plurielle – son objectivité s'étaye d'accords intersubjectifs, étayés à leur tour par un ancrage dans l'expérience : la répétition des expériences, avec les mêmes résultats, devant des observateurs différents en garantit la validité. Si, se demande Sprat, dans la vie courante et dans les tribunaux on se contente de deux ou trois témoignages, comment mettre en doute l'examen appliqué de soixante ou cent connaissances ? L'examen collectif écarte l'obstination des dogmatiques qui « se fixent aveuglément à tout ce qu'ils peuvent empoigner », de même qu'il déjoue la « dubitation sceptique », menacée d'« instabilité perpétuelle ».

La définition rigoureuse de la méthode expérimentale – Sprat en expose le rituel – a transformé l'incertitude des débuts de la Société en l'accomplissement d'une mission dont il se fait le héraut. Dans leurs « premières rencontres » à Oxford, Robert Boyle, John Walkins, John Wallis, William Petty, Christopher Wren, Robert Rooke « s'occupaient surtout d'essais de Chimie et de Mécanique, ils n'avaient point ni de règle, ni de méthode fixe : leur intention était plutôt de se communiquer l'un l'autre, les découvertes qu'ils pourraient faire en un circuit si étroit que de rechercher quelque chose conjointement, constamment ou régulièrement ». Avec la « ratification légale » par Charles II, en 1666, la Société est créée « pour toujours » ; bénéficiant de la protection royale et dotée d'une « constitution régulière », l'« institution complète » de la Royal Society se parachève. Elle est devenue « one Body Corporate » « qui doit se continuer sous le même nom, dans une succession perpétuelle ».

Il est permis de voir dans cette succession le symbole de la pérennité d'une science qui a su faire du jeu des conjectures théoriques – le cerveau – et des réfutations expérimentales – les mains – le principe de sa générativité. Elle se nourrit d'un idéal du moi dont T. Sprat a également indiqué la teneur : l'*ethos* scientifique tient du modèle de la conversion, les lignes suivantes préfigurent une longue suite d'écrits, jusqu'à telles pages de *La psychanalyse du feu* ou *Le rationalisme appliqué* de Gaston Bachelard et jusqu'à la pédagogie de Karl Popper. « Mais surtout, ils se sont gardés d'eux-mêmes, de peur que la force de leurs propres pensées ne les portât dans l'erreur : de peur que le bonheur qu'ils ont en une découverte ne les limitât incontinent à une seule voie d'essai : de peur que leurs fautes ne les décourageassent et leurs succès ne leur abâtissent la diligence. Et ils ont fait que toutes ces excellentes qualités philosophiques par un long usage sont devenues le génie pécunier de cette Société, et qu'elles doivent descendre identiques à leurs successeurs, non

pas comme des lois circonstancielles qui peuvent être négligées ou changées par le temps ; mais comme la propre vie de leur constitution. »

► LYONS H. (Sir). *The Royal Society 1660-1940*, Cambridge, Univ. Press, 1944.

Fernando Gil

→ Académies ; Progrès ; Réseau.

RUPTURE

En tant que catégorie d'histoire et de philosophie des sciences, la notion de rupture peut être prise en un sens large et en un sens strict. Elle désigne en un sens large les discontinuités dans le développement du savoir, les événements par lesquels le nouveau savoir s'avère irréductible à l'ancien savoir. Mais en un sens strict, elle est tributaire d'une interprétation particulière de la discontinuité. On doit en effet à Bachelard d'avoir promu la notion de rupture au rang de concept épistémologique, de sorte qu'elle ne soit plus que l'un des noms de la discontinuité : on s'attachera ici à la distinguer de celui de « révolution scientifique ».

Indiquer la solution de continuité entre connaissance commune et connaissance scientifique, telle est la principale fonction du concept bachelardien de rupture. L'épistémologue français tient que cette discontinuité est rendue manifeste par le « nouvel esprit scientifique », par l'esprit de la nouvelle mathématique et la nouvelle physique. Les géométries non euclidiennes, la physique relativiste et la mécanique quantique donnent en effet l'exemple de théories qui contredisent totalement le sens commun. De surcroît, on peut penser qu'elles doivent précisément leurs succès au fait qu'elles se sont constituées contre la connaissance commune. De ce constat porté sur l'état contemporain du savoir scientifique Bachelard tire une conséquence générale : « Le progrès scientifique manifeste toujours une rupture » (*Le matérialisme rationnel*, Paris, PUF, p. 207). Le devenir d'une science apparaît ainsi comme le procès au cours duquel le savoir rompt progressivement avec la connaissance immédiate, en se libérant des « obstacles épistémologiques » propres à la connaissance commune, en passant du donné au construit, de l'empirique au rationnel.

De cette thèse générale il résulte que le concept de rupture a aussi pour fonction de rendre compte d'un autre type de discontinuité. Il ne s'agit pas seulement de la question épistémologique du rapport de la connaissance non scientifique avec la connaissance scientifique, mais aussi de la question historique du rapport des différentes théories qui se succèdent dans un même champ disciplinaire. Elles font place les unes aux autres dans un procès discontinu scandé par des ruptures. Mais si c'est désormais les théories qui rompent les unes avec les autres, elles ne rompent en fait qu'avec ce que les précédentes théories conservaient de

la connaissance commune et des obstacles épistémologiques qui en relèvent. D'où la thèse suivant laquelle la discontinuité épistémologique de la connaissance non scientifique et de la connaissance scientifique se répète et s'approfondit toujours plus dans les scissions historiques des disciplines scientifiques. On voit qu'en articulant ces deux types de rupture, cette thèse a pour effet immédiat de conférer un statut normatif à la discontinuité historique.

Alors qu'il semble bien que le concept de révolution scientifique, en caractérisant un événement, se contente d'isoler la discontinuité historique, le concept bachelardien de rupture fonde donc la discontinuité historique sur la discontinuité « épistémologique ». C'est là son intérêt et peut-être aussi sa faiblesse. Bien que Bachelard explique que les acquis de la science peuvent se transformer en obstacles, la théorie des obstacles épistémologiques, qui relève d'une psychanalyse de l'esprit scientifique, ne leur reconnaît pas le statut de construction historique. On a pu remarquer qu'une telle présentation revient à naturaliser l'erreur, et dans la mesure où Bachelard tient que la vérité n'est qu'erreur rectifiée, on peut penser qu'elle ne parvient pas non plus à rendre compte de l'historicité de la vérité. Notons que lorsqu'Althusser transpose la « rupture bachelardienne » dans le champ de l'économie politique, qu'il lui donne le nom de « coupure », et qu'il fait jouer à l'idéologie la fonction de l'obstacle, il trouve un moyen de pallier ce défaut. En revenant à la rupture proprement dite, on ajoutera que la difficulté de principe dont il vient d'être question débouche sur une difficulté de fait. En interprétant les discontinuités dans la succession des théories au sein d'une discipline constituée comme des répétitions d'une rupture inaugurale avec la connaissance commune, Bachelard semble difficilement pouvoir rendre compte des séquences historiques où la rupture inaugurale se fait contre une théorie sophistiquée, irréductible au savoir commun et à la connaissance préscientifique. Le problème est déjà sensible en ce qui concerne le rapport de la physique galiléenne avec la physique médiévale, il l'est plus encore en ce qui concerne le rapport de la révolution lavoisienne, fondatrice de la chimie moderne, avec la chimie dite « phlogistique » que les chimistes de l'époque considéraient comme une science à part entière.

D'où l'intérêt récemment porté au rapport de la rupture et de la refonte. La notion de refonte, également de provenance bachelardienne, permet en effet de développer une théorie de la rupture qui se situe exclusivement sur le terrain de la discontinuité historique. Bachelard parlait de refonte à propos de la réorganisation du savoir qui doit suivre la rupture d'une théorie avec une autre. Posant que le savoir progresse dans le sens d'une corrélation toujours plus complète des concepts, il concluait que la rupture ne peut jamais rester isolée, et qu'elle doit se transmettre à l'intégralité du savoir d'une nouvelle théorie scientifique. Ce processus de refonte peut être thématiquement pour lui-même. On peut en effet considérer comme des ruptures

les événements au cours desquels une théorie scientifique s'impose dans son irréductibilité à un ancien savoir, sans qu'il soit nécessaire d'interpréter cette rupture comme une rupture avec la connaissance non scientifique. C'est vrai de la discontinuité dans la succession des théories au sein d'une discipline constituée ; c'est vrai aussi des discontinuités inaugurales que constituent la physique galiléenne et la chimie lavoisienne. La dynamique de la rupture ne sera plus celle d'une réduction progressive d'obstacles épistémologiques tenant à la nature de l'esprit humain. Elle résultera plutôt du fait que la discontinuité de l'ancienne et de la nouvelle théorie se projette dans la nouvelle sous la forme de tensions et de contradictions, les éléments conceptuels irréductibles aux anciennes conceptions commençant par y côtoyer des éléments conceptuels hérités de l'ancienne théorie. Plusieurs études ont montré que de telles tensions et de telles contradictions sont effectivement liées aux ruptures historiques. L'approche en terme de refonte paraît à même de lire l'évolution de la physique classique de Galilée jusqu'à Newton, ainsi que les différents conflits théoriques qui firent suite à la révolution lavoisienne.

Cette approche en terme de refonte conserve-t-elle les caractéristiques spécifiques du concept de rupture, celles qui permettraient notamment d'opposer rupture et révolution scientifique ? La question comporte différents aspects. La notion de révolution invite à penser la discontinuité historique comme un événement soudain, alors que les concepts de rupture et de refonte supposent une perspective processuelle. En outre, concevoir la discontinuité historique suivant le modèle de la révolution scientifique, changement radical des présupposés métaphysiques comme chez Koyré ou changement du cadre conceptuel comme chez Kuhn, c'est risquer de conclure que les théories scientifiques sont des langages incommensurables, et nier par là même, comme chez Kuhn, l'idée de progrès scientifique. De ce point de vue, la refonte doit être rapprochée de la rupture dans la mesure où la thématique de la refonte conserve l'aspect normatif attaché par Bachelard au concept de rupture. Lorsque la succession des théories est interprétée à la lumière du concept de refonte il s'agit d'exposer le procès au cours duquel une discontinuité inaugurale, ou une fondation, accède à sa propre vérité ; l'histoire des sciences apparaît ainsi comme un devenir orienté vers le vrai, du moins en ce qui concerne les séquences pouvant être lues comme l'accomplissement de telles discontinuités fondatrices. On en vient ainsi à un troisième point de divergence entre l'approche en termes de rupture et de refonte, et l'approche en termes de révolution scientifique. Si l'on veut faire de la révolution scientifique la forme générale de la discontinuité historique, on sera conduit comme Kuhn à mettre sur le même plan les différents changements de théorie : le passage de la physique aristotélicienne à la physique galiléo-newtonienne sera comparable au passage de la physique newtonienne à

la physique relativiste. Les concepts de refonte et de rupture ont au contraire pour objet de distinguer différentes formes de discontinuité, celles fondatrices et inaugurales où l'on se libère, quoique de façon imparfaite et incomplète, d'un savoir foncièrement insuffisant et problématique (par exemple Galilée en physique et Lavoisier en chimie), et celles qui réorganisent le champ du savoir en conservant les acquis antérieurs, qui rompent avec le passé tout en accomplissant une rupture antérieure (Einstein par rapport à Galilée ; Dalton, Berthollet ou Berzélius par rapport à Lavoisier).

► BALIBAR E., « Le concept de "coupure épistémologique" de Gaston Bachelard à Louis Althusser », *Écrits pour Althusser*, Paris, La Découverte, 1991, p. 9-57 ; « Coupure et refonte. L'effet de vérité des sciences dans l'idéologie », *Lieux et noms de la vérité*, La Tour d'Aigues, L'Aube, 1994, p. 99-162. — BALIBAR F., *Galilée, Newton lus par Einstein. Espace et relativité*, Paris, PUF, 1984. — CANGUILHEM G., « L'histoire des sciences dans l'œuvre épistémologique de Gaston Bachelard », *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1968, p. 174-186. — D'HONDT J., *L'idéologie de la rupture*, Paris, PUF, 1978. — KOYRÉ A., *From The Close World to the Infinite Universe*, Baltimore, John Hopkins Press, 1957 (trad. fr. R. Tarr. *Du monde clos à l'univers infini*, Paris, Gallimard, 1973). — KUHN T.S., *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962, 1970 (trad. fr. L. Meyer, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983). — LECOURT D., *Bachelard. Le jour et la nuit*, Paris, Grasset, 1974. — MELHADO E.M., « Novelty and Tradition in the Chemistry of Berzélius », in MELHADO E.M. & FRANGSMYR T., *Enlightenment in the Romantic Era. The Chemistry of Berzélius and its Cultural Setting*, New York, Cambridge Univ. Press, 1992, p. 133-169. — METZGER M., *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique*, Paris, Alcan, 1930. — SIEGFRIED R. & DOBBS B.J., « Composition, a Neglected Aspect of the Chemical Revolution », *Annals of Science*, 24, 4, 1968, p. 275-293.

Emmanuel RENAULT

→ Bachelard ; Continuité ; Foucault ; Paradigme ; Progrès ; Révolution scientifique.

RUSSELL Bertrand, 1872-1970

Mathématicien et philosophe anglais dont les travaux avec A.N. Whitehead (*Principia mathematica*, 1913), au début du XX^e s., ont permis de fixer le langage formulaire de la logique classique. On lui doit, à la suite de la découverte du paradoxe des ensembles (1902), la distinction entre les notions de classe et de multiplicité : il y a des totalités si grandes qu'il est impossible de les considérer comme des classes ; ce sont des multiplicités. B. Russell est un philosophe réaliste, qui s'est opposé aux néo-hégéliens, comme Bradley, contre lesquels il affirme une réelle pluralité du monde, un atomisme logique et l'axiome des relations externes : le monde n'est pas une réalité une où tout est connexe ; c'est une pluralité de faits isolés et de relations indépendantes les unes des autres. Il a aussi pris ses

distances à l'égard du pragmatisme (W. James) auquel il reproche d'avoir confondu la vérité avec des intérêts humains et auquel il oppose une « humilité cosmique » face à la vérité. Sa philosophie appliquée avec systématiquement le rasoir d'Ockham (« ne pas multiplier les entités sans nécessité ») et substitue aux questions métaphysiques une « grammaire philosophique » où l'analyse logique poussée à ses extrêmes limites indique combien le langage naturel exerce une emprise sur nos esprits et nous pousse à confondre la propriété des symboles avec celle des choses. Un symbolisme conséquent de l'écriture logique nous permet selon lui de dissiper quelques-unes des méprises dues au langage ordinaire.

Ses engagements politiques furent nombreux : il fut emprisonné durant la Première Guerre mondiale pour son combat pacifiste ; il lutta pour la participation des femmes au scrutin. Le développement de la puissance nucléaire à la fin de la Seconde Guerre mondiale l'a déterminé à s'engager dans des campagnes pour le désarmement.

● *The Principles of mathematics*, Londres, Allen & Unwin, 1903. – *Philosophical Essays* (1910), trad. fr., Paris, PUF, 1996. – *Problèmes de philosophie* (1912), trad. fr., Paris, Payot, 1980. – *Principia Mathematica* (avec A.N. Whitehead), Cambridge, Cambridge Univ. Press, 3 vol., 1910, 1912, 1913. – *Our knowledge of the external world as a field for scientific method in philosophy*, Chicago/Londres, Open Court, Allen & Unwin, 1914 (trad. fr., *La méthode scientifique en philosophie*, rééd., Paris, Payot, 1971). – *Philosophie de l'atomisme logique* (1918), trad. fr., in *Écrits de logique philosophique*, Paris, PUF, 1992. – *Signification et vérité*, trad. fr., Paris, Flammarion, 1969. – *Logic and Knowledge, Essays* (1901-1950), éd. R.Ch. Marsh, Londres, Allen & Unwin, 1956, 1959. – *My philosophical development*, Londres, Allen & Unwin, 1959 (trad. fr., *Histoire de mes idées philosophiques*, rééd., Paris, Gallimard « Tel », 1961).

► BENMAKHOLOU A., *Bertrand Russell l'atomisme logique*, Paris, PUF, 1996. – RIVENC F., *Recherches sur l'universalisme logique, Russell et Carnap*, Paris, Payot, 1993. – SCHILPP P.A., *The philosophy of Bertrand Russell* (1944), rééd., La Salle (Ill.), Southern Illinois Univ., 1971 (avec plusieurs articles dont ceux de Gödel, Einstein, Moore, Nagel, Russell). – SCHOENMAN R., *Bertrand Russell Philosopher of the century*, Londres, G. Allen & Unwin LTD, 1967 (avec plusieurs articles dont ceux de Ayer, Kreisel, Putnam, Quine, Reinchenbach). – VERNANT D., *La philosophie mathématique de Bertrand Russell*, Paris, Vrin « Mathesis », 1992.

Ali BENMAKHOLOU

→ Abstraction ; Atomisme logique ; Axiomatisme et formalisation ; Cercle de Vienne ; Concept ; Donné ; Fait ; Forme ; Induction complète ; Langages formels ; Logicisme ; Phénomène ; Proposition ; Vérification ; Vérité ; Wittgenstein et le positivisme logique.

RUTHERFORD Ernest, 1871-1937

Physicien britannique. Ernest Rutherford est né en Nouvelle-Zélande et est mort à Cambridge (Angleterre). Après avoir été formé en Nouvelle-Zélande, Rutherford travaille dans l'équipe de J.J. Thomson à Cambridge à partir de 1895. À la suite des travaux de Becquerel et des Curie, Rutherford identifie en 1897 dans les minerais d'uranium deux types de radiation caractérisés par des longueurs de pénétration différentes. Il les nomme alpha et bêta ; à ces deux types de radiation, il en ajoute une troisième en 1900, la radiation gamma. En 1903, en collaboration avec Frederick Soddy, il identifie le processus de désintégration et établit la spécificité pour chaque élément radioactif du taux de désintégration, ou demi-vie. Selon eux, la radioactivité serait un phénomène atomique, causé par la rupture d'atomes de l'élément radioactif, cette rupture produisant un élément nouveau. Pour son travail sur la radiation alpha, Rutherford reçoit le prix Nobel de chimie en 1908. En 1909, à Manchester, après avoir établi que les particules alpha sont porteuses d'une charge positive, Rutherford et Hans Geiger conçoivent et réalisent un dispositif expérimental célèbre, dans lequel une feuille d'or est bombardée par des particules alpha. La majorité des particules traversent la feuille sans être déviées, cependant une petite fraction est déviée avec des angles qui peuvent atteindre 90 degrés ou plus. À partir de ce phénomène, Rutherford propose un nouveau modèle « nucléaire » de l'atome. Il affirme que les atomes d'or consistent essentiellement en de l'espace vide, ce qui permet à la majorité des particules de traverser la feuille sans être déviées ; les particules déviées sont repoussées par une petite masse centrale, de charge positive – le noyau. Ce modèle a fourni le fondement de la théorie quantique de l'atome proposée plus tard par le collègue de Rutherford, Niels Bohr.

● *The collected papers of Lord Rutherford of Nelson*, éd. Sir J. Chadwick, Londres, 3 vol., 1962-1965.

► BADASH L., *Radioactivity in America : Growth and Decay of a Science*, Baltimore, Johns Hopkins Univ. Press, 1979. – BOHR N., *Essays 1958-1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*, New York, Vintage, 1966 (comprend des anecdotes de Rutherford). – DA COSTA A.E.N., *Rutherford and the Nature of the Atom*, Garden City (NY), Doubleday, 1964.

John TRESCH et Simon WERRETT

→ Radioactivité.

S

SCHLEIDEN Mathias Jakob, 1804-1881

Botaniste allemand. Mathias Jakob Schleiden, né à Hambourg, mort à Francfort-sur-le-Main, est l'initiateur en botanique de la théorie cellulaire. Ses recherches sur la genèse des cellules fournissent la matière de ses *Éléments de botanique scientifique* (1842-1843). Schleiden, fermement épigénétiste, suggère que la première étape dans la genèse des cellules est la formation d'un noyau, par la cristallisation d'un matériel granulaire figurant dans le contenu cellulaire. Ce noyau grandit et une nouvelle cellule se forme autour de lui, la membrane nucléaire devenant la paroi cellulaire. De nouveaux noyaux peuvent se former à l'intérieur des cellules existantes, ou par cristallisation de liquides organiques. Cette théorie dite de « la formation indépendante des cellules » fut réfutée dans la décennie suivante. Ernst Mayr souligne que Schleiden fit néanmoins progresser la cytologie de manière décisive en se concentrant sur un problème et en formulant une théorie susceptible d'être mise à l'épreuve. Son insistance à faire valoir que les plantes sont entièrement formées de cellules devait être pleinement confirmée. Schleiden, qui appartient à la génération des biologistes allemands qui réagirent violemment à la Naturphilosophie, tenta d'expliquer toute chose par des processus physico-chimiques. Son adhésion au darwinisme, indique Patrick Tort, est signalée dans la lettre à Walsh du 4 décembre 1864.

► MAYR E., *The Growth of Biological Thought : Diversity, Evolution and Inheritance*, Harvard Univ. Press, 1982. – TORT P., « Schleiden », in TORT P. dir., *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 1996.

Jean Paul THOMAS

→ Cellule ; Naturphilosophie.

SCHRÖDINGER Erwin, 1887-1961

Physicien autrichien. Erwin Schrödinger est né et mort à Vienne. En 1926, à Zurich, Schrödinger découvre dans une note en bas de page d'un mémoire d'Einstein l'idée énoncée par de Broglie : les électrons peuvent être compris à la fois comme des ondes et comme des particules. Inspiré par cet aperçu, Schrödinger remanie

le modèle atomique de Bohr-Sommerfeld. Il affirme que l'on peut considérer les électrons comme des ondes stationnaires plutôt que comme des particules en orbite autour du noyau et propose une équation d'onde dont la solution décrit les propriétés de l'électron. Grâce à son équation, Schrödinger fournit une base mathématique solide à la mécanique quantique. L'image de l'atome issue de la théorie de Schrödinger se conçoit plus facilement que celle issue du calcul matriciel développé par Heisenberg et Dirac. On montrera ultérieurement que ces deux formulations de la mécanique quantique sont équivalentes. Dirac et Schrödinger partagent le prix Nobel de physique en 1933. Les derniers écrits de Schrödinger sont consacrés à la philosophie et à la vulgarisation scientifique. Il suggère que les phénomènes de croissance s'expliqueraient à partir de la théorie quantique. Cette idée très populaire ramassée dans l'expression, « order out of order » (« l'ordre à partir de l'ordre »), a contribué au développement de la biologie moléculaire, ainsi qu'a pu en témoigner Francis Crick.

● *Abhandlungen zur Wellenmechanik*, Leipzig, 1927. – *Die Wellenmechanik*, vol. 3 of *Dokumente der Naturwissenschaft*, Stuttgart, 1963. – *What is Life ?*, Cambridge, 1992.

► DIRAC P.A.M., « Professor Erwin Schrödinger. For. Mem. R.S. » (Obituary), *Nature*, 189, 1961, 355-356. – STENT G.S., « That was the molecular biology that was », *Science*, 160, 1968, 390-395.

John TRESCH et Simon WERRETT

→ Complémentarité ; Irréversibilité ; Mesure en mécanique quantique ; Temps ; Thématia.

SCHWAN Theodor, 1810-1882

Naturaliste allemand. Les expériences conçues par Schwann en vue de déterminer avec exactitude les propriétés physiologiques des organes et des tissus constituèrent l'acte de naissance d'une nouvelle physiologie orientée vers l'analyse des mécanismes cellulaires du fonctionnement de l'organisme, supposant l'abandon résolu de l'explication de celui-ci par l'action d'une force vitale. Ainsi, dans ses *Mikroskopische Untersuchungen* publiées en 1839, Schwann soutient-il la thèse de l'origine cellulaire de la vie. Thèse dont les

implications scientifiques seront discutées par Brücke, Émile du Bois-Raymond, Hermann von Helmholtz et Carl Ludwig, fondateurs de l'école du mécanisme matérialiste s'opposant au vitalisme professé par Müller (dont Schwann fut l'étudiant). Dans la troisième partie de *Mikroskopische Untersuchungen*, Schwann affirme que la théorie cellulaire permet d'aboutir à la conclusion que les corps organisés se développent en obéissant aux lois aveugles de la nécessité. Il admet ainsi que les phénomènes vitaux peuvent être expliqués de la même manière que ceux de la matière inerte : « Le phénomène fondamental de la vie doit trouver sa raison d'être dans les propriétés des atomes. » La combinaison des atomes du monde inorganique en molécules, puis en cellules, suffit en effet aux yeux de Schwann pour expliquer l'apparition de la vie. Aussi, en dépit de son intérêt constant pour la pensée théologique, de sa croyance en l'existence d'« un être infiniment intelligent » et de l'attrait exercé sur son esprit par les philosophies cartésienne et leibnizienne, le même auteur s'efforcera-t-il constamment de démontrer que les phénomènes vitaux ne sauraient être produits par une force agissant en vertu d'une idée mais par des forces agissant aveuglément et avec nécessité, comme en physique. Tendance que ses derniers écrits permettent certes de nuancer quelque peu.

● En collaboration avec Müller : « Über das Wesen des Verdauungsprozesses », *Archiv für Anatomie und Physiologie*, 1836, 66-90. — « Notes préliminaires à la théorie cellulaire », *Neue Notizen aus dem Gebiete der Natur und Heilkunde*, n° 91, 1838, 21-23. — « Instructions pour l'observation des phénomènes périodiques chez l'homme », *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 9, 1842, 120-137. — « Recherches microscopiques sur la conformité de structure et d'accroissement des animaux et des plantes », *Annales des sciences naturelles. Zoologie*, 2^e sér., 17, 1842, 5-19. — « Réponse à l'interprétation de M. d'Omalius relative à la force vitale », *Bulletin de l'Académie royale des sciences de Belgique*, 24, 1870, 683.

► FLORKIN M., *Théodore Schwann et les débuts de la médecine scientifique*, Paris, 1956 (Conférences du Palais de la Découverte, série D., n° 43) ; « Schwann », *Dictionary of Scientific Biography*, New York, 1976, t. XII, p. 240-245 ; *Naissance et déviation de la théorie cellulaire dans l'œuvre de Théodore Schwann*, Paris, 1960. — WATERMANN R., *Theodor Schwann. Leben und Werk*, Düsseldorf, 1960.

Éric HAMRAOUI

→ Cellule ; Neurone ; Origines de la vie ; Plasma germinatif.

SCIENTES COGNITIVES

Les sciences cognitives se donnent pour objet d'étude la connaissance. Elles cherchent à décrire, expliquer, simuler les fonctions cognitives — langage, mémoire, apprentissage, raisonnement, compréhension, perception... Définies comme les nouvelles sciences de l'esprit, elles se trouvent investies d'une composante forte et floue à la fois susceptible de multiples appropriations et, en un sens, en perpétuelle redéfinition.

Deux orientations semblent marquer l'utilisation récente du terme « cognitif » : d'une part, le regroupement de plusieurs disciplines telles que la psychologie, l'intelligence artificielle, la linguistique, les neurosciences, la philosophie, l'anthropologie ; d'autre part, une assimilation des fonctions cognitives à des expressions mathématiques. Dans l'univers des sciences cognitives, l'information et la logique importent davantage que l'énergie ou la matière. La cybernétique, la naissance de l'informatique et de l'intelligence artificielle jouent un rôle crucial dans la mise en place de cette nouvelle conception du monde.

Dès 1936, le logicien Alan Turing jetait les bases mathématiques et conceptuelles de ce qui allait devenir l'ordinateur programmable et concevait le projet de fabriquer une machine intelligente. Mais c'est la cybernétique qui, pendant les années 1940, va considérer que logique et modélisation sont primordiales pour créer une nouvelle science de l'esprit. La cybernétique, qui émerge dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale, est le fruit de rencontres entre chercheurs de disciplines différentes, en particulier de mathématiciens tels Norbert Wiener et John von Neumann, de neurophysiologistes comme Arturo Rosenbluth et Warren McCulloch, et d'ingénieurs tel Julian Bigelow. La vision des ingénieurs s'impose rapidement : des troubles du système nerveux central sont comparés aux dérèglements des régulations mécaniques ; les analogies et métaphores homme/machine se multiplient. Tout est traduit en termes de communication et de contrôle. Les cybernéticiens cherchent à produire une théorie qui soit valable à la fois pour le vivant et l'animé, l'animal et la machine. Ils pensent avoir trouvé dans le principe de rétroaction (ou *feed-back*) le mécanisme commun aux différents niveaux d'organisation. Ce principe veut que l'information transmise aux mécanismes de contrôle d'un système fasse la différence entre une situation désirée et la situation existante ; le mécanisme agit pour réduire la différence entre les deux situations.

Avec la cybernétique c'est une vision mécaniste de la pensée qui est proposée : le cerveau est comparé à un ordinateur et l'être vivant à une machine autorégulée. Si les cybernéticiens cherchent à étudier les processus mentaux à travers la simulation d'une logique présumée des réseaux de neurones, l'intelligence artificielle, qui fait son apparition en 1956 aux États-Unis, vise à étudier l'esprit indépendamment de son support matériel, le cerveau. Ce domaine est caractérisé par l'élaboration de modèles computationnels, de programmes d'ordinateur, en vue de produire des machines dites intelligentes. Le présumé que toute connaissance peut être appréhendée en termes purement logiques est accepté et l'hypothèse cognitiviste, qui conçoit la cognition comme un calcul sur des représentations internes ou mentales, prend forme. Elle suggère une équivalence informationnelle entre la machine et l'homme. Jerry Fodor, l'un des représentants du courant cognitiviste, estime qu'un état mental est caractérisé par une réalité qu'entretient l'esprit avec

une certaine proposition exprimée dans un langage formel, le « mentalais ». Sa théorie de la modularité postule que l'esprit humain est constitué par des dispositifs cognitifs hautement spécialisés, répondant chacun à des principes propres et destinés à traiter de façon automatique un type très limité d'informations en provenance de l'extérieur. Elève de Hilary Putnam, Jerry Fodor s'est employé à construire une théorie psychologique. Exhumant la psychologie des facultés de Franz Josef Gall et s'inspirant des travaux du linguiste Noam Chomsky, il adhère à l'innéisme et assimile les facultés cognitives à des modules de traitement de l'information.

De la philosophie cognitiviste est né le fonctionnalisme, fondé sur l'indépendance matérielle et l'équivalence formelle, c'est-à-dire que peu importe le support matériel pourvu que la fonction soit reproduite. Le cerveau est comparé à l'ordinateur, l'esprit à un programme fonctionnant comme un système de manipulation de symboles et la conscience à un système d'exploitation de l'esprit. Le projet de l'intelligence artificielle, simuler des processus cognitifs sur ordinateur, devient celui des sciences cognitives. Le premier centre en sciences cognitives, créé à l'université Harvard en 1960 par deux psychologues, Jerome Bruner et George Miller, se proposait de libérer la psychologie du carcan behavioriste qui dominait alors la psychologie expérimentale américaine. Les behavioristes cherchaient à étudier le comportement observable à l'aide d'expériences mesurables et répétables. Ils étudiaient les réponses à des stimuli sans s'occuper des états mentaux internes et considéraient le psychisme comme une boîte noire. S'intéressant aux mécanismes mentaux impliqués dans l'usage du langage, George Miller cherche à concevoir un modèle informatisé du lexique. Cognitiviste convaincu, il assimile la connaissance à une manipulation de symboles et perçoit l'ordinateur comme un modèle de l'esprit humain. Base théorique de l'intelligence artificielle, le cognitivisme s'est trouvé en butte aux critiques, en particulier de John Searle qui insiste sur le caractère incomplet d'une théorie qui ne peut rendre compte de la subjectivité, la conscience, l'intentionnalité, le sens. Courant dominant jusqu'à la fin des années 1980, le cognitivisme s'est trouvé peu à peu détrôné par l'approche connexionniste qui définit la cognition comme l'émergence d'états globaux dans un réseau de composants simples. Alors que dans un modèle cognitiviste le calcul est conduit séquentiellement sous la direction d'un centre de contrôle, dans un réseau connexionniste les calculs sont menés en parallèle. Des règles locales déterminent les opérations individuelles et des règles de changement gèrent les liens entre les éléments. Trouver une solution optimale à un problème donné est l'objectif de cette méthode mathématique, appelée réseaux de neurones, dont les applications vont de la reconnaissance de menace à l'analyse d'images satellites ou de bases de données génétiques. Ce sont les cybernéticiens McCulloch et Pitts qui, en 1943, ont engagé cette démarche qui consiste à résoudre un

problème en proposant une méthode d'approximation du comportement des réseaux de neurones décrits dans le cerveau. Leurs neurones formels sont définis comme des dispositifs binaires qui reçoivent des stimulations par des entrées, et les pondèrent grâce à des valeurs appelées coefficients synaptiques qui peuvent être positifs (synapses excitatrices) ou négatifs (synapses inhibitrices). Comment calculer les coefficients synaptiques ? Cette question au cœur des réflexions sur l'apprentissage a été traitée en 1949 par Donald Hebb, neurophysiologiste, qui a énoncé une règle de modification empirique des connexions : si deux neurones essaient de s'activer au même moment, leur lien est renforcé. Cette règle d'apprentissage suggère d'accroître la valeur des coefficients synaptiques entre neurones formels qui ont une activité synchronisée. La recherche sur les réseaux de neurones prit un tournant lorsqu'en 1958 Frank Rosenblatt réalisa, pour le compte de la Marine américaine, le perceptron, modèle de perception visuelle. Mais ces travaux ont été brutalement stoppés lorsque Marvin Minsky et Seymour Papert, deux pionniers de l'intelligence artificielle, publièrent en 1969 une critique en règle de cette approche qui entraînait en compétition avec le cognitivisme. Ce n'est que dix ans plus tard que la méthode des réseaux neuronaux va réussir à s'imposer.

L'informatique est omniprésente : les progrès du matériel, la mise au point de langages nouveaux et de logiciels de traitement des données ont largement contribué à la construction des sciences cognitives dont Howard Gardner définit le noyau central comme étant constitué par la psychologie et l'informatique. La plupart des psychologues accordant au langage une importance déterminante, un rapprochement s'est opéré entre psychologie et linguistique via la philosophie analytique ou philosophie de l'esprit qui se développe depuis 1975. Héritière du positivisme logique et de la pensée de mathématiciens tels A. Whitehead, B. Russel ou L.J. Wittgenstein, cette philosophie se propose de formaliser les règles du langage et de la pensée. Si l'intelligence artificielle y occupe une place importante, il n'en est pas de même pour les éliminativistes, telle Patricia Churchland pour qui seules une science cognitive et une philosophie de l'esprit directement enracinées dans la neurophysiologie ont une chance de perdurer. Ne tenant aucun compte des états mentaux (croyance, désir, espoir, crainte...), les éliminativistes plaident contre le fonctionnalisme et critiquent la psychologie, ils proposent une théorie neuronale de la pensée. Mais si certains pensent que l'étude du fonctionnement du système nerveux conduit à la compréhension des mécanismes de la pensée, d'autres mettent en évidence les influences culturelles et sociales et se contentent d'indiquer les contraintes matérielles que doivent respecter les théories sur les fonctions cognitives pour satisfaire au souci de vraisemblance biologique.

Mettant en relation les résultats expérimentaux obtenus par les neurophysiologistes et les modèles utilisés en intelligence artificielle, Francisco Varela

proposé une alternative à la vision représentationnelle, qu'il nomme enaction. Partant du principe que notre sens commun est constamment requis pour configurer notre monde d'objets et que ce dernier résulte de notre histoire, il remet en question l'idée d'un monde aux propriétés prédéfinies. Avec l'enaction, il propose une « voie moyenne » dans laquelle observateur et phénomène observé se définissent l'un l'autre. Il s'inspire en cela de la seconde cybernétique centrée sur le principe d'auto-organisation et dont le chef de file Heinz von Foerster se demandait comment éviter que l'observateur vienne perturber l'objet sous observation. Définissant un « principe d'ordre à partir du bruit », il exposait l'idée de la construction par l'homme de sa réalité. C'est ainsi qu'a émergé, dans les années 1970, un courant fondé sur les théories de l'auto-organisation, de l'autopoïèse et de l'autonomie : Umberto Maturana, Francisco Varela et Henri Atlan ont développé ces théories en menant des travaux en biologie ou bio-informatique.

L'approche par enaction de Varela est fondée sur la notion que les structures cognitives émergent de schèmes sensori-moteurs récurrents qui permettent à l'action d'être guidée par la perception. Cette approche, déjà envisagée par Merleau-Ponty, étudie la manière dont le sujet parvient à guider ses actions dans une situation locale donnée. Constatant que ses réflexions ne conduisent pas directement à des réalisations pratiques, Francisco Varela se plaint du peu d'appuis institutionnels et critique la vision utilitariste, il s'élève contre le poids de la technologie qui limite le champ des recherches et concentre les énergies sur ce qui est créateur de marchés immédiats. Les priorités scientifiques sont parfois guidées par des choix économiques. Les sciences cognitives se structurent autour d'un noyau dur orienté vers les technologies de l'information, elles répondent aux besoins exprimés par les politiques, le développement technologique étant perçu comme un enjeu stratégique majeur.

La référence à l'interdisciplinarité fait appel à une approche méthodologique et théorique intégrative, englobant dans un même ensemble l'humain et l'artificiel. Le sujet est perçu comme un ensemble de fonctions et les fonctions comme des processus de traitement de l'information. Un objet d'étude est choisi : la connaissance, la pensée, ou l'esprit : une définition en est donnée de telle façon que la meilleure approche pour aborder le problème sera celle de la modélisation mathématique et de la simulation sur ordinateur. Ce processus contribue à rehausser le prestige social de l'informatique. Isolée, l'informatique était considérée comme une technique utilisable dans différents domaines ; intégrée au sein des sciences cognitives, elle devient, avec l'intelligence artificielle, une force majeure qui paraît imposer aux autres partenaires les logiques propres à ses chercheurs. Héritière de la théorie des jeux, l'approche qui consiste à redéfinir un objet d'étude pour qu'il puisse être traité par le biais de la simulation sur ordinateur est privilégié en sciences cognitives mais les éléments de consensus

intellectuel subissent une redéfinition permanente. De nombreux débats idéologiques sont réactivés : innéisme, définitions de l'intelligence, problème du sens, de la conscience, de l'intentionnalité, des relations corps/esprit. Informaticiens, logiciens, mathématiciens utilisent leur propre grille de lecture pour répondre aux problèmes posés par des philosophes, des biologistes, des psychologues ou des linguistes. Une incompatibilité sépare deux modèles : celui des biologistes et celui des informaticiens-logiciens. Pour les neurobiologistes, les études relatives aux fonctions cognitives ne peuvent faire l'économie de l'analyse des mécanismes biologiques sous-jacents, tandis que pour les fonctionnalistes, peu importe le support pourvu que la fonction soit simulée. Dans un cas, l'étude du substrat biologique est primordiale, dans l'autre, elle est accessoire voire non pertinente. Si les rencontres entre chercheurs de disciplines différentes stimulent la réflexion, la tentation est grande d'hégémonie et de réductionnisme qui consisterait à vouloir rapporter tous les mécanismes de la pensée à un seul niveau d'explication : logique ou neurologique. Le premier courant paraît, aujourd'hui, majoritaire et si la biologie moléculaire a imposé une nouvelle façon de concevoir la vie, les sciences cognitives semblent poursuivre le même objectif de raisonner en termes d'échanges d'informations, mais elles rajoutent toutefois une composante : assimiler le vivant à l'artificiel et inversement.

► CHURCHLAND P., *Neurophilosophy*, Cambridge (Mass.) MIT Press, 1986. — DUPUY J.-P., *Aux origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1994. — FODOR J., *The Language of Thought*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1983. — GANASCIA J.-G., *Les sciences cognitives*, Paris, Flammarion, 1996. — GARDNER H., *The Mind's New Science : A History of the Cognitive Revolution*, New York, Basic Books Inc. Publ., 1985. — PLYSHYN Z., *Computation and Cognition : Toward a foundation for Cognitive Science*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1984. — VARELA F., *Connaitre les sciences cognitives : tendances et perspectives*, Paris, Le Seuil, 1989.

Brigitte CHAMAK

→ Cognition et sciences cognitives ; Cognitivisme ; Computation ; Informatique ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Neurophilosophie ; Système ; Turing.

SCIENTISME

Le mot « scientisme » est à ce point polémique que sa paternité même fait objet de controverse. En 1898, dans sa pièce *Les Loups*, Romain Rolland transforme le substantif anglais *scientist* (savant) en un adjectif français qualifiant une trop grande étroitesse d'esprit. Suite à la politique anticléricale conduite par Combes, au moment où les mots « science » et « religion » servent de plus en plus clairement de signes de ralliement, l'adjectif est associé au substantif « homaïsisme » formé par référence au sinistre apothicaire de *Madame Bovary* qui se pique de science sans être savant. « Homaïsisme scientiste » : telle est l'expression

nettement péjorative que rencontre Le Dantec dans un article du *Mercur de France* d'août 1911 le présentant *a contrario* comme un vrai savant. La même année, il forge à partir d'elle le néologisme « scientisme », dans un article qui deviendra, en 1912, le chapitre trois de *Contre la métaphysique*. Rendant compte du livre de W. James *Le pragmatisme*, Le Dantec y revendique le scientisme comme une attitude philosophique radicalement opposée au pragmatisme et convenant mieux à son tempérament que le matérialisme.

Dans *Les Grandes amitiés*, Raïssa Maritain rappelle de son côté comment, en 1914, dans *Antimoderne*, Jacques Maritain « devait désigner par le mot de scientisme » les doctrines, alors dominantes à la Sorbonne, niant « la réalité de l'esprit et l'objectivité de tout savoir dépassant la connaissance des phénomènes sensibles ». Elle prête à tort l'invention du substantif à son mari mais indique bien un amalgame inaugural qui conduira une large postérité de critiques du scientisme à méconnaître ses enjeux réels et à traiter des sciences à travers ce repoussoir.

Une religion de la science

Achévé en 1848 mais publié en 1890, *L'Avenir de la science* enregistre la conclusion enthousiaste par laquelle Renan abandonne sa foi ancienne pour croire en la science qui seule peut désormais « rendre à l'humanité ce sans quoi elle ne peut vivre, un symbole et une loi ». L'ancien séminariste emprunte à saint Matthieu la formule « nul ne peut servir deux maîtres » pour présenter en ces termes le dilemme dont il vient de triompher : « supernaturalisme absolu ou rationalisme sans réserve ». Dénonçant comme vanité la recherche du vrai et du beau, l'ascétisme chrétien n'accorde à la science et à la poésie qu'une valeur très restreinte et se montre incapable d'assouvir tous les besoins suprasensibles de l'humanité. Seule une foi en la raison, voyant dans le savoir une initiation à Dieu et en Dieu la catégorie de l'idéal, permettra de réaliser la synthèse parfaite de tous les éléments de la nature humaine. Appelée à s'exercer ainsi dans le monde réel et non dans celui des seules chimères, la religion de la science ne doit toutefois pas s'entendre en un sens strictement sociologique car elle prétend, par contraste avec la religion positiviste de l'Humanité, assumer l'exigence de l'aspiration à l'infini que la religion ancienne ne peut satisfaire entièrement.

La science ne valant « qu'en tant qu'elle peut remplacer la religion », autrement dit pour autant qu'elle « recherche ce que la révélation prétend enseigner », Renan dénonce la sécheresse positiviste. Fasciné par la science telle qu'elle est « restant ce qu'elle est », la science cantonnée à la triste connaissance du fini, le positivisme prend le moyen pour le but et n'aperçoit pas que l'analyse qu'elle met en œuvre ne rompt avec le syncrétisme initial qu'en vue de produire une synthèse finale. Il manque ainsi ce par quoi l'âge de la science coïncidera nécessairement avec l'âge religieux dans la mesure où, accédant à un état plus parfait, la science

sera l'intelligence tout entière de la nature humaine et apportera à ce titre « une réponse définitive au problème dont les religions avaient improvisé la réponse ». Ce qui vaut particulièrement s'agissant de la politique dès lors que la raison est reconnue comme « seul souverain de droit divin ». « Organiser scientifiquement l'humanité » pour la conduire rationnellement vers la perfection, telle est la tâche qui incombera à un gouvernement dont l'idéal serait « un gouvernement scientifique, où des hommes compétents et spéciaux traiteraient les questions gouvernementales comme des questions scientifiques et en chercheraient rationnellement la solution ». Au collège des prêtres gouvernant au nom des dieux, la société de l'avenir substituera celui des savants assumant l'administration des choses afin de faire de l'homme un « roi du monde » menant presque exclusivement une vie céleste. Devant également veiller aux intérêts suprasensibles de l'humanité, cette « machine à progrès » qu'est l'État fera de l'école la « vraie concurrente du temple ». Aussi, « du moment où la religiosité de l'homme en sera venue à s'exercer sous la forme purement scientifique et rationnelle, tout ce que l'État accordait autrefois à l'exercice religieux reviendra de droit à la science, seule religion définitive ».

Imprimés par Renan deux ans avant sa mort, ces mots ayant valeur testamentaire sont des mots de jeunesse écrits en osmose avec l'ami de toujours, le grand chimiste Berthelot. Refusant également la distinction comtienne entre le pouvoir temporel et le pouvoir spirituel, il s'appuie sur les applications de la science telle qu'elle est afin d'établir qu'elle seule peut « rendre des services définitifs à l'humanité » et de revendiquer sa « direction matérielle, intellectuelle et morale de la société ». Mais c'est déjà en tant qu'homme d'État que l'influent ministre martèle sous forme de mot d'ordre que la science « domine tout ». Ce qui charge d'enjeux réels la célébration de la valeur de la science dont il se fait le thuriféraire et laisse clairement apparaître que la nouvelle religion ne désigne pas tant la croyance que les sciences peuvent tout expliquer qu'un enrôlement de la science au service d'une politique laïque en quête d'un fondement absolu. Aussi est-ce en tant qu'objet de culte qu'elle forme la cible de ceux qui, refusant le clivage politique qu'il instaure, dénoncent sa faillite. Sortant d'une audience sollicitée auprès du pape Léon XIII en vue d'examiner la possibilité d'une alliance sociale entre athées et catholiques, Brunetière publie en 1894 un article retentissant, « Après une visite au Vatican », dans lequel il accuse la science de n'avoir tenu aucune de ses promesses exorbitantes. Non seulement elle s'avère être incapable de résoudre objectivement les grandes énigmes auxquelles l'humanité est confrontée mais, loin d'apporter les bienfaits matériels escomptés, ses applications techniques engendrent une nouvelle misère de plus en plus aiguë et intolérable. Non seulement elle ne peut offrir des fondements solides à l'éthique et à la politique mais prétend l'ériger à cet effet en source exclusive de vérité revient à alimenter un fanatisme de la raison dont les effets délétères seront

ceux de tout autre fanatisme. Le directeur de la *Revue des Deux mondes* restreint ainsi la science à la seule découverte des relations entre les phénomènes afin de sauvegarder le territoire de l'ancienne religion et de rendre possible le ralliement des catholiques à la République encouragé par Léon XIII au motif d'une prééminence du destin du christianisme sur les intérêts temporels nationaux. La recherche de cette alliance, qui n'est pas sans rappeler celle projetée par Comte entre positivistes et jésuites, conduit Brunetière à mettre en évidence, pour en contester la légitimité, la dimension proprement politique de la religion de la science. Acuité d'analyse qui ressort après la défaite de la stratégie qu'elle entendait servir. En 1904, sa candidature au Collège de France est écartée au profit d'un érudit de second ordre alors que le président du conseil, Émile Combes, engage un combat acharné contre le christianisme qui conduira l'année suivante à la loi de séparation des Églises et de l'État.

Une science philosophique

Promu avant la lettre par un ancien séminariste comme rival du christianisme, répandu par des politiques de premier plan sous les préaux républicains, combattu par ceux qu'il interpelle comme obscurantistes, le scientisme trouve son nom de baptême chez un biologiste, comme antonyme du pragmatisme. Alors que l'édifice de la science classique commence à se lézarder, prenant à revers le pragmatisme de W. James, Félix Le Dantec déclare qu'il faut regarder les vérités géométriques transmises par Euclide comme des « lois véritablement despotiques » et pose que « la science est impersonnelle ou n'est pas la science ». À mesure qu'elle étend son autorité sur des domaines de plus en plus liés à des intérêts vitaux, l'investigation scientifique montre l' inanité des principes métaphysiques et moraux hérités du passé et apparaît à ce titre comme destructive. Antichambre de la science, le scientisme désigne précisément la croyance que la science saura guérir les blessures qu'elle inflige et gagner l'assentiment de tous contre les « résistances sentimentales individuelles » dont elle est provisoirement l'objet. Ayant pour unique raison d'être de lui permettre d'intervenir jusque dans le domaine de la religion afin de conduire l'humanité à « se passer d'erreurs aimées » et à « vivre un jour suivant la vérité », sa profession de foi se résume en une formule récurrente : « La science, créée par l'homme, peut étudier l'homme tout entier. » Être scientiste signifie croire que la science résoudra « toutes les questions qui ont un sens » et dissipera ainsi les « devoirs contradictoires qui empoisonnent la vie ». Seule la science peut produire une telle construction définitive là où toute autre assise n'offrirait qu'une construction transitoire ; et ce, parce qu'elle « n'est pas à proprement parler humaine ». Résultat d'une collaboration sociale dont les autres produits sont si imparfaits, la science apparaît comme le seul vrai « patrimoine de l'humanité » qu'il faut aimer car il constitue le plus grand lien qui unisse les hommes. La

norme du vrai se convertissant directement en impératif éthique, le titulaire de la nouvelle chaire de biologie de la Sorbonne peut conclure avec enthousiasme que « le mot philosophie ne devrait plus avoir, au XX^e siècle, d'autre définition que celle du mot science ».

Revendiquant ainsi son autonomie contre la juridiction abusive que lui a imposée la philosophie, le scientisme est un discours sur la science qui prétend abolir la philosophie en déployant le discours même de la science. Radicalement critique en apparence, cette suppression constitue en réalité un simple transfert, au profit d'une représentation abstraite de la science, d'une fonction de législation et de légitimation traditionnellement dévolue à la philosophie. En sorte que cette annulation affichée masque une annexion de fait. Philosophie scientifique visant à garantir l'autonomie de la science afin de la constituer en référent universel, le scientisme peut promouvoir l'idée que l'esprit et les méthodes scientifiques doivent être étendus à tous les domaines de la vie intellectuelle et morale sans exception. Mais il ne l'impose qu'au prix d'un évitement de la question de la scientificité et d'une restauration de l'illusion d'une autonomie du savoir le situant aux antipodes du matérialisme.

Commandée par la fonction pratique qui lui est assignée cette représentation abstraite de la science présente les traits de ce que Comte dénigrait sous le nom d'entité métaphysique. Aussi chercherait-on en vain la trace d'une religion de la science chez le Grand Prêtre de l'Humanité. S'il s'organise à partir de Comte, le scientisme se développe contre lui dans la mesure où il tire de tout autres conséquences d'une épistémologie positiviste définissant la science comme une description du monde. Formant le néologisme « scientisme » à travers son opposition au pragmatisme, Le Dantec adhère à la présentation qu'en donne Bergson dans sa préface au livre de W. James : « Tandis que pour les autres doctrines une vérité nouvelle est une découverte, pour le pragmatisme c'est une invention. » Voyant dans le pragmatisme la « négation de la valeur de la science », il pose que la seule attitude possible devant la vérité consiste en « une attitude purement passive » dans la mesure où, décrivant le monde, la science se confond avec lui. Épistémologie déjà à l'œuvre chez Brunetière en 1894 qui restera intacte six ans plus tard lorsqu'il déclarera publiquement sa foi catholique.

Les critiques du scientisme

Issue de la loi de séparation des Églises et de l'État de 1905, la querelle des inventaires marque l'acte de naissance politique de l'Action française. Ourdie par Maurras dès 1899, cette ligue entre catholiques et non-catholiques s'inspire ouvertement de Comte. Faisant du Grand Être de la religion positive le seul substitut possible de Dieu permettant de placer l'interdépendance des hommes au centre de l'existence humaine, elle présente comme naturelle la coalition de ces deux seuls remparts à l'anarchie et au libéralisme que sont le

positivisme et le catholicisme. Mais c'est seulement en 1906, alors que Pie X vient par son intransigeance de supprimer tout espoir d'amendement de la loi républicaine, qu'elle réalise le rêve de Brunetière en lui assignant la fin directement inverse d'inviter les catholiques français à s'initier à l'art de l'émeute.

Peu de temps avant la guerre, après avoir suivi les cours de Le Dantec à la Sorbonne et juste avant d'épouser la pensée thomiste, alors qu'il s'approprie à rejoindre l'Action française, Maritain trouve dans le principe de cette alliance le moyen d'affirmer une subordination entière de la philosophie à la religion. Développant au profit de la religion une conception symétrique de celle que défend Le Dantec en faveur de la science, il dénonce dans la philosophie de son ancien maître la vérité d'une raison moderne livrée à l'apostasie. Si « la raison chrétienne était dans la lumière de la foi », en revendiquant une indépendance absolue, la raison moderne rompt avec Dieu et avec l'être. « Ne pénétrant plus par l'idée jusqu'à l'essence universelle et la loi des choses », elle « impose à l'intelligence la loi même du matérialisme : cela seul est intelligible qui est vérifiable matériellement, et qui se réduit intégralement à une réalité inférieure ». En tant qu'il s'érige en juge suprême de la vérité, le scientisme constitue l'achèvement d'une philosophie moderne qui ne peut qu'expulser le surmatériel et tout ce qui porte le signe d'une autorité supérieure à la raison. En sorte que la philosophie doit redevenir la servante de la théologie.

Présentant comme révolus les temps où était encore possible un tel « lien entre science et religion, capable de mettre en harmonie la foi religieuse et la philosophie scientifique », Husserl en appelle à un héroïsme de la raison afin de restaurer l'idéal de la « science européenne » et de sauver une certaine idée de l'humanité face aux périls. Dans sa conférence de 1935, *La crise de l'humanité européenne et la philosophie*, il dénonce à cet effet sa réduction positiviste à la seule connaissance des faits. Ce qu'il critique ainsi sous le nom générique de « positivisme » consiste en réalité en sa dérive scientiste, ce fétichisme du fait qui rend aveugle à la subjectivité et à la signification inhérente à quelque fait que ce soit. Réduite à cette dimension positive, « la science n'a rien à nous dire » car « les questions qu'elle exclut par principe sont précisément les questions qui sont les plus brûlantes » pour « une humanité abandonnée aux bouleversements du destin ». La crise des sciences européennes constitue ainsi le symptôme d'une crise de la philosophie elle-même dont la seule issue consiste en un retour réflexif sur l'état des sciences. Renouant avec l'idée aristotélicienne de la philosophie première comme fondement unitaire et radical des sciences, il assigne pour tâche à la philosophie de retrouver sa visée métaphysique et d'assumer son rôle de refondation radicale des sciences.

Dans *Connaissance et intérêt*, Habermas rejoint Husserl pour critiquer l'illusion objectiviste des sciences à l'œuvre dans le scientisme qu'il qualifie à son tour de positivisme ; mais, lui reprochant d'entretenir l'illusion d'une théorie pure, il entend dégager les

intérêts en jeu dans la pratique scientifique. Refusant à la science la capacité de fixer des fins et de fonder sur ses certitudes un modèle social et politique, il s'appuie sur la distinction kantienne entre un horizon théorique et un horizon pratique afin de constituer l'éthique en domaine autonome par rapport au champ de la connaissance.

Néologisme difficilement traduisible en langue étrangère, le scientisme, bien qu'il ait essayé au-delà de l'hexagone, constitue un trait caractéristique de la pensée française du début de ce siècle dans la mesure où il naît sur les décombres de la philosophie de Comte qui apparaît comme son horizon indépassable. Sans doute est-ce la raison pour laquelle la première critique décisive du scientisme devait venir de la distance prise par Bachelard vis-à-vis de l'épistémologie qui le soutient. Distance rendue possible par une attention portée à l'activité scientifique elle-même lui permettant de mettre au jour sa dimension antidogmatique et d'inviter la philosophie à sortir de son ressassement.

► BACHELARD G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1934. — BRUNETIÈRE F., *La science et la religion*, Paris, Perrin, 1916 ; *Sur les chemins de la croyance*, Paris, 1905. — COMTE A., *Œuvres*, 12 vol., Paris, Anthropos, 1968. — HABERMAS J., *Connaissance et intérêt*, trad. fr., Paris, Gallimard, 1976. — HUSSERL E., *La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale*, trad. fr., Paris, Gallimard, 1976. — LECOURT D., *Contre la peur*, rééd., Paris, PUF « Quadrige », 1999. — LE DANTEC F., *Contre la métaphysique*, Paris, Alcan, 1912 ; *De l'Homme à la science*, Paris, Flammarion « Philosophie du XX^e s. », 1907. — MARITAIN J., *Antimoderne*, in *Œuvres complètes*, vol. II (1920-1923), Fribourg (Suisse), Éd. Universitaires, et Paris, Éd. Saint Paul, 1987. — MARITAIN R., *Les Grandes amitiés*, Paris, Desclée de Brouwer, 1988. — RENAN E., *L'Avenir de la science*, in *Œuvres complètes*, t. III, Paris, Calmann-Lévy, 1949.

François BOITUZAT

→ Académies ; Positivisme ; Vulgarisation.

SEL CHIMIE

Les découvertes sur la nature et la composition des sels ont joué un rôle essentiel dans le développement pratique et théorique de la chimie moderne. Les sels furent longtemps définis comme des substances dotées d'une saveur particulière et solubles dans l'eau. Le modèle du genre, le sel ordinaire, compte parmi les produits de base de l'alimentation humaine et animale depuis le commencement de l'histoire écrite. Dans l'Antiquité, la production du sel ordinaire par évaporation de l'eau de mer ou exploitation des gisements salins, de même que sa commercialisation, ont notablement influé sur l'économie et la politique des différentes civilisations de la planète. Le nitre, produit par l'action de l'acide nitrique sur le salpêtre, et le sel ammoniac, obtenu à partir de la distillation de matières animales, étaient également assez répandus dans le commerce pour être

assimilés à des sels. Cette identification tenait en partie aux opérations nécessaires à leur production, en partie à leur saveur spécifique. Le sel ammoniac fut en outre qualifié de « volatil », parce que, au cours de la distillation, il « montait », ou sublimait, au sommet de l'appareil de distillation. Les sels « fixes », en revanche, correspondaient à ce qui restait déposé au fond du vase de distillation avec les autres résidus, dont on les séparait en les dissolvant dans de l'eau. Quant aux sels obtenus à partir de diverses plantes, ils se caractérisaient par des saveurs et un certain nombre d'autres propriétés propres à chaque plante, raison pour laquelle on parlait à leur propos de sels « essentiels ».

À la Renaissance, Paracelse définit le « sel » comme l'un des trois principes de base de la matière. Si le « principe salé » de ce médecin philosophe et alchimiste n'entretenait qu'un rapport métaphorique avec les substances matérielles appelées sels, Paracelse lui-même et plusieurs des chimistes ayant exercé à la fin du XVI^e s. et au XVII^e s. se sont évertués à trouver le sel « universel » à l'origine des différentes variétés de sels qu'il était possible d'obtenir en pratique. Les distinctions conceptuelles qu'ils ont établies sont parfois évanescentes, car la limite était floue entre ressemblance et identité, et la croyance voulant que chacun des principes dont se composaient les substances matérielles fût modifiable à l'infini venait brouiller les différences.

Vers la fin du XVI^e s., le chimiste allemand Andreas Libavius entreprit de dissoudre divers métaux à l'aide d'acides différents afin d'obtenir une autre forme que le métal. Les substances ainsi produites furent par la suite considérées comme des sels d'un nouveau type. Bien qu'on les ait parfois décrites comme des combinaisons du métal et de l'acide associés dans l'opération, pendant la plus grande partie du XVII^e s. le concept d'une substance formée par l'union de substances constitutives coexista avec l'idée que les opérations à effectuer pour arriver à ce résultat modifiaient la forme des substances sur lesquelles elles agissaient.

Au milieu du XVII^e s., un des effets particuliers de l'action d'un sel acide sur un sel volatil ou fixe retient l'attention. Il s'agit d'une violente « effervescence » (ou « fermentation »), et quand les substances de départ étaient mélangées dans de bonnes proportions, le sel obtenu pour finir n'avait ni leur forte saveur ni leurs propriétés corrosives. On estima en conséquence que les deux catégories de sel ainsi mélangées possédaient des propriétés antagonistes, ou « hostiles », et se détruisaient mutuellement en agissant l'une sur l'autre. Les deux catégories de sels réagissant de la sorte avec n'importe lequel des trois acides minéraux connus reçurent le nom d'alcali volatil et d'alcali fixe. Le grand philosophe de la nature anglais Robert Boyle fut de ceux qui ont étudié ces interactions à l'aide d'indicateurs colorés.

Au début du XVIII^e s., à Paris, l'Académie des sciences comptait dans ses rangs un groupe de chimistes dont le plus éminent était Wilhelm Homberg. En 1702, Homberg attira l'attention sur plusieurs catégories de sels formés par l'action des acides sur les

alcalis, sur les « terres alcalines » (telles celles présentes dans la chaux), et sur les métaux. Il baptisa ces produits « sels moyens », signifiant par là qu'il s'agissait de substances intermédiaires entre les sels volatils et les sels fixes. La classification de Homberg fut au départ d'un nouveau concept de sel qui occasionna un programme de recherche très fécond tout au long du XVIII^e s. ; sans aucun doute le domaine de la chimie le plus avancé avant les événements ayant entraîné la « révolution chimique ».

En 1718, un jeune collègue de Homberg à l'Académie des sciences, Étienne Geoffroy, publia une « Table des Rapports » précisant l'ordre dans lequel les substances se substituaient les unes aux autres quand on les combinait à une troisième substance. La table de Geoffroy prenait essentiellement en compte les acides, les alcalis, les terres et les métaux correspondant aux sels moyens de Homberg, et elle donne en quelque sorte une interprétation dynamique de leurs compositions et de leurs interactions.

En même temps que d'autres acides, alcalis, terres alcalines et métaux étaient découverts au XVIII^e s., le concept de sel moyen, qui permettait de prédire de nouvelles combinaisons de ces constituants, orientait la direction des recherches. Les chimistes affinèrent leurs méthodes pour identifier de nouvelles substances en fonction de leurs formes cristallines et des modifications supplémentaires qu'il était possible de leur infliger. Certains des nouveaux sels s'avéraient si peu solubles que la définition classique des sels en tant que substances solubles dans l'eau fut progressivement remplacée par une définition fondée, elle, sur leur composition à partir d'un acide et d'une des trois classes de base. Au milieu du siècle, on ne parlait plus de sel « moyen » mais de sel « neutre ».

Bien que le concept de sels neutres ait été affirmé par les progrès qu'il autorisait dans la classification d'un nombre toujours plus important de substances chimiques, il fut étendu à des cas ne correspondant pas strictement à sa définition première. Ainsi, le chimiste français Guillaume-François Rouelle découvrit que certains acides et bases se combinaient en deux proportions stables, l'une contenant un « maximum » d'acide, l'autre un « maximum » de base.

En sus des trois acides minéraux classiques — connus généralement sous le nom d'acides vitriolique, nitrique, et marin — et de l'acide acétique, ou « végétal », on connaissait des acides faiblement caractérisés contenus dans divers sucres de plantes. Entre 1768 et 1783, l'apothicaire suédois Carl Wilhelm Scheele appliqua les méthodes d'analyse classiques élaborées autour de la chimie des sels pour isoler une série de ces acides végétaux, dont les acides tartrique, oxalique, malique et citrique. Outre qu'elle multipliait par deux le nombre des acides répertoriés et des sels qu'ils étaient susceptibles de produire, la recherche de Scheele permit de constituer la première classe de substances organiques dûment identifiées et offrit son plus beau moment de gloire à la chimie des sels du XVIII^e s.

La multiplication des recherches sur la combinaison

des acides et des bases en sels neutres ne découragea pas les chimistes d'arriver à trouver l'acide « universel » au principe de la composition des acides et des bases. Il fallut cependant attendre les travaux de Lavoisier et sa nouvelle classification générale de composition des substances pour enfin pouvoir préciser la composition des acides et des bases qui constituent les sels. Lavoisier découvrit que les acides aussi bien que les bases contiennent des « bases », élémentaires ou composées, qui se combinent avec l'oxygène.

Les catégories d'acide, de base et de sel ont continué à organiser les connaissances en chimie au long des XIX^e et XX^e s., en même temps que la compréhension de leur nature évoluait. Dans les années 1840, la croyance de Lavoisier qui faisait de l'oxygène le principe « acidifiant » fut supplantée par l'idée que les acides libres contiennent de l'hydrogène et les alcalis un radical hydroxyle, qui tous deux se combinent pour former de l'eau lors de la réaction de neutralisation. Plus avant dans le siècle, la théorie de l'ionisation de Svante Arrhenius modifia le point de vue classique selon lequel les sels neutres en solution correspondent à des combinaisons d'acides et de bases réunis. On considéra alors qu'il s'agissait d'ions distincts de charge opposée, qui ne formaient des molécules cohérentes que lorsqu'ils précipitaient ou étaient extraits d'une manière ou d'une autre de la solution. Malgré ces changements et un certain nombre d'autres intervenus dans la compréhension de la nature fondamentale des sels et de leurs constituants, le concept de sel neutre apparu au XVIII^e s. n'en demeure pas moins le premier jalon identifiable de la conception moderne en la matière.

► COLAS A., *Le sel*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1994.

► GUÉRIN H., *Chimie industrielle*, Paris, PUF, t. 2, 1969.

Frederic L. HOLMES

→ Acide et base ; Analyse chimique ; Classification [CHIMIE].

SÉLECTION

BIOLOGIE

Origines et enjeux d'un mot

Dans les années 1800, « sélection » est un mot d'usage courant, en anglais, dans les domaines de l'élevage et de l'horticulture. Il s'applique alors à une action délibérée de l'homme consistant à modifier le caractère d'un troupeau ou d'une lignée végétale en contrôlant les croisements. Rien ne peut à cette époque laisser deviner que, sous la forme de la « sélection naturelle », ce mot en viendra au cours du XIX^e s. à désigner l'hypothèse fondamentale d'une théorie de l'évolution organique. En toute rigueur, la paternité de l'expression « sélection naturelle » revient à Charles Darwin (1809-1882) et à lui seul. La première occurrence se trouve dans un manuscrit de juin 1841, non publié et déposé à la bibliothèque de l'université de

Cambridge (« Notes on the habits of bees », Ms 46.2). Ce n'est cependant qu'en 1859 que la formule sera utilisée pour la première fois de manière publique : elle apparaît dans le titre même du *magnum opus* de Darwin, *De l'origine des espèces par le moyen de la sélection naturelle*.

Avant que Darwin n'ait utilisé la formule « sélection naturelle », l'idée d'un « processus naturel de sélection » avait toutefois été explicitement et publiquement formulée. En 1831, Patrick Matthew utilise occasionnellement cette expression dans un ouvrage portant sur l'utilisation du bois dans la construction navale. Les espèces à l'état naturel ont pour Matthew la capacité de se transformer et de s'adapter à des circonstances nouvelles au travers d'une concurrence dont l'allure est toute malthusienne : « Comme la nature dans toutes ses modifications de la vie a un pouvoir d'accroissement bien au-delà de ce qui est requis pour remplacer ce qui disparaît par suite du vieillissement, les individus qui ne possèdent pas la force requise, la rapidité, le courage ou la ruse, succombent prématurément sans se reproduire, victimes de leurs prédateurs naturels, ou de la maladie, généralement à cause d'un manque de nourriture, leur place étant occupée par les organismes les plus parfaits de leur espèce, qui s'emparent des moyens de subsistance » (*On Naval Timber and Arboriculture*, cité in C. Limoges, 1970, p. 107). Cette spéculation est très proche des concepts darwiniens ultérieurs de lutte pour l'existence et de sélection naturelle. Et c'est à son propos que Matthew utilise l'expression « processus naturel de sélection ». Toutefois le propos comme l'idée ne surgissent qu'incidemment. Matthew ne construit pas à proprement parler une théorie de l'évolution.

Dans la troisième édition de *L'Origine des espèces* (1861), Darwin a reconnu que Matthew avait « émis exactement la même conception de l'origine des espèces que celle proposée par Wallace [et lui-même] ». Il ajoutait que les passages concernés étaient brefs, dispersés, parfois confus, et « étaient passés inaperçus jusqu'à ce que Matthew les fasse lui-même remarquer dans le *Gardener's Chronicle* du 7 avril 1860 » — donc après la parution de *L'Origine (Origine*, 3^e éd., 1861, « An Historical Sketch »).

Il n'existe aucun indice qui permette d'affirmer que Darwin ait eu connaissance de l'ouvrage de Matthew lorsqu'il a conçu son hypothèse fondamentale. Ni le titre du livre de Matthew ni son nom n'apparaissent dans les *Carnets sur la transmutation des espèces* (1836-1844). Le livre de Matthew est d'ailleurs absent de la bibliothèque de Darwin, intégralement conservée. Ce qui est certain en revanche, c'est qu'à plusieurs reprises, et de très bonne heure, Darwin a utilisé l'expression de « moyen naturel de sélection », concurrentement avec celle de « sélection naturelle ». On la trouve par exemple dans une ébauche de 1842 et dans l'*Essai* de 1844 (De Beer, 1958). C'est aussi l'expression « moyen naturel de sélection », et non celle de « sélection naturelle », que l'on trouve dans la fameuse communication présentée par Darwin et Wallace

devant la Société Linnéenne de Londres en 1858, où se trouve pour la première fois exposée publiquement l'hypothèse. Cette communication était un montage de lettres ou de manuscrits non publiés des deux auteurs. Darwin y avait inséré, en particulier, un extrait de son *Essai* de 1844, où l'on voit apparaître l'expression « moyen naturel de sélection ». Wallace n'utilisait aucunement le terme de « sélection ».

Ce que l'on peut retenir des connaissances historiographiques sur la première application du mot « sélection » à la transformation naturelle des espèces, c'est que Darwin, même s'il ne connaissait pas directement l'ouvrage de Matthew, a utilisé un genre de vocabulaire qui lui préexistait et qui était dans l'air du temps. Notons toutefois que la formule « sélection naturelle », contrairement à ce qu'ont souvent dit les historiens, a précédé chez Darwin celle de « moyen naturel de sélection ». Un manuscrit la donne en effet dès 1841 (cf. *supra*), et se trouve aussi dans l'essai de 1844. Par ailleurs, la « sélection naturelle » constituée à elle seule le titre du *Big Species Book*, le grand livre sur les espèces, rédigé de 1856 à 1858, jamais publié de son vivant, et dont *L'Origine des espèces* n'est qu'un « résumé », selon l'expression même de Darwin (Stauffer, 1975).

Darwin a donc bien eu la paternité de la formule de la « sélection naturelle », même s'il ne peut prétendre avoir été le premier à parler de la sélection comme d'un processus naturel. Par-delà ces questions de mot, que les historiens n'ont si soigneusement examinées que parce qu'elles concernent l'origine de l'une des plus importantes théories biologiques modernes, il convient de porter attention aux conditions de la formation du concept. User en effet du mot « sélection » pour désigner un processus naturel de modification des espèces, c'était utiliser une évidente métaphore. Il est essentiel de déterminer dans quelle mesure cette métaphore, empruntée à une technique humaine de domestication, a bien joué un rôle dans la première constitution du concept.

Camille Limoges (1970) a soutenu une thèse radicale sur ce sujet. Il s'inscrit en faux contre les historiens qui estiment que la comparaison entre l'action sélective de l'homme et l'idée de conservation des variations favorables dans la lutte pour l'existence suffit à rendre compte de l'apparition et de la configuration du concept de sélection naturelle. Pour Limoges, il ne faut pas confondre la rhétorique dont Darwin s'est servi pour promouvoir le concept de sélection naturelle, et les conditions réelles de constitution de ce concept. La comparaison avec la sélection humaine, et la désignation même du processus de sélection naturelle, ne seraient venues que renforcer de manière secondaire un dispositif conceptuel qui en était d'abord indépendant.

La position de Limoges a de solides arguments en sa faveur. Il faut en effet prendre au sérieux le fait que dans les *Carnets de notes sur la transmutation des espèces* (1836-1844), nulle part le mot de sélection n'apparaît, alors même que c'est dans ces carnets que l'on observe en détail la genèse du concept. La période

décisive se situe à l'automne 1838. Le 28 septembre de cette année, Darwin jette sur le papier quelques notes sur Malthus, dont il vient de découvrir *L'Essai sur le principe de population* (1798). Prenant acte de l'idée que dans toute espèce la croissance démographique est en permanence limitée par des facteurs tels que la famine, la prédation ou d'autres causes, il écrit soudainement ceci : « L'on peut dire qu'il existe une force comparable à l'action de cent mille coins [*sedges*] qui s'efforceraient d'inscrire toutes les sortes de structures adaptées dans les places libres de l'économie de la Nature, ou plutôt, cent mille coins qui façonneraient des places libres en évinçant [*thrusting out*] les plus faibles. La cause finale de tous ces enfoncements [*wedgings*] doit être de trier [*sort out*] les structures appropriées et de les adapter au changement » (Carnet D, 135e). Ce passage est la première formulation connue du concept de sélection naturelle dans les écrits de Darwin. Elle est manifestement cristallisée par la lecture de Malthus, dont le principe démographique se trouve couplé avec l'idée de concurrence des organismes pour l'occupation de « places » dans l'économie naturelle, et celle d'adaptation relative et changeante. Dans ce passage, le mot « sélection » est absent, de même que toute comparaison avec la transformation par l'homme des espèces domestiquées. Cette comparaison ne viendra en fait que dix semaines plus tard, le 16 décembre 1738 : « C'est une beauté particulière de ma théorie que les races "domestiquées" des êtres organiques soient produites par exactement les mêmes moyens que les espèces, mais beaucoup moins parfaitement et beaucoup plus lentement. — Aucun animal domestiqué n'est parfaitement adapté aux conditions extérieures » (Carnet E, 71). L'on remarque dans cette citation que le mot « sélection » n'apparaît toujours pas. Ce n'est que trois ans plus tard que Darwin commencera à l'utiliser, dans des locutions telles que « sélection naturelle » et « moyen naturel de sélection ».

Un autre argument, puissant, en faveur de l'inessentialité de l'analogie domestique dans la formation du concept de sélection naturelle est sa découverte indépendante par Alfred Russel Wallace en 1858. Dans la lettre qu'il fit parvenir à Lyell, et que celui-ci transmit à Darwin, Wallace formulait un principe de transformation des espèces naturelles dont les prémisses étaient pour la plupart identiques à celles du principe darwinien de sélection naturelle (lutte pour l'existence, relativité de l'adaptation, existence dans les espèces de variations infinitésimales affectant les chances de survie), et dont la capacité explicative était aussi la même (progress adaptatif et divergence). Mais Wallace n'utilisait pas le terme de sélection, ne construisait pas un parallèle entre le changement des espèces dans la nature à l'évolution des espèces domestiquées, par l'homme, et soutenait même que ces deux phénomènes résultaient de processus antagonistes (les transformations artificielles des espèces par l'homme n'obéissent pas au principe d'utilité). L'itinéraire de découverte de Wallace n'était donc aucunement motivé

par une comparaison avec la sélection humaine. Ce sont des questions de nature biogéographique qui l'ont mené à une hypothèse analogue à celle de Darwin, qui lui-même avait d'abord forgé sa conception de la modification naturelle des espèces sur la base de faits et de concepts touchant à la distribution géographique des espèces.

Peut-on pour autant conclure, comme Limoges, que l'analogie domestique et, partant, le mot même de « sélection », sont inessentiels à la théorie darwinienne de l'évolution des espèces ? Il est en réalité excessif de soutenir que Darwin n'aurait persisté à user de cette expression que pour préserver son originalité, et aussi en raison de la rhétorique puissante, mais quelque peu anthropomorphe, que lui fournissait le vocabulaire de la « sélection ». Il aurait pu se faire, sans doute, que la « théorie de la modification des espèces par sélection naturelle » fût développée et acceptée sous un autre nom. Il existe cependant un faisceau de raisons qui permettent de comprendre pourquoi Darwin s'est engagé dans cette voie, pourquoi il a persisté lorsqu'on l'a critiqué sur ce point, et pourquoi ses successeurs ont retenu ce vocabulaire. Aucune de ces raisons ne suffit sans doute à elle seule à rendre nécessaire la désignation du concept de sélection naturelle par le nom dont nous ne pouvons désormais le détacher. Certaines furent même sans doute passablement opportunistes. Il y a ainsi un irréductible élément de contingence historique dans l'accréditation de l'expression de « sélection naturelle ». Mais pour autant que l'on accepte de prendre en compte toutes ces raisons, il devient évident que l'adoption et la diffusion de l'expression ne peuvent être exclusivement imputées au pouvoir de la métaphore.

L'on observe d'abord qu'entre 1841 et 1858, date à laquelle Darwin rend enfin publique sa conception de l'histoire des espèces, le mot de sélection prend une place croissante dans le discours clandestin du naturaliste. Dans cette période, l'argument de l'efficacité rhétorique ne vaut pas grand-chose. En effet ce n'est pas seulement le mot qui intéresse alors Darwin, mais l'analogie raisonnée entre sélection « naturelle » et sélection « artificielle », cette dernière expression étant d'ailleurs une innovation lexicale. Avant Darwin en effet, la « sélection » est par définition un artifice ; la notion de sélection « artificielle » n'est pas un préalable mais un effet de l'apparition de la notion de sélection « naturelle ». L'intérêt de l'analogie était le suivant. Lorsque Darwin a construit sa théorie, il n'était pas en mesure de donner le moindre exemple concret d'un phénomène actuel de sélection naturelle. *L'Origine des espèces*, d'ailleurs, ne comporte aucun exemple concret d'un cas de sélection naturelle, encore moins une preuve directe de son existence. Dans un tel contexte, la sélection artificielle apporte un argument décisif. En effet, dans le dispositif conceptuel qui est celui de Darwin, l'analogie entre sélection artificielle et sélection naturelle est très forte. Elle implique l'existence d'un concept général de sélection dont les éléments sont rigoureusement identiques dans la nature et

dans l'opération humaine de sélection. Dans les deux cas, il faut des variations (les « différences individuelles »), il faut que ces variations soient transmissibles de manière héréditaire, et il faut qu'elles soient triées en vertu d'un processus quelconque qui affecte la probabilité de reproduction de telle ou telle variation (tel ou tel caractère différentiel) à la génération suivante. Dans la sélection artificielle, ce facteur est le contrôle de la reproduction par l'homme (accouplement des animaux, pollinisation des plantes, repiquage préférentiel des boutures...). Dans le cas de la sélection naturelle, c'est la lutte pour l'existence qui constitue la force de changement. À défaut de donner une preuve directe de l'existence de la sélection naturelle, les pratiques humaines de sélection artificielle fournissaient à Darwin une preuve de l'existence de certains de ses éléments. La sélection artificielle montrait aussi que la modification indéfinie des espèces n'était pas une vue de l'esprit. Comme l'a justement dit Georges Canguilhem (1968), la sélection artificielle avait pour Darwin valeur d'un « modèle ». Cette expression peut être retenue à condition d'entendre par « modèle » un dispositif expérimental analogique, qui présente de manière directe certaines des caractéristiques essentielles du processus naturel.

Darwin était cependant conscient du côté métaphorique de la « sélection naturelle ». En tant que mot il l'appréciait pour ce qu'il pouvait être utilisé aussi comme un verbe, ce qui évidemment renforçait la vision de la sélection comme un « agent », avec tous les risques d'anthropomorphisme attachés à un tel usage. Cependant, lorsqu'on lui reprochait précisément de faire la part trop belle à la métaphore, il répondait qu'il employait le mot « sélection » de la même manière que les géologues utilisent le mot anglais *denudation* (érosion), c'est-à-dire « un agent exprimant le résultat de diverses actions combinées ». Autant qu'une métaphore, la « sélection naturelle » devait donc être prise comme une expression abrégée résumant un processus complexe.

Wallace essaya de convaincre son ami et allié Darwin d'abandonner l'expression « sélection naturelle », et d'y substituer celle de « survivance du plus apte » proposée par Herbert Spencer (1864, II, § 164-165). « Ce terme est la juste expression du fait ; la "sélection naturelle" n'est qu'une expression métaphorique de ce fait, et cette expression est dans une certaine mesure indirecte et incorrecte, car même si l'on personnifie la Nature, celle-ci ne procède pas tant à une sélection des variations spéciales qu'à une extermination des plus défavorables » (lettre de Wallace à Darwin, 2 juillet 1866). Darwin accepta d'incorporer la formule spencérienne à côté de la sienne propre dans un certain nombre de passages solennels des deux dernières éditions de *L'Origine des espèces* (1868, 1872). Mais il ne renonça jamais à la sélection naturelle. Wallace finit par adopter sans réserve l'expression, de même que tous les darwiniens, et aussi leurs adversaires.

L'expression de sélection naturelle était en effet à

même de véhiculer certains aspects importants du concept darwinien, que l'expression de survivance du plus apte aurait plutôt occultés. En premier lieu, la sélection naturelle est une sélection de caractères, dans une population, et à raison des avantages que ces caractères confèrent à des individus en termes de survie et de reproduction. L'expression spencérienne de « survivance du plus apte » fait disparaître cette ontologie à trois niveaux (variation héréditaire, individu, population), pour lui substituer une ontologie à deux niveaux : individus (d'un type global déterminé) et population (ou espèce). Spencer était au demeurant parfaitement conscient de cet aspect de son principe (Spencer, 1893). En second lieu, Darwin estimait essentiel de distinguer deux formes naturelles du processus de sélection : la « sélection naturelle » proprement dite (qui met les individus en concurrence du double point de vue de la viabilité et de la reproduction) et la « sélection sexuelle » (qui ne met en jeu que la probabilité de reproduction, et ressemble en cela davantage à la sélection artificielle humaine). La sélection sexuelle est, de fait, devenue un secteur de recherches essentielles pour les biologistes de l'évolution après Darwin. Ici encore, l'on peut imaginer, rétrospectivement, que l'on ait pu se passer du mot « sélection », et cependant découvrir le phénomène de « sélection sexuelle ». Mais il faut bien reconnaître que ce mot a rendu une désignation et une classification des phénomènes bien commodes.

Ce n'est donc pas pour des raisons seulement tactiques que Darwin a accredité le terme de « sélection » dans le langage naturaliste. Sans doute l'adoption du mot a-t-elle eu au départ valeur de métaphore. Très vite, cependant, la métaphore fait place à une analogie raisonnée, à une authentique comparaison, qui a donné à la sélection artificielle la signification d'une pièce expérimentale essentielle dans le dispositif de justification qui était celui de Darwin. La sélection naturelle est en effet une hypothèse qui repose sur trois généralisations (variation, hérédité, principe malthusien) dont deux (variation, hérédité) ont rigoureusement la même signification dans la sélection artificielle (Gayon, 1992 ; Hodge, 1992). Enfin, par sa désignation même, cette hypothèse avait une valeur heuristique : en soulevant la question de savoir ce qui est sélectionné (caractères ? individus ? groupes ?) et en suggérant la distinction entre plusieurs processus naturels de sélection (sélection naturelle *stricto sensu*, sélection sexuelle), elle ouvrait un champ immense de questions nouvelles et fécondes.

La théorie darwinienne de la sélection

La théorie de la sélection naturelle constitue un cas remarquable de la difficulté, pour l'historien des sciences, de décrire un commencement. Ici en effet, la difficulté ne tient pas à la rareté des documents, mais se trouve renforcée par leur abondance. La manie de l'archivage de Darwin fait que l'on connaît avec une exceptionnelle précision les circonstances dans lesquelles Darwin a conçu et développé, de manière non

publique, l'hypothèse de sélection naturelle en tant que pièce centrale de sa théorie de l'origine des espèces. Il y a exactement vingt ans entre la première formulation de l'hypothèse (1838) et le premier exposé public en 1858, devant la Société Linnéenne de Londres (Darwin & Wallace [1858] 1859). Pendant tout ce temps, le mot « sélection » est demeuré clandestin, de même que toute la théorie qui se profilait dans son sillage. En 1856, Darwin prit la décision de rédiger un livre exposant en détail cette théorie. Le livre ne fut jamais terminé, mais son manuscrit a été conservé, et partiellement publié (Stauffer, 1975). Au moment où Darwin interrompit la rédaction (été 1858) de ce livre, qu'il appelait familièrement « my big species book » (mon grand livre sur les espèces), le manuscrit comportait onze chapitres et 225 000 mots. La première partie (140 000 mots) est une ébauche du futur livre sur *La variation des animaux et des plantes sous l'action de la domestication*, dont le texte définitif, publié en 1858, compte 315 000 mots. Dans *L'Origine des espèces*, cette première partie est condensée en un chapitre de 11 000 mots (chap. I, « La variation dans l'état domestique »). La seconde partie du manuscrit de 1856-1858 s'intitulait « Sélection naturelle ». Sous une forme remaniée, cette partie a fourni environ un peu plus de la moitié (80 000 mots) de *L'Origine des espèces* (150 000 mots), et a été publiée (Stauffer, 1975). La suite de l'histoire est bien connue. En juin 1858, Darwin reçoit d'Alfred Russel Wallace, alors en Malaisie, un court essai que celui-ci lui demandait de soumettre à Charles Lyell, en vue d'une présentation publique à la Société Linnéenne, si le texte en valait la peine. Stupéfait par la coïncidence entre les vues du jeune naturaliste sur l'origine des espèces et les siennes propres, désespéré d'être devancé, Darwin s'en remit à Lyell, qui proposa de présenter à la Société Linnéenne un montage comprenant l'essai de Wallace et deux manuscrits incontestables de Darwin écrits en 1844 et 1857, et communiqués alors à des correspondants. Ainsi le premier exposé public de la sélection naturelle fut-il cosigné par Darwin et Wallace. Ce compromis, décidé en l'absence de Wallace, préservait à la fois l'honneur de Darwin et son souhait légitime de faire valoir sa priorité. Immédiatement après la présentation de la communication devant la Société Linnéenne, Darwin interrompit la rédaction de son « grand livre » et, pressé par Lyell, se mit à la rédaction d'un « résumé » de ses conceptions sur l'origine des espèces et la sélection naturelle. L'éditeur refusa avec raison le livre de 490 pages qui sortit en novembre 1859.

Il est indispensable d'avoir ces détails historiographiques à l'esprit pour comprendre les caractères épistémologiques essentiels de cet événement que l'on appelle couramment la première formulation de la théorie de la sélection naturelle. D'une part c'est bien une authentique théorie, c'est-à-dire un système articulé de propositions, que Darwin a soudainement rendue publique en 1859 dans *L'Origine des espèces* sous le nom de « sélection naturelle », et point

simplement une conjecture isolée (ce qui eût été le cas vingt ans plus tôt). D'autre part il faut prendre acte des deux découvertes indépendantes de l'hypothèse centrale de cette théorie par Darwin et Wallace, et en saisir l'importance, considérable, pour le destin ultérieur de la théorie de la sélection naturelle.

Un « argument ». — Darwin n'a pas cherché à donner une définition bien tranchée de la sélection naturelle. La formule la plus proche d'une définition est celle-ci : « Pouvons-nous douter [...] que les individus possédant un avantage quelconque, quelque léger qu'il soit d'ailleurs, aient la meilleure chance de survivre et de reproduire leur type ? Nous pouvons être certains, d'autre part, que toute variation, si peu nuisible qu'elle soit, sera impitoyablement détruite. Cette préservation des variations favorables et le rejet des nuisibles, je l'appelle sélection naturelle » (*Origine des espèces*, 1859, chap. IV, « Sélection naturelle »). Cette définition décrit la pièce centrale du processus de la sélection naturelle. Mais il est clair que ce qui importait à Darwin, c'était la longue chaîne des arguments capables de justifier la sélection naturelle comme hypothèse centrale d'une vaste théorie de l'histoire de la vie. Aussi bien la sélection naturelle est-elle plutôt le mot-clef de cette théorie, dont le nom exact était « théorie de la descendance avec modification par sélection naturelle » (*ibid.*, chap. XIV, « Récapitulation et conclusion »). *L'Origine* elle-même, de l'aveu de son auteur, n'est rien d'autre qu'« un long et unique argument [one long argument] » destiné à justifier cette théorie (*ibid.*).

Cet argument a une structure remarquable, qui n'a pas été perçue par les premiers lecteurs de *L'Origine des espèces*. Dans les années qui ont suivi la parution, de nombreux auteurs se sont interrogés sur le modèle de scientificité qui était mis en œuvre dans ce livre. Nombreux furent les savants et philosophes qui affirmèrent que ce livre, tantôt inductif, tantôt hypothético-déductif, tantôt spéculatif, ne se conformait pas aux canons ordinaires de la méthode scientifique, et ne méritait sans doute pas le label de « scientifique » (voir Ellegard, 1958 ; Hull, 1973). En réponse à ces critiques de nature philosophique, Darwin éprouva le besoin de préciser la structure argumentaire de *L'Origine des espèces*, dans l'introduction de son livre de 1868 sur *La Variation*. Le passage mérite d'être cité *in extenso* : « Dans les recherches scientifiques, il est licite d'inventer une hypothèse quelconque ; si celle-ci explique de grandes classes de faits indépendants, on l'élève au rang de théorie bien établie. On peut envisager le principe de sélection naturelle comme une simple hypothèse, rendue cependant probable par ce que nous savons positivement de la variabilité des êtres organiques à l'état de nature, de la lutte pour l'existence, de la préservation quasiment inévitable des variations qui s'ensuit, et de la formation analogique des races domestiques. Or cette hypothèse peut être testée — et c'est là à mon sens la seule manière honnête

et légitime d'aborder la question dans son ensemble — en examinant si elle explique plusieurs grandes classes de faits indépendants, tels que la succession géologique des êtres organiques, leur distribution dans les temps passés et présents, leurs affinités mutuelles et leurs homologies. Si le principe de sélection naturelle explique bien ces grands ensembles de faits, elle doit être acceptée. » Les italiques de ce texte, ajoutées par nous, soulignent le vocabulaire philosophique précis utilisé par Darwin. L'on remarque que la sélection naturelle est présentée comme une hypothèse librement inventée, mais résultant d'une double stratégie de justification. Viennent d'abord des arguments qui rendent hautement probable son existence (même si elle n'est pas directement observée). Deux genres distincts d'arguments interviennent ici. D'une part l'hypothèse est la conclusion vraisemblable d'un raisonnement dont les prémisses sont un certain nombre de généralisations empiriques solides (portant sur le taux de reproduction des organismes, la limitation des ressources, les faits de variation et ceux d'hérédité). D'autre part Darwin fait référence à la « formation analogique des races domestiques ». Il s'agit de souligner que la sélection artificielle, en tant que modèle expérimental analogique, éclaire de manière directe un aspect important du processus de sélection naturelle, c'est-à-dire la capacité qu'un processus de tri a de modifier durablement une espèce. Cette première salve d'arguments correspond très exactement aux chapitres 1 à 5 de *L'Origine des espèces*.

La deuxième phase de justification renvoie à la seconde moitié du livre (chap. 7 à 12 dans la 1^{re} édition). L'on voit alors la sélection naturelle devenir un principe qui explique diverses classes de faits indépendants (extinction, divergence, distribution géographique des espèces, affinités morphologiques, embryologie comparée). L'hypothèse est alors justifiée par sa capacité explicative et unificatrice, l'idée fondamentale, et classique en méthodologie scientifique, étant qu'une hypothèse est d'autant moins arbitraire qu'elle rend compte de faits indépendants.

Considérée dans ses deux volets, cette stratégie de justification de Darwin est conforme à l'interprétation du modèle newtonien de la science telle que l'avaient développé les premiers philosophes des sciences du XIX^e s. en Angleterre (en particulier Hwewell et Herschel). Selon ce modèle, une hypothèse doit donner la *vera causa*, c'est-à-dire la cause « vraie et non fictive », qui doit être d'abord suggérée par un raisonnement à partir de données empiriques, puis confirmée par les phénomènes indépendants qu'elle explique. Darwin n'éprouve pas même le besoin de citer Hwewell et Herschel, qui justement s'étaient portés au premier rang des critiques de *L'Origine*, au nom de principes épistémologiques. Mais les destinataires de l'argument sont évidents pour l'auteur. L'on sait par ailleurs que Darwin avait pris connaissance des conceptions de la science de ces deux auteurs dans la fin des années 1830, au moment où il a commencé à

bâti sa théorie. Et c'est très consciemment qu'il s'est efforcé d'imiter le style « newtonien » tel qu'on l'exposait dans les ouvrages de méthodologie scientifique de l'époque (voir Hull, 1973 ; Kavaloski, 1974 ; Ruse, 1975).

C'est donc bien une théorie que Darwin a mise en place sous le nom de sélection naturelle. Il s'agissait de repenser de fond en comble l'organisation générale de l'histoire naturelle des êtres vivants. Le succès de l'hypothèse darwinienne doit beaucoup à cette architecture théorique, sortie au grand jour en une seule fois, et rendant à vrai dire bien difficile, une fois là, de voir les choses comme avant.

Controverses originelles sur « l'hypothèse » : Darwin et Wallace. — Tous ceux qui ont lu l'essai adressé par Wallace à Darwin en 1858 ont été impressionnés par les convergences extraordinaires entre ses vues et celles de Darwin. Énumérons brièvement ces ressemblances, telles qu'elles apparaissent dans les textes constituant la communication commune soumise par Darwin et Lamarck à la Société Linnéenne en 1858. Les deux auteurs reprennent l'aphorisme célèbre d'Augustin Pyrame de Candolle selon lequel la nature entière est en guerre, et donnent à cette métaphore le sens précis d'un concept qu'ils désignent du nom de « lutte pour la vie » (ou « pour l'existence »). Dans les deux cas, ce concept signifie que, la quantité de nourriture disponible pour une espèce étant toujours limitée tandis que les populations d'organismes tendent à croître de manière géométrique, un nombre considérable d'individus doit périr à chaque génération. Wallace et Darwin conçoivent par ailleurs les adaptations comme étant toujours relatives à un environnement. Enfin tous deux admettent que les organes et les instincts présentent dans la plupart des cas des variations infinitésimales qui influent sur la vigueur des organismes, et sur leur « chance de survie ». De l'ensemble de ces prémisses, les deux auteurs déduisent qu'il existe une tendance des espèces à former indéfiniment de nouvelles variétés, et à les perpétuer. De cette hypothèse, les deux auteurs tirent deux conséquences majeures. La première consiste dans le nécessaire « progrès » adaptatif des races et des espèces qui survivent. La seconde conséquence est la « divergence » : les espèces tendent indéfiniment à engendrer de nouvelles espèces dont les caractères se différencient toujours davantage.

Ces convergences montrent que Darwin et Wallace partageaient à la fois la conviction de l'existence d'un certain processus de modification des espèces, et celle de son immense portée théorique. Il existe cependant des différences importantes entre les deux auteurs quant à leur conception même de l'hypothèse de sélection naturelle. Ces différences sont reconnaissables dès la communication commune de 1858. Elles se sont ensuite amplifiées en une polémique qui a valeur de débat fondamental dans l'histoire du darwinisme théorique.

Dans l'essai de 1858, Wallace se distingue clairement de Darwin sur au moins cinq points. Par commodité de langage, l'on s'autorisera à parler de « sélection naturelle » à propos de Wallace, bien que celui-ci n'appelle pas ainsi le principe qui joue chez lui un rôle analogue à la sélection chez Darwin.

1) Wallace récuse la comparaison entre modification artificielle et transformation naturelle des espèces. 2) Il n'envisage pas du tout un processus analogue à la sélection sexuelle de Darwin. 3) Son concept de sélection naturelle est sensiblement différent de celui de Darwin. Darwin voit la sélection naturelle comme un processus fondamentalement concurrentiel : la lutte pour l'existence se développe d'abord entre individus dans l'espèce. Cette conception compétitive implique que l'élimination des formes moins bien adaptées est un effet secondaire de la préservation des formes les mieux adaptées. Elle implique aussi que le processus de sélection opère indéfiniment, même dans un environnement stable, pour autant bien sûr qu'il existe un potentiel de variation dans l'espèce. Par comparaison, la conception qu'a Wallace de la sélection est environnementale. Dans cette conception, les individus luttent principalement contre l'environnement, dont les conditions fixent le standard absolu auquel les individus doivent se conformer pour survivre et se reproduire. La sélection consiste alors fondamentalement à éliminer les inaptes, plutôt que les moins aptes (Nicholson, 1960). 4) Chez Darwin, la variation intraspécifique consiste toujours et sans ambiguïté dans les « différences individuelles ». Wallace est plus indécis sur ce point. La variation à laquelle il pense en 1858 semble bien consister le plus souvent en différences entre des « variétés » ou races constituées, ce qui impliquerait que la sélection opère entre groupes plutôt qu'individus (Bowler, 1976). Parfois cependant il fait aussi référence à des variations individuelles (Kottler, 1985). Cette différence entre Wallace et Darwin prend toute son importance si l'on fait intervenir l'hérédité : Darwin fait abondamment usage de ce mot, Wallace ne l'emploie pas (Gayon, 1992). La qualification de la variation comme héréditaire va de pair avec une représentation individualiste et non typologique de la variation : celle-ci est par définition quelque chose qui apparaît et se transmet dans des lignées d'individus. 5) Les deux auteurs n'ont pas la même représentation de la « divergence », c'est-à-dire de l'une des principales classes de phénomènes expliqués par le principe de sélection. Wallace conçoit la divergence comme un processus par lequel une forme-fille se différencie d'une forme-mère en la supplantant. Darwin conçoit la divergence comme signifiant à la fois transformation d'une lignée dans le temps, et comme processus de ramification (Kottler, 1985). Autrement dit, Wallace, en 1858, ne voit pas clairement que la sélection produit la diversification (et pas seulement la transformation).

Après la publication de *L'Origine des espèces*, Wallace a vite rallié les vues de Darwin sur ces cinq points. Ces divergences initiales sont cependant importantes,

en ce qu'elles ont constitué la première illustration d'équivoques et de controverses qui ont jalonné l'histoire de la théorie darwinienne de l'évolution après Darwin. D'une certaine manière, les points (3), et surtout (4) et (5) font encore aujourd'hui l'objet de débats fondamentaux et ouverts. Formulés dans un langage contemporain, le point (4) fait immédiatement penser à la querelle sur les niveaux de sélection. Le point (5), c'est-à-dire la question de la signification de la divergence, trouve aujourd'hui un prolongement dans la théorie des équilibres ponctués, qui dissocie les processus produisant la transformation des espèces et ceux produisant leur ramification (Eldredge & Gould, 1972).

Les deux alliés devaient cependant s'engager dans d'autres controverses, instructives pour l'histoire des sciences. Ces controverses ont duré jusqu'à ce que Darwin se retire du débat sur l'évolution, et ne se sont pas soldées par un consensus. Deux enjeux théoriques majeurs s'y reconnaissent. Le premier a trait aux niveaux de sélection : tandis que Darwin s'est toujours tenu à un concept individualiste de la sélection, Wallace entendait réserver une place importante à la possibilité d'une sélection de groupe. Le second enjeu était ce qu'on appellerait aujourd'hui « l'adaptationnisme », position que Wallace a quant à lui soutenue sous le nom de « principe d'utilité ». Wallace estimait en effet que tous les traits des organismes étaient utiles, et qu'ils avaient tous été directement produits par la sélection naturelle. Darwin était en désaccord sur ces deux points. D'une part il admettait que bon nombre de traits pouvaient être neutres. D'autre part il estimait que l'action de la sélection naturelle était contrainte par d'autres facteurs interférant de manière importante avec son action : sélection sexuelle, action directe de l'environnement, effet de l'usage et du non-usage (autrement dit hérédité lamarckienne), corrélation de croissance. Il en résultait que des caractères utiles pouvaient fort bien apparaître par chance, la sélection ne faisant alors que les conforter après coup. Ces deux controverses se sont développées à propos de divers problèmes techniques dans le détail desquels on n'entrera point ici (voir Kottler, 1985).

Le point épistémologiquement important à souligner est que les divergences et controverses qui ont nourri le débat des deux codécouvreurs du principe de sélection naturelle n'ont cessé d'habiter les débats internes des théoriciens d'inspiration darwinienne depuis les années 1860. Stephen Jay Gould, évoquant précisément le dialogue Wallace-Darwin, a très judicieusement qualifié sa signification exemplaire pour l'histoire des sciences : « Les questions essentielles d'une discipline sont généralement formulées par les premiers penseurs compétents qui s'y engagent. L'activité professionnelle intense des siècles ultérieurs apparaît alors comme des variations sur cet ensemble de thèmes. La flèche de l'histoire spécifie une succession de contextes changeants dans lesquels les mêmes questions anciennes sont incessamment débattues » (Gould, 1977, 1).

Après Darwin

Après 1872, date de la parution de la sixième et dernière édition de *L'Origine des espèces*, Darwin se retire du débat sur l'évolution. D'une édition sur l'autre, le livre, s'il avait conservé la même structure argumentaire, était devenu méconnaissable dans le détail des pages. D'innombrables modifications étaient intervenues qui visaient à prendre en compte les multiples objections adressées à l'auteur. Peter Vorzimmer a analysé en détail ces « années de controverse » (1970). Il conclut qu'à force de remaniements et de concessions Darwin s'est trouvé dans la position inconfortable de défendre une conception qu'il était de moins en moins capable de démontrer en détail, à la satisfaction de ses pairs. Désabusé, il écrit à l'un de ses correspondants : « J'ai décidé de ne plus perdre de temps à lire des comptes rendus de mes travaux sur l'évolution » (lettre à Wright, 6 juin 1872). Une autre lettre à Haeckel indique cependant qu'il était confiant dans la capacité des générations ultérieures à mieux établir et exploiter l'édifice dont il avait posé les premières pierres : « Il y a beaucoup d'individus qui sont autant, et peut-être davantage, capables que moi-même de développer notre travail » (lettre à Haeckel, 23 déc. 1871). Raconter en détail le développement du paradigme sélectionniste dans la science et la culture modernes n'aurait guère de sens ici.

Côté science, il a bien fallu documenter, prouver et éprouver les multiples prémisses et conséquences de l'hypothèse de sélection naturelle. Pendant soixante-dix ans environ, l'essentiel des débats a porté sur l'existence même de la sélection naturelle. Que fallait-il entendre par « différences individuelles » ? Étaient-elles héréditaires, et comment ? Comment les mesurer ? Comment évaluer sur le terrain le postulat darwinien selon lequel des avantages infinitésimaux suffisent à transformer à la longue une espèce ? Ces questions ont joué un rôle moteur fondamental dans le développement de la biologie des populations, la biométrie et la science de l'hérédité. Ce n'est guère qu'une fois les appareils méthodologiques de ces nouvelles disciplines constitués que la sélection naturelle commença à apparaître, dans les années 1920, comme quelque chose qui d'une part existait, d'autre part donnait prise à des modèles théoriques raisonnablement prédictifs (sur l'ensemble de cette histoire, voir Gayon, 1992).

À partir des années 1930, l'exploration du paradigme prend une autre allure. L'hypothèse étant bien établie dans ses prémisses, les évolutionnistes se sont mis à examiner avec un peu plus de précision ce que pouvait signifier une reconstruction intégrale des disciplines naturalistes autour du principe de sélection. Ce fut l'aventure de la *Synthèse moderne* ou, comme on a dit plus tard, la « théorie synthétique de l'évolution ». L'on a vu alors les zoologistes, les botanistes, les paléontologues, s'efforcer à concilier leurs concepts et leurs méthodes avec l'approche populationnelle et généticienne de la diversité biologique. Ernst Mayr,

l'un des principaux protagonistes de cette aventure, a résumé en ces termes son esprit : « Le terme "synthèse évolutive" fut introduit par Julian Huxley dans *Evolution: The Modern Synthesis* (1942) pour désigner un accord sur deux grandes propositions : d'une part l'affirmation selon laquelle l'évolution graduelle peut être expliquée en termes de petits changements génétiques (les "mutations") et de recombinaison, la sélection naturelle étant le facteur qui ordonne cette variation génétique ; d'autre part le principe selon lequel les phénomènes de l'évolution, en particulier les processus macroévolutifs et la spéciation, peuvent être expliqués de manière à ce qu'ils soient compatibles avec les mécanismes génétiques connus » (Mayr, 1980, 1). L'on se reportera à l'ouvrage collectif ainsi introduit par Mayr pour apprécier la conquête effective des disciplines naturalistes par le paradigme darwinien, un siècle environ après la première formulation du principe de sélection naturelle par Darwin, dans les années 1930-1950.

Un demi-siècle plus tard, à l'orée du troisième millénaire, le paysage scientifique doit être vu de manière plus nuancée. D'un côté, plus on cherche plus on trouve d'illustrations de l'existence et de l'universalité du processus de sélection naturelle. Ce qui était chez Darwin une « hypothèse » est devenu l'un des plus importants de tous les phénomènes biologiques, objet d'une véritable industrie de recherche. Sur ce point on ne peut avoir de doute : si le darwinisme consiste dans l'étude empirique du processus de sélection naturelle, il n'a jamais été aussi largement répandu et aussi fécond. Mais par ailleurs des fissures importantes sont apparues dans le bel édifice que Darwin appelait la « théorie » de la sélection naturelle. Il n'est plus aussi évident que la sélection naturelle soit un principe explicatif suffisant et satisfaisant pour expliquer toutes les « grandes classes de faits indépendants » que lui imputait Darwin. A l'échelle de la macroévolution, le principe de sélection, même si l'on doit toujours tenir compte de son action omniprésente, doit composer avec d'autres facteurs, biotiques et physiques, intervenant dans l'histoire de la vie en grand : catastrophes physiques majeures, contraintes embryologiques, dynamique propre de la biosphère et de ses sous-systèmes biologiques et physiques, événements stochastiques de diverses sortes. Le biologiste moderne se trouve ainsi dans une situation théorique à peu près inverse de ses collègues contemporains de Darwin : d'hypothèse fragile dans sa base empirique directe, mais puissamment corroborée par ses conséquences lointaines, la sélection naturelle est devenue un phénomène ubiquiste et aisément observable, dont l'importance est immense, mais qui ne suffit certainement pas à épuiser l'intelligibilité globale du processus évolutif (Gayon, 1995).

Quant aux implications sociales, culturelles et politiques du concept de sélection, elles débordent l'ambition d'un dictionnaire de philosophie des sciences (sur ce sujet inépuisable, voir Tort, 1992 et 1996).

► BOWLER P.J., « Alfred Russel Wallace's concepts of variation », *Journal of the History of Medicine*, 31, 1976, 17-29. — CANGUILHEM G., « Les concepts de "lutte pour l'existence" et de "sélection naturelle" en 1858 : Charles Darwin et Alfred Russel Wallace », *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1968, p. 99-111. — DARWIN C., *Charles Darwin's Notebooks 1836-1844*, éd. P. Barrett et al., Ithaca (New York), Cornell Univ. Press, 1987 ; *L'Origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la préservation des races favorisées dans la lutte pour la vie* [1^{re} éd. angl. 1859], texte établi par D. Becquomont à partir de la trad. d'E. Barbier, Paris, Garnier-Flammarion, 1992 ; *L'autobiographie* [écrit en 1876, 1^{re} publ. en anglais en 1886], trad. J.M. Goux, Paris, Belin, 1985. — DARWIN C. & WALLACE A.R., « On the Tendency of Species to Form Varieties, and on the Perpetuation of Varieties and Species by Means of Selection » [lu le 1^{er} juillet 1858], *Journal of the Proceedings of the Linnean Society (Zoology)*, 3, 1859, 45-62. — DE BEER G., *Evolution by Natural Selection. Darwin and Wallace. Darwin's Sketch of 1842. His Essay of 1844, and the Darwin-Wallace Papers of 1858*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1958 (l'essai de 1844 est disponible en français sous le titre *Ébauche de l'origine des espèces*, trad. de C. Lameere, revue et complétée par D. Becquomont, Lille, Presses Univ., 1992). — ELDREDGE N. & GOULD S.J., « Punctuated equilibria : an alternative to phyletic gradualism », in SCHOPF J.M. éd., *Models in Paleobiology*, San Francisco, Freeman, Cooper & Co. 1972, p. 82-115. — ELLEGARD A., *Darwin and the General Reader : The Reception of Darwin's Theory of Evolution in the British Periodical Press, 1859-1872*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1958, 1990. — GAYON J., *Darwin et l'après-Darwin : une histoire de l'hypothèse de sélection naturelle*, Paris, Kimé, 1992 ; « Neo-Darwinism », in WOLTERS G., LENNOX J.G. & MCLAUGHLIN P. éd., *Concepts, Theories, and Rationality in the Biological Sciences*, Univ. Konstanz/Univ. of Pittsburgh Press, 1995, p. 1-25. — GOULD S.J., « Eternal metaphors of paleontology », in HALLAM A. éd., *Patterns of Evolution as Illustrated by the Fossil Record*, New York, Elsevier, 1977, p. 1-26. — HODGE M.J.S., « Natural selection : historical perspectives », in FOX KELLER E. & LLOYD A. éd., *Keywords in Evolutionary Biology*, Cambridge (Mass.), Cambridge Univ. Press, 1992, p. 212-219. — HULL D., *Darwin and His Critics : The Reception of Darwin's Theory of Evolution by the Scientific Community*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1973. — KANAŁOSKI V.C., *The vera causa principle : a historical-philosophical study of a metatheoretical concept from Newton through Darwin*, Chicago, Univ. of Chicago, 1974 (Ph. dissertation). — KOTTLER M.J., « Charles Darwin and Alfred Russel Wallace : Two decades of debate over natural selection », in KOHN D. éd., *The Darwinian Heritage*, Princeton (New Jersey), Princeton Univ. Press, 1985, p. 367-432. — LIMOGES C., *La sélection naturelle. Étude sur la première constitution d'un concept (1837-1859)*, Paris, PUF, 1970. — MALTHEUS T.R., *An Essay on the Principle of Population, as it Affects the Future Improvement of Society*, Londres, Johnson, 1798. — MAYR E. & PROVINE W.B., *The Evolutionary Synthesis : Perspectives on the Unification of Biology*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1980. — NICHOLSON A.J., « The role of population dynamics in natural selection », in TAX S. éd., *Evolution after Darwin*, vol. 1, 1960, p. 477-522. — RUSE M., « Darwin's debt to philosophy : an examination of the influence of the philosophical ideas of John F.W. Herschel and William Whewell on the development of Charles Darwin's theory of evolution », *Studies in History and Philosophy of Science*, 6, 159-181. — SPENCER H., *Principles of Biology*, Londres, Williams & Norgate, 2 vol., 1864 ; « The inadequacy of natural selection », *Contemporary Review*, 43, 1893. — STAUFFER R.C., *Charles Darwin's Natural Selection. Being The Second Part of His Big*

Species Book Written from 1856 to 1858, éd. d'après ms, Cambridge (Mass.), Cambridge Univ. Press, 1975. — TORT P. éd., *Darwinisme et société*, Paris, PUF, 1992 ; *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, Paris, PUF, 3 vol., 1996. — VORZIMMER P.J., *Charles Darwin : The Years of Controversy*, Philadelphia, Temple Univ. Press, 1970.

Jean GAYON

— Biogéographie ; Darwinisme ; Eugénisme ; Évolutionnisme ; Lamarckisme ; Plasma germinatif ; Sociobiologie ; Taxonomie ; Téléologie ; Vivant (Théorie du) ; Weismann.

SHERRINGTON Charles Scott, 1857-1952

Physiologue britannique. Les premiers travaux de Sherrington, formés dans le laboratoire de physiologie de Sir Michael Foster au Gaius College de Cambridge et ancien étudiant de Rudolph Virchow et de Robert Koch, portent sur l'étude du comportement moteur réflexe chez les vertébrés. Les concepts qu'il forge alors demeureront les notions fondamentales employées par les neurosciences. Sherrington acquiert très vite la conviction que « le principal secret de la coordination nerveuse [...] réside dans la combinaison des réflexes » obtenue au moyen de la convergence de nombreuses « voies particulières » empruntées par les impulsions nerveuses vers les « voies communes » qui les conduisent aux neurones moteurs. D'où la formation d'« unités motrices » détenant la clé du processus des actions inhibitrices et excitatrices s'exerçant sur les régions de contact des neurones : les synapses. Processus dont l'analyse occupera Sherrington durant la seconde moitié de sa carrière scientifique (de 1906 à 1932, date de sa réception du prix Nobel de physiologie). Dans son célèbre ouvrage intitulé *The Integrative Action of the Nervous System* (1906), Sherrington apporte la première explication globale et expérimentalement confirmée de la manière dont le système nerveux produit un organisme moteur intégré et coordonné à travers le mécanisme unitaire de l'action réflexe simple ou combinée (musculaire). D'où l'abandon de la notion de sympathie employée par Flourens pour expliquer la manière spécifique dont les régions du cerveau assurent l'unité fonctionnelle d'un animal. Dans la préface de 1947 de *The Integrative Action*, Sherrington résume sa pensée concernant la définition du lien unissant le corps et l'esprit. Il définit ce dernier lien comme expression du plus haut niveau de l'action intégrative : « Dans les types d'organismes où le physique et le psychique coexistent, chacun des deux atteint son but uniquement au moyen d'un contact utile se produisant entre eux. Et cette liaison constitue le degré d'intégration finale et suprême [de l'organisme humain]. »

● Pour une bibliographie complète des œuvres de Sherrington, voir J.F. Fulton Papers. Historical Library, Yale Univ. School of Medicine, Londres, 1897 (New Haven, 1906 ; Cambridge, 1933). — *The Central Nervous System*, vol. III of Michael Foster, *A Textbook of Physiology*, 7^e éd., 1897. — « The correlation of Reflexes and the Principle of the Common

Path », *Report of the British Association for the Advancement of Science*, 74, 1904, 1-14. — *The Integrative Action of the Nervous System*, New Haven, Yale Univ. Press, 1906. — « Some Aspects of Animal Mechanism. Presidential, British Association for the Advancement of Science », *Report of the British Association for the Advancement of Science*, 1922, 1-15. — *The Brain and its Mechanism*, Londres, Cambridge Univ. Press, 1933. — *Man on his Nature*, Londres, Cambridge Univ. Press, 1941.

► ADRIAN E.D., « The Analysis of the Nervous System : Sherrington Memorial Lecture », *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 50, 1957, 991-998. — CANGUILHEM G., *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, PUF, 1955. — FULTON J.F., « Historical Reflections on the Backgrounds of Neurophysiology : Inhibition, excitation, and Integration of Activity », in BROOKS C.M. & CRANEFIELD P.F. éd., *The Historical Development of Physiological Thought*, New York, 1959. — SWAZEY J.P., « Sherrington's Concept of Integrative Action », *Journal of the History of Biology*, 1, 1968, 57-89 ; « Sherrington », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1975, t. XII, p. 395-403.

Éric HAMRAOUI

→ Neurone ; Réflexe.

SIDA

« Aucune maladie n'a suscité ces dernières années autant de réactions d'angoisse et de fascination que le sida brassant les craintes et les tabous millénaires d'épidémie, d'homosexualité et de mort » (M. Pollak, *Les homosexuels et le sida*, Paris, Métailié, 1988). Le sida est une « fêlure du monde » ajoute André Glucksmann (*La fêlure du monde*, Paris, Flammarion, 1994). La réapparition d'épidémies meurtrières qu'on croyait disparues, la mise en cause d'une liberté sexuelle récente furent pour le monde occidental un ébranlement métaphysique digne de la secousse infligée au siècle des Lumières par le séisme de Lisbonne, en 1755.

Les débats et controverses éthiques, moraux, légaux et médicaux ont foisonné depuis l'identification de l'épidémie en 1981. Ils se sont nourris du décalage entre la rapidité de l'identification de la cause de la maladie et l'impuissance à la soigner. Les résultats scientifiques n'ont pas été proportionnels au nombre d'équipes mobilisées, aux sommes dévolues à la recherche et à l'affluence aux congrès internationaux. Les rythmes de la recherche médicale imposent leurs limites.

Le plus grand des scandales du sida est l'élargissement inouï de la fracture sanitaire entre pays riches et pays en voie de développement. D'après des estimations de l'ONUSIDA, programme de l'ONU contre le sida, 30,6 millions de personnes au monde étaient infectées par le virus du sida, le VIH, en novembre 1997, dont 4,6 % (1,4 million) dans les pays industrialisés les plus touchés (Amérique du Nord, Europe occidentale, Australie, Nouvelle-Zélande). L'Afrique subsaharienne comptait à elle seule les deux tiers des individus

infectés (20,8 millions). La prévalence était de 0,3 % de la population adulte en Europe occidentale, 0,6 % en Amérique du Nord et 7,4 % en Afrique subsaharienne. 95 % des personnes infectées vivent dans des pays pauvres et n'ont aucune chance de bénéficier un jour des coûteux traitements antiviraux qui retardent l'apparition des symptômes du sida.

Une maladie transmise par le sang et le sperme – comme la syphilis avant elle – suscite les fantasmes. Que, contingence épidémiologique, les milieux homosexuels aient été les premiers touchés dans les pays industrialisés a contribué à forger la perception du sida comme une maladie à part. Le « groupe de destin » des homosexuels, selon une expression de Michael Pollak, prit un second sens tragique.

La discrimination des personnes séropositives semble en fait beaucoup plus rare qu'on ne pourrait le croire. Une enquête de l'Agence nationale de recherches sur le sida (ANRS) conclut à la « persistance du consensus normatif favorable à l'expression de la tolérance et de la solidarité à l'égard des personnes infectées ou malades » (J.-P. Moatti *et al.*, « Quelques leçons des enquêtes françaises sur la perception sociale de l'infection à VIH », *Connaissances, représentations, comportements*, Paris, ANRS, 1994). Le sida a structuré la communauté homosexuelle, surtout en France où elle était peu organisée, et propulsé l'homosexualité à la une des journaux, à la tribune des congrès scientifiques et jusque dans les discours politiques. Il a, paradoxalement, contribué à la banaliser.

Les questions de santé publique, les épidémies particulièrement, ont de tout temps été au centre d'enjeux politiques, mais rarement autant qu'avec le sida. « J'ai très vite appris qu'il était impossible de séparer la recherche sur le sida de la politique du sida », témoigne Antony Fauci, directeur de l'institut responsable de la majorité des recherches sur le sida au sein des Instituts nationaux de la santé américains (A. Fauci, « AIDS, Past and Future », *AIDS and the Public Debate*, Amsterdam, IOS Press, 1995). Les médias influent sur « le fonctionnement même de la recherche scientifique » (T. Cook & D. Colby, « The Mass-Mediated Epidemic », *AIDS. The Making of a Chronic Disease*, Berkeley, Univ. of California Press, 1992). La « science par conférence de presse » est entrée dans les mœurs.

« Le sida a suscité davantage d'intérêt pour l'histoire qu'aucune autre maladie des temps modernes » estiment deux historiens américains (E. Fee & M. Fox, *AIDS. The Making of a Chronic Disease*). La maladie fut d'abord perçue comme une rupture radicale avec les tendances d'un siècle générateur de sentiments de sécurité. L'analogie avec la peste était sur toutes les lèvres et sous toutes les plumes, même si les maladies vénériennes ou la tuberculose offraient des modèles sans doute plus pertinents. Avec l'installation et l'institutionnalisation de l'épidémie, et le prolongement de la vie des malades, le modèle d'une maladie chronique a émergé à la fin des années 1980. C'est peut-être l'amorce de « la fin d'une logique d'exception », le sida devenant un jour « une maladie comme les autres »

(L. de Villepin *et al.*, numéro spécial X, Conférence internationale sur le sida, *Transcriptase-Journal du Sida*, hors série, automne 1994).

Mais le sida a été et restera sans doute pendant longtemps une maladie à part. La recherche en a été marquée, qu'il s'agisse des circonstances de l'identification du syndrome, lié à la question homosexuelle, ou de la pratique de la recherche elle-même, théâtre de polémiques et de jeux de pouvoir uniques dans l'histoire de la médecine. La sphère politique n'a pas été épargnée, avec en France le choc du sang contaminé. Les relations médecin-malade ont changé, au-delà du sida.

L'identification de l'épidémie

Les plus anciennes traces du VIH ont été détectées dans des sérums prélevés au Zaïre en 1959. Les plus vieux cas de sida identifiés rétrospectivement sont ceux de marins européens qui se seraient infectés en Afrique dans les années 1950 pour le premier, au début des années 1970 pour le second. Des sérums prélevés chez des toxicomanes américains en 1971 et 1972 pourraient contenir des anticorps contre le virus, ce qui en ferait les plus anciennes traces de l'infection dans les pays industrialisés. On sait que la prévalence du virus est passée de 4 % en 1978 à 35 % en 1981 dans un groupe d'homosexuels californiens inclus dans une étude sur l'hépatite B.

Les premières maladies suspectes furent identifiées par les Centres de surveillance des maladies américains (Centers for Disease Control, CDC) au printemps 1981. Cinq cas d'une pneumopathie inhabituelle chez l'adulte, la pneumocystose, furent signalés en Californie puis neuf autres quelques semaines plus tard où apparaissait également une tumeur rare elle aussi, le sarcome de Kaposi (*MMWR*, revue hebdomadaire des CDC, des 5 juin et 4 juillet 1981). Tous les malades étaient homosexuels.

La nouvelle se répandit rapidement et de nouveaux cas furent identifiés là où on les cherchait, chez des homosexuels. La presse s'empara de ces maladies étranges, ou de ces malades déroutants. On parla de « cancer gay » et, plus scientifiquement, de « Gay-Related Immune Deficiency » (GRID). Des efforts considérables furent déployés pour chercher dans le type de relations sexuelles ou le mode de vie de la communauté les causes du nouveau syndrome. Le monde entier entendit parler des « poppers », substances chimiques destinées à favoriser la jouissance. Des immunologistes défendirent encore trois ans plus tard des hypothèses sur l'excès d'exposition au sperme ou une « surcharge antigénique ».

Les trois premiers articles de la presse scientifique (*New England Journal of Medicine*, déc. 1981) signalèrent pourtant que le syndrome, qualifié d'immunodéficience acquise, ne touchait pas uniquement des homosexuels : 7 des 26 malades dont les cas étaient décrits n'étaient pas homosexuels. Puis le *MMWR* publia au cours de l'année 1982 des descriptions du

syndrome chez des femmes, des hémophiles et des receveurs de transfusion sanguine, dont un bébé.

Franco, États-Unis d'Amérique : les débuts de la recherche

Tout pointait vers une origine virale. On suspecta d'abord divers virus connus. Le HTLV fit quelque temps figure de meilleur candidat car il se transmettait, comme l'agent présumé du sida, par le sperme et le sang et infectait les cellules T4, une population particulière de cellules immunitaires dont le déclin était un signe marquant du nouveau syndrome. Il s'agissait d'un rétrovirus, un virus dont le patrimoine génétique composé d'ARN peut synthétiser son équivalent en ADN, lequel ADN s'intègre dans les chromosomes des cellules infectées.

La recherche sur le sida débuta en France quasiment en même temps qu'aux États-Unis, mais dans des circonstances radicalement différentes. Outre-Atlantique elle fut d'emblée institutionnelle, malgré les réticences non dissimulées de l'administration Reagan : les CDC identifièrent l'épidémie, mirent en place un suivi épidémiologique et alertèrent les Instituts nationaux de la santé pour les lancer à la recherche de l'agent infectieux. En France, les premiers travaux sur le sida furent l'œuvre spontanée de médecins et de chercheurs quasiment réduits à leurs propres forces.

Recevant en juin 1981 à l'hôpital Claude-Bernard un jeune homosexuel qui souffrait d'affections inhabituelles, Willy Rozenbaum fit un rapprochement avec les cas que le *MMWR* venait de publier. Des contacts se nouèrent entre des jeunes médecins ou chercheurs de plusieurs hôpitaux parisiens confrontés aux mêmes pathologies déroutantes et incurables. Un « petit noyau d'amis » commença de se réunir en février 1982 (W. Rozenbaum, D. Seux & A. Kouchner, *SIDA, réalités et fantasmes*, Paris, POL, 1984). Il s'intitula « Groupe de travail sur le sida » et atteignit une vingtaine de membres. Il reçut une légère subvention du ministère de la Santé, mais se heurta à l'indifférence ou la hauteur des organismes de recherche publics et privés français. Les membres du Groupe de travail avaient presque tous un point commun qui n'est certainement pas sans rapport avec leur démarche médicale et scientifique vis-à-vis du « syndrome gay ». Ils avaient été militants ou « compagnons de route » des organisations gauchistes en mai 1968 ou dans les années 1970.

S'il faut mettre un nom sur l'origine de la découverte du virus du sida, c'est celui du Groupe de travail. Le groupe reprit l'hypothèse d'un rétrovirus et ajouta le raisonnement qu'on aurait davantage de chances d'isoler ce virus avant l'effondrement des cellules T4 des malades. Le groupe définit le lieu où chercher : dans des ganglions de personnes présentant les signes avant-coureurs du sida. Rozenbaum se mit en quête de virologistes prêts à tenter un isolement. Après avoir essayé des refus dans plusieurs institutions, il trouva à

l'Institut Pasteur une équipe qui accepta. Le 3 janvier 1983, il effectua une biopsie de ganglion d'un homosexuel présentant un gonflement ganglionnaire, biopsie que Françoise Brun, de l'hôpital Claude-Bernard également, porta à l'Institut Pasteur.

L'équipe qui se mit au travail à l'Institut Pasteur appartenait à deux laboratoires : celui de Jean-Claude Chermann, dans lequel travaillait Françoise Barré-Sinoussi et qui était expert en rétrovirus, et celui de Luc Montagnier. Ce dernier était directeur de l'unité d'Oncologie virale à laquelle appartenait le laboratoire de Chermann. Montagnier réceptionna la biopsie et mit les cellules en culture. Barré et Chermann décelèrent très vite dans le surnageant de la culture une activité transcriptase inverse, l'enzyme caractéristique d'un rétrovirus.

Une équipe s'associa alors pour mener des recherches virologiques, sérologiques et épidémiologiques qui débouchèrent sur un premier article publié à une vitesse record dans *Science* (F. Barré-Sinoussi *et al.*, « Isolation of a T-Lymphotropic Retrovirus from a Patient at Risk for Acquired Immune Deficiency Syndrome (AIDS) », *Science*, 20 mai 1983, p. 868-871), suivi de plusieurs communications et publications en 1983 et 1984. Le nouveau virus fut appelé LAV (Lymphadenopathy Associated Virus) en juillet 1983. L'équipe qui travailla sur le LAV dès 1983 comprenait les trois pastoriens et six chercheurs et cliniciens des hôpitaux. Deux de ces chercheurs hospitaliers, Françoise Brun et Christine Rouzioux, mirent au point le test de dépistage du virus (un test ELISA qui détecte la présence d'anticorps), produit et commercialisé par Diagnostics Pasteur, filiale de l'Institut Pasteur et de Sanofi. Cette équipe du LAV n'avait été rassemblée par aucune autorité ou institution, mais par une volonté partagée de comprendre l'étiologie du sida. Elle éclata rapidement après la publication des premiers articles sur le LAV.

Aux États-Unis, Robert Gallo avait été convaincu début 1982 par les CDC de se tourner vers le sida. Il chercha un virus proche du HTLV qu'il avait découvert et piétina car le comportement biologique du virus du sida était très différent. Des Parisiens peu connus ou inconnus annonçaient pendant ce temps dans les congrès qu'ils avaient isolé un virus « candidat » à la cause du sida en s'appuyant sur des résultats qui étaient loin d'avoir une force suffisante pour emporter la conviction des sceptiques. Gallo critiqua violemment une prétention si peu étayée.

Succès et polémiques scientifiques

À l'automne 1983 le laboratoire de Gallo changea d'approche, notamment à la suite des premiers résultats communiqués sur le LAV et identifia un nouveau virus qu'il appela HTLV-III. L'abondance de virus que son laboratoire parvenait à produire, abondance qui faisait défaut à l'équipe du LAV, permit d'accumuler les résultats. Le secrétaire d'Etat à la santé américain

organisa le 23 avril 1984 une bruyante conférence de presse pour annoncer au monde que les Instituts nationaux de la santé avaient isolé le virus du sida. La ministre rendit hommage « aux travaux de l'équipe pastorienne », mais un hommage discret et ce fut le début d'une bataille transatlantique acharnée et pas toujours loyale pour s'attribuer le mérite de l'élucidation de la cause du sida.

Les travaux de Gallo furent publiés sous forme de quatre articles, fait unique dans la littérature scientifique, parus dans *Science* du 4 mai 1984. La grande majorité de la communauté scientifique fut convaincue que le HTLV-III était la cause du sida... et, du même coup, que le LAV l'était aussi, tellement il était patent qu'il s'agissait du même virus. La querelle dite Gallo-Montagnier - celui-ci étant généralement le représentant de l'équipe du LAV dans les congrès - commença à l'automne 1983 prit une ampleur jamais vue dans l'histoire de la médecine. Elle envahit les réunions scientifiques et les journaux grand public. L'équipe parisienne, en fait désormais surtout les pastoriens, bataillait pour faire valoir sa contribution.

Un comité international mit fin en mai 1986 à la confusion des noms. Le virus du sida fut baptisé HIV (Human Immunodeficiency Virus) avec une dénomination officielle française, VIH (Virus de l'Immunodéficience Humaine). La virologie adoptait, autre première, les usages de la diplomatie internationale. « Le sida est la première maladie infectieuse dont le titre a été apposé par l'immunologie. Lorsque le virus a été identifié, la maladie n'a pas adopté son nom, c'est le virus qui a pris le sien » (A.M. Moulin, *Le dernier langage de la médecine*, Paris, PUF, 1991). La maladie avait, elle, été baptisée par l'épidémiologie.

Des polémiques franco-américaines uniques dans les annales de la médecine

Les controverses sur l'isolement du VIH ont duré dix ans. Des querelles relevant de trois registres différents se sont succédé et parfois recoupées, querelles dont les enjeux étaient le plus souvent politiques et personnels.

La première rivalité fut scientifique et cantonnée au monde de la recherche, mais relayée par les médias. Ouverte à l'automne 1983, on peut la clore en 1986 avec le baptême consensuel du HIV/VIH. Le deuxième conflit fut juridique et financier. Il débuta au cours de l'été 1985 et porta sur le brevet sur les tests de dépistage.

Le bureau de la Propriété industrielle américain délivra le 28 mai 1985 un brevet à l'Institut national du cancer (NCI) où travaillait Gallo, tandis que l'Institut Pasteur n'avait aucune nouvelle de son propre dossier, déposé quatre mois plus tôt. Le conflit se situa immédiatement au niveau gouvernemental des deux côtés de l'Atlantique. L'Institut Pasteur et les inventeurs du brevet français voulaient faire reconnaître leur propriété intellectuelle sur le processus de fabrication du kit de dépistage. Les médias présentèrent l'affaire

comme une querelle sur la paternité du virus, plus noble qu'une histoire d'argent. Le dossier était en fait juridiquement plus complexe que ne le laisse supposer une simple comparaison des dates de dépôt des brevets. Un accord reprenant une proposition de l'Institut Pasteur d'août 1985 fut finalement signé solennellement le 31 mars 1987 par le président Reagan et le Premier ministre Chirac au nom du NCI et de l'Institut Pasteur, après que la mobilisation d'avocats et des médias ait créé des plaies difficiles à refermer.

Après deux années d'accalmie, le journaliste John Crewdson, du *Chicago Tribune*, ouvrit la troisième période de polémiques. Crewdson s'était procuré le dossier des avocats américains de l'Institut Pasteur, avait rencontré des dizaines de scientifiques et recueilli une moisson de griefs contre Gallo. L'article, qui accusait implicitement celui-ci d'avoir utilisé le LAV puis de l'avoir présenté comme sa propre découverte, eut un retentissement considérable.

Le journaliste s'allia à un représentant démocrate, John Dingell, président de la plus puissante commission du Congrès. Dingell dénonça des collusions dans l'administration républicaine, de la manière qu'on aime au pays des chasses aux sorcières. En France, le ministre de la Recherche Hubert Curien vola au secours de la science française flouée, voire volée, par Gallo, une façon indirecte pour la gauche revenue depuis peu au pouvoir de vilipender Chirac, ouvrier de l'accord franco-américain de 1987. Reprenant les positions du gouvernement français, *Le Monde* écrivit : « Il appartient au Pr. Gallo de démontrer qu'il n'y a pas eu fraude » (F. Nouchi, 24 mars 1990). Luc Montagnier se manifesta, tandis que l'Institut Pasteur, pourtant premier intéressé à un repartage des redevances du test, restait d'abord en retrait. L'Institut savait que rien ne remettait l'accord en cause et ne se sentait pas concerné par les jeux politiques et les ambitions personnelles qui se déchaînaient par-dessus l'océan.

L'attitude de l'Institut Pasteur changea avec la mise en évidence en 1991 qu'une série de contaminations s'était produite en 1983 dans le laboratoire de Chermann, celui de Gallo et d'autres. Plusieurs équipes travaillaient depuis huit ans sans le savoir avec une souche de virus très contaminante, appelée LAI, qui provenait d'un malade de Willy Rozenbaum et avait été isolée à l'Institut Pasteur en 1983. Or, cette souche avait été utilisée pour la production du test américain. L'Institut Pasteur demanda alors et obtint en 1994 un repartage des redevances (le NCI et l'Institut Pasteur touchent désormais une part équivalente, soit environ 13 millions de francs annuels).

Ce nouvel arrangement intervint entre deux changements politiques : le retour de la droite au gouvernement en France en mars 1993, et l'élection d'un Congrès à majorité républicaine aux États-Unis en novembre 1994. Les polémiques s'éteignirent. En décembre 1993 un tribunal administratif américain disqualifia Robert Gallo des accusations de fraude et dissimulation portées contre lui.

Le sang contaminé : le système de santé français ébranlé

Le scandale du sang contaminé aurait-il pris une telle ampleur et si profondément ébranlé le système de santé français si le mal transmis n'avait pas été le sida ? Probablement non. Les fonctionnaires, médecins et conseillers ministériels mis en cause se défendent d'ailleurs en décrivant des « dysfonctionnements » regrettables mais chroniques du système de santé français.

La froideur bureaucratique du compte rendu d'un comité interministériel tenu le 9 mai 1985 est révélatrice : « Les cas de sida transfusionnels sont somme toute assez rares. [...] Sur 4 millions de dons [annuels], on trouverait entre 2 000 et 10 000 personnes séropositives. Au moins 80 % des personnes séropositives ne seront pas atteintes par la maladie. » Mais les vingt autres pour cent (ce qui était très sous-estimé même avec les connaissances de l'époque) mourraient. Le comité décida de bloquer le test de dépistage de la société américaine Abbott, commercialisé depuis le 3 mars aux États-Unis, le temps pour Diagnostics Pasteur de rattraper son retard. Le test issu des travaux de Robert Gallo ne serait pas vendu en France avant celui de Diagnostics Pasteur.

La justice a tranché et condamné les anciens responsables du Centre national de transfusion sanguine pour avoir distribué aux hémophiles jusqu'à l'automne 1985 des produits contaminés par le VIH. Cohérence tragique : les responsables de la santé qui minimisaient les risques transfusionnels afin de justifier le retard du dépistage du virus dans les centres de transfusion ne firent rien pour interdire au Centre national de transfusion sanguine de fournir des préparations contaminées.

Le scandale de la contamination des hémophiles est devenu en 1991 une question politique majeure. Des médecins, une administration, des ministères chargés de dispenser la santé avaient distribué la mort. Par la maladie la plus terrifiante du moment. Le système de santé français en fut profondément ébranlé. Il ne s'agissait pas seulement d'une indignation momentanée. Quelques centaines de médecins, scientifiques et lauréats du prix Nobel s'en aperçurent quand ils publièrent une pétition de soutien à leurs pairs condamnés. La démarche eut un résultat inverse de celui escompté. Les temps avaient changé. L'aura des savants s'était estompée et des citoyens plus méfiants exigeaient une sécurité sanitaire.

L'affaire du sang contaminé fut à l'origine d'une refonte partielle du droit et du système de santé. « C'est un cas unique dans l'histoire, qu'un phénomène isolé, aussi précis et circonscrit que le fut la contamination par le virus du sida, ait donné lieu à une telle production de droit » (M.-A. Hermitte, *Le Sang et le Droit*, Paris, Le Seuil, 1996). Une Agence française des médicaments fut créée, la transfusion réorganisée sous la houlette de l'Agence française du sang, l'Établissement français des greffes organisé pour contrôler les prélèvements et greffes d'organes.

Un gigantesque effort de recherche

Aucun domaine de la recherche médicale n'a disposé d'autant d'argent que le sida pour ses programmes de recherche. Selon la base de données sur les articles scientifiques Medline, de 1993 à 1995, 23 000 publications ont été consacrées chaque année au cancer, concept qui regroupe différentes pathologies, contre 14 000 au sida et au VIH. Après les années d'indifférence, les politiques ne veulent pas encourir le risque d'être accusés de ne pas faire assez. « Le sida est devenu un thème porteur » jugent des militants associatifs (« Sida : où vont les associations ? », *Le Monde*, 1^{er} déc. 1995). Quinze ans après son isolement, le VIH et ses interactions avec l'organisme sont les mieux connus de toute la virologie. Jamais la place laissée à l'empirisme n'a été aussi restreinte que dans la recherche d'un vaccin contre le VIH, ce qui préfigure la vaccinologie des décennies à venir.

Dans aucun autre domaine scientifique la notoriété des chercheurs n'a dépendu et ne dépend autant des jeux politiques et des médias. Et notoriété signifie pouvoir et crédits. Jusqu'alors on attendait la fin d'essais cliniques pour annoncer dans la presse des résultats positifs. Avec le sida, le lancement d'un essai suffit aux spéculations publiques.

Luc Montagnier illustre le décalage entre popularité et apport scientifique. Il est devenu le plus célèbre chercheur vivant de notre pays, devant les lauréats du prix Nobel, ce que ni ses découvertes sur le sida, ni son rôle dans l'équipe qui isola le VIH ne laissaient présager. « La découverte rapide d'un virus est un événement normal. C'est la conséquence d'une situation technique » a estimé Jean-Paul Lévy, directeur de l'ANRS, à propos de l'isolement du VIH, dont Montagnier ne fut qu'un acteur (colloque organisé par l'IFREM le 13 juin 1994).

On peut certainement étendre à l'échelle internationale le satisfecit accordé aux médias par l'ancien Surgeon General américain Everett Koop : « J'ai souvent noté que la presse accomplissait un travail remarquable et louable sur les questions touchant au sida » (E. Koop, « The Early Days of AIDS », *AIDS and the Public Debate*). Les journalistes font, dans l'ensemble, fort bien leur travail en ce qui concerne le sida. Mais avec les limites imposées par le vedettariat.

Un rôle unique des associations de malades

De multiples associations se sont créées autour du sida dans les pays industrialisés, certaines généralistes, d'autres spécialisées dans le soutien aux malades ou à des catégories particulières, d'autres se consacrant à la prévention, d'autres enfin diffusant l'information scientifique. C'est, là encore, un phénomène nouveau, qui prit naissance dans la communauté homosexuelle et s'étendit à mesure que l'épidémie se répandait dans l'ensemble de la population. On peut bien sûr se demander « pourquoi le corps social continue de déléguer la gestion d'une épidémie qui concerne tout le

monde à une minorité agissante » (« Sida : où vont les associations ? »).

Les associations ont contribué à bouleverser le rapport malade-médecin et forcé ce dernier à la modestie. Elles ont interpellé les chercheurs, les cliniciens et les sociétés pharmaceutiques sur la conduite des essais cliniques, imposant une révision du dogme du placebo. Elles ont imposé leur présence dans les organismes chargés de la recherche sur le sida.

Peut-être les scientifiques, les médecins et les institutions médicales retrouveront-ils une autorité émoussée lorsqu'ils auront démontré leur efficacité contre le VIH et le sida, mais rien ne sera sans doute jamais comme avant. Le sida a, là encore, servi de révélateur à de profondes transformations sociales. Il a durablement changé la donne entre malades, médias, pouvoir, science et médecine.

► CASTERET A.-M., *L'Affaire du sang*, Paris, La Découverte, 1992. — FEE E. & FOX D. et al., *AIDS, the Making of a Chronic Disease*, Berkeley, Univ. of California Press, 1992. — HANNAWAY C. et al., *AIDS and the Public Debate*, Amsterdam, IOS Press, 1995. — POLLAK M., *Les Homosexuels et le sida*, Paris, Métailié, 1988. — SEYTRÉ B., *Sida : les secrets d'une polémique*, Paris, PUF « Science, histoire et société », 1993 ; *Histoire de la recherche sur le sida*, Paris, PUF « Que sais-je ? », 1995.

Bernard SEYTRÉ

→ Immunologie ; Institut Pasteur ; Rétrovirus.

SIMONDON Gilbert, 1924-1989

Philosophe français, né à Saint-Étienne. Admis à l'École normale supérieure de la rue d'Ulm en 1944, il est reçu à l'agrégation de philosophie en 1948. Enseignant la philosophie mais aussi la physique au lycée Descartes de Tours de 1948 à 1955, il devient Docteur en philosophie en 1958, sous la direction de Georges Canguilhem. Après un passage à la Faculté des Lettres de Poitiers, il est nommé à la Sorbonne en 1963 et y dirige le laboratoire de psychologie. Il décède en 1989, la semaine même où paraît ce qui, de sa Thèse principale, était resté inédit.

Les ouvrages de Simondon ici pris en compte seront *L'individu et sa genèse physico-biologique* (Paris, PUF, 1964 et Grenoble, Éditions J. Millon, 1995) et *L'individuation psychique et collective* (Paris, Aubier, 1989), tous deux issus de sa thèse principale, ainsi que son déjà classique *Du mode d'existence des objets techniques* (Paris, Aubier, 1958), qui constitue sa thèse complémentaire. La redécouverte actuelle, par un nombre croissant de philosophes, des intuitions qui traversent les Thèses principale et complémentaire de Simondon incite à une telle vue d'ensemble. Par ailleurs seule une vue conforme à l'esprit encyclopédiste de Simondon se révèle capable de déjouer les pièges interprétatifs et de préparer la restauration de la cohérence d'une œuvre manifestement inspirée mais obscure, voire même traversée de tensions internes.

Individuation versus hylémorphisme, ou le fil directeur de l'ensemble de l'œuvre

La philosophie de la nature de Simondon se construit contre une tradition philosophique occidentale qu'il nomme « hylémorphisme ». Simondon applique en effet cette appellation à l'ensemble des doctrines de Platon à Bergson, même s'il hérite lui-même prioritairement de Bergson, auquel il s'arrête d'ailleurs historiquement pour ce qui concerne les occurrences des noms propres. La théorie kantienne de la connaissance, qui distingue une « matière » *a posteriori* et des « formes » *a priori* de la connaissance, est alors pour lui le « retentissement épistémologique » d'un hylémorphisme dissimulé parce que transposé. En termes ontologiques et non plus gnoséologiques, Simondon, dans la lignée de Bergson précisément, reproche à Kant de rendre le processus de connaissance indépendant du devenir de ce dont il est la connaissance. Il revient à la philosophie de la nature, comprise comme philosophie du devenir, de penser les conditions de possibilité de la connaissance, lesquelles ne sont autres que « les conditions d'existence » du sujet en tant qu'il est désormais considéré dans sa genèse.

L'opposition à l'hylémorphisme commande non seulement la philosophie de la nature et la philosophie de la connaissance de Simondon, mais aussi sa philosophie de la technique. Celle-ci consiste en effet principalement à ne plus penser l'objet technique à partir de son usage pour le travail humain, et donc à contester une conception « anthropologique » de la technique qui est encore une conception hylémorphique : ce sont les rapports de travail qui conduisent à penser l'opération technique de « prise de forme » à partir du schéma hylémorphique de l'union d'une matière et d'une forme naïvement préexistantes. Cette analyse « herméneutique » de l'hylémorphisme par Simondon fait le lien entre sa philosophie de la nature, dont elle ouvre le propos – Chapitre Premier de *L'individu et sa genèse physico-biologique* –, et sa philosophie de la technique, dont elle clôt le propos – Conclusion de *Du mode d'existence des objets techniques*.

À l'hylémorphisme polymorphe et parfois implicite de la tradition philosophique occidentale, Simondon oppose une *individuation* universelle comprise comme genèse radicale de tout ce qui est. Ainsi la philosophie de la nature de la Thèse principale est-elle une ontologie génétique qui revisite le concept d'individuation : ce concept ne désigne plus la différenciation d'une unité au sein d'un champ perceptif, ni même l'individuation différenciatrice des êtres dans une problématique ontologique et non plus phénoménologique, mais la genèse même de ces êtres, l'individuation étant alors l'individuation propre au vivant en tant que genèse *permanente*. L'hylémorphisme et le substantialisme ne peuvent ici être renversés qu'en postulant l'existence d'une réalité originelle radicalement « pré-individuelle » ou irréductible à la logique de l'identité et du tiers exclu, et c'est en ce point que l'ontologie génétique mobilise les « schèmes physiques » de la

métastabilité thermodynamique et de la dualité quantique onde-corpuscule, qui tous deux sont lus par Simondon comme suggérant l'idée d'un « potentiel réel », c'est-à-dire d'un potentiel dont la non-actualité n'est pas pour autant simple possibilité.

Les « régimes » de l'être : physique, vital, transindividuel

Cette ontologie génétique se construit prioritairement par-delà les alternatives opposant, d'une part le mécanisme au vitalisme dans la pensée du vivant, d'autre part le psychologisme au sociologisme dans la pensée du devenir – « transindividuel » – ou psychosocial – de ce vivant. La pensée du vivant, essentiellement développée dans *L'individu et sa genèse physico-biologique*, obéit à une paradoxale *dérivation anti-réductionniste* des « régimes d'individuation », pour laquelle sont mobilisées notamment les notions de polarisation – issue du grand livre sur *Le normal et le pathologique* (1943) de son directeur de thèse Georges Canguilhem – et de cristallisation – issue de Teilhard de Chardin, premier penseur explicite non seulement de la « Complexité » mais aussi de l'« Individuation » dans un contexte cosmogénétique (*La place de l'homme dans la nature*, 1956) –, cette dernière opération étant un paradigme déterminé selon une « double centralité » et dans sa différence d'avec le cristal comme structure.

Le devenir-transindividuel du vivant, lui, est l'objet de *L'individuation psychique et collective*, ouvrage dont les tensions internes ne trouvent leur solution que dans une articulation conceptuelle complexe, restée simplement suggérée par Simondon : est dit « sujet » le « psychique pur », non en vertu d'une différence illusoire avec le vivant, mais parce qu'il s'oppose au « psycho-social » du transindividuel, le « sujet » étant justement produit par l'individuation du vivant en tant que dédoublement psycho-somatique. Cette « individuation intérieure » du vivant est création d'un potentiel préindividuel affectif, qui définit le sujet comme « ensemble individu-préindividuel », et dont ce que Simondon nomme l'« émotion » constitue le seuil d'actualisation transindividuelle avec préalable désindividuation provisoire. Dès lors la « personnalité » est chez Simondon ce qui prolonge le « sujet » dans le « collectif » ainsi institué. Par là-même, Simondon entend prolonger-dépasser la pensée des psychosociologues américains comme Kardiner, exposée brillamment par son ami phénoménologue Mikel Dufrenne dans son ouvrage *La personnalité de base* (1953).

La connaissance et la technique

L'appel à des « schèmes physiques » pour l'élaboration de l'ontologie génétique est consolidé, dans *L'individu et sa genèse physico-biologique*, par une épistémologie héritée de Bachelard et nommée « réalisme des relations ». La relation y a « valeur d'être », parce que selon la formule bachelardienne, elle est « contemporaine de l'être » et non pas rapport entre des

termes préexistants. À la suite de l'ouvrage de Bachelard sur *La valeur inductive de la relativité* (1929), Simondon attribue à la relativité einsteinienne une valeur constitutive pour l'ontologie philosophique anti-substantialiste. Cependant, à la différence de Bachelard, il distingue analogie *structurelle* et analogie *opératoire*, appliquant celle-ci au rapport entre philosophie et physique quantique. Cette dernière, par là distinguée de la relativité einsteinienne quant à son rôle pour la philosophie, est ainsi paradigme *méthodologique* pour penser l'individuation comme *transduction*, la transduction dans le domaine mental étant justement analogie opératoire inventive et individuante. C'est en quoi Simondon, par ailleurs, n'est pas aussi complètement tributaire qu'on l'a prétendu de la « théorie de la double solution » de Louis de Broglie dans son débat avec Niels Bohr, d'ailleurs lui aussi penseur de l'analogie.

Enfin, la pensée simondonienne de la technique prolonge certes cette épistémologie, dans la mesure où l'instrument de connaissance y sera l'objet technique « concrétisé » par excellence. Mais cette pensée de la technique, dont il a été signalé qu'elle est par ailleurs liée à la philosophie de la nature par le biais de l'herméneutique de l'hylémorphisme de la thèse principale, possède pour priorité propre la subversion de l'opposition entre humanisme et technicisme. *Du mode d'existence des objets techniques* pense la technicité comme une « phase » – non temporelle au sens où le temps serait une *succession* – du devenir humain, et le progrès technique comme un processus d'*individualisation* fondé sur une « concrétisation » en laquelle se révèle que l'objet technique est le « support » d'une relation qui est le « modèle de la transindividualité ». L'*aliénation* fondamentale est dès lors redéfinie comme ignorance, par la culture, d'une part de ses propres conditions techniques, d'autre part du caractère aliénant *en soi* du travail, défini comme attribution à l'homme du rôle de « porteur d'outils », c'est-à-dire du rôle d'individu technique *qui revient à la machine*. Le problème du machinisme, aliénation moderne de l'ouvrier, ne possède pas pour solution la disparition des machines, mais leur « libération », qui est aussi *accession* de l'ouvrier à la fonction de *mécanologue*.

Points d'actualité de l'Encyclopédisme génétique

Tels sont les points généraux des philosophies de la nature, de la connaissance et de la technique proposées par les Thèses principale et complémentaire de Simondon. Compte tenu de l'esprit et de la démarche de Simondon, on peut nommer « Encyclopédisme génétique » cet ensemble. Or, les points généraux ici rappelés embrassent par ailleurs des discussions plus locales mais aussi des intuitions particulièrement réactualisables sur des points variés, dont nous n'indiquerons ici que les plus travaillées aujourd'hui :

1. La distinction entre pré-individualité pré-logique et non-unité dialectique. 2. La redéfinition de l'information, par-delà l'interrogation de Raymond Ruyer

dans *La cybernétique et l'origine de l'information* (1952), comme « transduction » individuante et auto-complexifiable, donc universelle, et son possible lien avec les étranges probabilités quantiques. 3. La différence entre d'une part la potentielle « relativité philosophique » simondonienne, de type systémiste, et d'autre part le « relativisme » de Kuhn. 4. L'interprétation du quantum d'action de la physique quantique comme discontinuité relationnelle et non pas granulaire, et les mots d'ordre afférents révélant une anticipation intuitive de l'idée de « relativité physique d'échelle » telle qu'elle est aujourd'hui développée par Laurent Nottale, précisément en conformité avec la doctrine du réalisme des relations. 5. La possibilité de retourner la pensée non anthropologique de la technique fournie par Simondon contre la pensée – dite également non-anthropologique – de la technique proposée par Heidegger.

« Du mode d'existence des objets techniques. Paris, Aubier, 1958 (réédité depuis). – *L'individu et sa genèse physico-biologique*. Paris, PUF, 1964, réédition complétée aux Éditions Millon, 1995. – *L'individuation psychique et collective*, Paris, Aubier, 1989.

► BARTHÉLÉMY J.-H., *Penser l'individuation*. Paris, L'Harmattan, 2005 – Bibliothèque du Collège international de philosophie, *Simondon, une pensée de l'individuation et de la technique*, Paris, Albin Michel, 1994. – COMBES M., *Simondon, individu et collectivité*, Paris, PUF, 1999. – ROUX J. (dir.), *Simondon, une pensée opérative*, Publications de l'Université de Saint-Étienne, 2002.

Jean-Hugues BARTHÉLÉMY

→ Analogie ; Bachelard ; Bergsonisme ; Canguilhem ; Complémentarité (physique) ; Complexité ; Heidegger et la question de la technique ; Information (biologie) ; Information et codage ; Kant ; Kuhn ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Paradigme ; Système ; Technique ; Teilhard de Chardin ; Vitalisme et mécanisme.

SINGULARITÉ MATHÉMATIQUES

Le mot « singularité » signifie quelque chose d'étrange ou de différent. En mathématiques c'est également le cas. Les singularités d'une courbe dans le plan, lieu de zéros d'une fonction f , sont des points où f et ses dérivées s'annulent. Si f est polynomiale, les singularités forment un ensemble fini. Une singularité est ainsi un point étrange mais remarquable parmi des points non singuliers anonymes. Des courbes à singularités étaient connues des mathématiciens de l'École d'Alexandrie, qui envisageaient d'autres courbes que celles constructibles à la règle et au compas, en contraste avec les Grecs classiques. Vers 180 avant J.-C., Nicomède a construit de façon mécanique une famille de courbes à singularités, appelées conchoïdes, ayant un point double qui dégénère en cusp et disparaît en variant les paramètres, et Dioclès a décrit géométriquement une courbe à singularité

cuspidale, la cissoïde, pour résoudre un problème posé par l'oracle de Delos : la duplication du cube. Les astronomes Hipparque (180-125 avant J.-C.) et Ptolémée (~ 150) utilisaient les épicycles pour décrire les trajectoires des planètes. La cycloïde (ou roulette), qui est un épicycle, a été étudiée par Galilée, et par Descartes, Huygens, Pascal, Roberval et Wren au XVI^e s. Pour l'obtenir on roule un cercle sur une droite dans le plan, et on suit le trajet d'un point donné de la circonférence du cercle. On trouve une infinité de singularités cuspidales à distance égale sur la droite.

Le XVII^e s. vit le début de l'étude générale des courbes algébriques planes, proposée indépendamment par Pierre de Fermat, et René Descartes. Descartes publia sa théorie de courbes algébriques dans « La Géométrie », en appendice à son *Discours de la Méthode* (1637) : les méthodes algébriques étaient considérées comme un aspect de sa vision rationaliste. L'étude des singularités des courbes devenait naturelle, et fut entreprise notamment par Isaac Newton, qui a classifié les courbes cubiques, et par Christiaan Huygens dans son analyse des caustiques, enveloppes des normales à une courbe de réflexion optique. Certaines techniques de Newton sont utilisées dans la recherche actuelle, tel le polyèdre de Newton. Au XVIII^e s. MacLaurin (1720), Euler (1748) et Cramer (1750) ont écrit des livres encyclopédiques présentant des calculs systématiques des singularités de courbes d'ordre supérieur.

Singularités d'espaces complexes

Au XIX^e s., avec les nouvelles méthodes de géométrie projective (Monge et Poncelet) et le nouvel outil des nombres complexes assurant que tout polynôme de degré n possède n racines (théorème de D'Alembert), la classification des singularités de courbes complexes a commencé. Vers 1835, Julius Plücker (1801-1868) démontrait des formules reliant l'ordre, la classe et le nombre des types de singularités (points doubles, cusps, tangentes d'inflexion et bitangentes) des courbes algébriques projectives. D'autres formules pour des courbes planes furent trouvées par A. Clebsch, G.-H. Halphen, M. Noether et H.J.S. Smith. Des formules pour des courbes dans l'espace de dimension 3 sont dues à A. Cayley (1845), et en dimension quelconque à G. Veronese (1882). Vers 1870, G. Salmon, Cayley, H. Zeuthen, et Noether ont donné des formules pour des singularités de surfaces. En 1850 Victor Puiseux, étendant une méthode proposée par Newton dans *Méthode des Fluxions* (1671), a précisé les séries définissant les branches d'une courbe algébrique près d'une singularité ; ces séries de Puiseux sont fondamentales dans la recherche actuelle.

Suite au programme de Hilbert et aux progrès de l'algèbre commutative au XX^e s., une théorie algébrique des singularités de variétés algébriques complexes a été développée par Oscar Zariski (1899-1986), qui a proposé une théorie d'équisingularité (1971, *Bull. Amer. Math. Soc.*, 77, p. 481-491). Il s'agit de comparer des

notions précisant quand deux singularités sont « les mêmes ». Le concept de stratification (dû à Whitney et Thom) est devenu central : on décompose une variété algébrique en variétés lisses, définies par des invariants algébriques, près desquelles la topologie reste localement constante. L'école française d'équisingularité, menée par Bernard Teissier et Lê Dũng Tráng, est devenue très influente.

Un théorème important est la « résolution des singularités » de Heisuke Hironaka (1964, *Annals of Mathematics*, 79, p. 109-326) : toute variété algébrique singulière est l'image d'une variété lisse par une application algébrique. Ce théorème profond est d'une grande utilité dans l'étude des espaces singuliers, mais à cause de la difficulté et la longueur de sa preuve certains mathématiciens préfèrent ne pas l'utiliser. Ceci correspond à un choix philosophique : les uns utilisent dans leurs travaux seulement les résultats qu'ils savent démontrer, d'autres acceptent d'utiliser des énoncés qu'ils n'ont pas vérifiés. Ce problème a mené Stanislaw Lojasiewicz et ses élèves de Cracovie à redémontrer par des méthodes « élémentaires » les résultats de géométrie analytique réelle qui découlent du théorème de résolution. Depuis 1990, des preuves simplifiées des résultats d'Hironaka sont parues, rendant son théorème plus accessible.

En 1965, Egbert Brieskorn a fait la découverte étonnante que certaines équations simples définissent un ensemble de zéros complexes dont l'intersection avec une sphère autour d'une singularité est une des sphères « exotiques » de John Milnor (1956) – topologiquement une sphère mais avec une autre structure différentiable. En 1968, pour bien comprendre ce phénomène, Milnor a écrit un livre sur les singularités des hypersurfaces complexes, lançant une théorie d'une grande richesse en interaction avec de nombreux domaines mathématiques.

Singularités des applications différentiables

Avec le développement de la notion de variété différentiable on a commencé à étudier des fonctions définies sur une variété. Une singularité d'une fonction est un point où ses dérivées s'annulent. Une fonction n'ayant que des singularités non dégénérées (localement $f(x) = S \pm x_i^2$) est dite une « fonction de Morse », après Marston Morse (1892-1977) qui étudiait leur structure topologique. Une telle fonction est stable (après une petite déformation, on trouve une fonction équivalente). Elles forment un ensemble dense dans l'espace des fonctions : la propriété d'être de Morse est générique. Une singularité d'une application différentiable $R^n \rightarrow R^k$ est un point où la dérivée n'est pas de rang maximal. En 1955, Hassler Whitney (1907-1989) démontrait que pour les applications différentiables du plan dans le plan il n'y a que deux types de singularités stables, le pli et la fronce, et la propriété de n'avoir que ces singularités est générique. En 1956, René Thom proposa une théorie des singularités des applications différentiables entre deux variétés. Il

insiste sur les notions de généricité et stabilité, définit et utilise la transversalité, et étudie l'homologie des ensembles critiques pour obtenir des invariants topologiques globaux.

Suivant les traces de Thom, Bernard Morin (1965) et Vladimir Arnol'd ont poursuivi la classification des singularités d'applications, Arnol'd effectuant des calculs prodigieux dans une série d'articles de 1968 à 1984. Avec ses élèves à Moscou, il a obtenu un ensemble impressionnant de résultats, utilisant la théorie des singularités pour généraliser les caustiques de Huygens et Newton, ainsi que la mathématique de la mécanique de Lagrange. Ils donnent des listes des types de singularités diverses, par exemple les singularités des fonctions, et les projections génériques de surfaces.

Des travaux de John Mather (1967-1976) résolvent un problème posé par Thom en précisant les dimensions pour lesquelles presque toute application lisse est différentiablement stable. Mather démontre aussi que presque toute application est topologiquement stable en toutes dimensions. Pour ceci il donne une version rigoureuse de la théorie des ensembles et morphismes stratifiés de Thom (1969), démontrant en particulier que la topologie locale reste constante sur les strates d'une stratification de Whitney (1965). Les recherches de Mather ont été prolongées, notamment aux États-Unis d'Amérique, en Angleterre, et au Japon.

Théorie des catastrophes

Les travaux de Thom étaient influencés à partir de 1960 par l'idée de la modélisation topologique en embryologie. Thom a créé la théorie des déploiements universels et conjecturé le théorème de préparation, démontrée vers 1963 par Bernard Malgrange, pour montrer que pour des fonctions de potentiel ayant au plus 4 variables de contrôle (comme l'espace-temps), il est générique que tout changement de comportement stable soit parmi 7 types, à difféomorphisme près. Les jets d'applications différentiables dont les orbites par le groupe de difféomorphismes sont de codimension donnée forment une variété algébrique, naturellement stratifiée. Il y a un nombre fini d'orbites de codimension au plus 5 : ce phénomène donna lieu aux 11 catastrophes élémentaires.

Thom exposait sa théorie dans *Stabilité structurelle et morphogénèse. Essai d'une théorie générale des modèles* (1973) où se trouve l'esquisse d'une théorie des singularités des fonctions de potentiel utilisée pour analyser la morphogénèse, les « discontinuités dans l'apparence des phénomènes ». Il y a le début d'une classification de ces changements de forme, appelés catastrophes. Thom donne des applications en embryologie, et il propose des modèles en linguistique. Selon Thom : « C'est sans doute sur le plan philosophique que nos modèles présentent l'apport immédiat le plus intéressant. » Le topologue Christopher Zeeman a proposé des applications de la « théorie des catastrophes » en physique, biologie, psychologie, sociologie et économie.

Des spécialistes de ces disciplines et d'autres ont proposé d'autres applications. Après une période pendant laquelle on n'était pas très sûr des limites d'applicabilité de la théorie, des scientifiques « positivistes » ont mis en cause la capacité prédictive de certains modèles en sociologie et biologie. Les applications à la mécanique et en physique et chimie ont été acceptées : la théorie des singularités a ainsi enrichi la théorie des bifurcations. En économie mathématique les méthodes de la théorie des singularités sont devenues classiques. En biologie théorique, Thom a poursuivi ses idées, proposant sa théorie mathématique des ensembles stratifiés pour définir l'organisation biologique, et analysant le fonctionnement des êtres vivants. En linguistique (notamment par Jean Petitot) et en sémiotique, les idées de Thom ont également pris racine.

Pour Thom (1972), la théorie des catastrophes est vraisemblablement le premier essai cohérent, depuis la logique d'Aristote, d'une théorie de l'analogie. Aux scientifiques positivistes qui objectent que la théorie des catastrophes ne donne que des analogies ou des métaphores, il dit que c'est précisément là le but de la théorie : de classer tout les types possibles de situations analogues. Pour lui, « réduire l'arbitraire de la description est la vraie définition de l'explication scientifique ». À propos de la philosophie de la singularité, Thom remarque que des singularités sont présentes dans toute observation visuelle – le contour d'un objet devient ensemble de singularités d'une projection sur une surface (la rétine). Une « singularité apparaît [...] comme un obstacle [...] s'opposant à la propagation d'un processus spatial ». Elle est un « générateur local des formes ». L'étude des singularités est donc capitale pour comprendre les formes et leur genèse.

D'autres « singularités » sont étudiées, par exemple les singularités des champs de vecteurs, ou des surfaces minimales. Hawking a défini une variété riemannienne sans singularité : toute courbe différentiable de longueur finie a un point final. Sinon on a des singularités. Un trou noir serait un obstacle à l'observation de la singularité qu'il contient. Et le point initial de l'univers (dans le temps) serait une singularité. L'existence de ces singularités reste un thème de débat.

► ARNOLD V.I., GUSEIN-ZADÉ S.M. & VARCHENKO A.N., *Singularités des applications différentiables*, Moscou, Mir, 1986. – ARNOLD V.I., *Catastrophe theory*, Berlin, Springer-Verlag, 1992. – HAWKING S. & ELLIS G.F.R., *The large scale structure of space-time*, Cambridge Univ. Press, 1973. – MILNOR J.W., *Singular points of complex hypersurfaces*, Princeton Univ. Press, Annals of Mathematics Studies, 1968. – THOM R., *Stabilité structurelle et morphogénèse*, New York, Benjamin, 1973 ; *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Paris, Christian Bourgeois, 1980 ; *Apologie du logos*, Paris, Hachette « Histoire et philosophie des sciences », 1990. – ZEEMAN E.C., *Catastrophe Theory. Selected Papers, 1972-1977*, Reading (Mass.), Addison-Wesley, 1977.

David TROTMAN

→ Géométries ; Topologie.

SMART John Jamieson Carswell, né en 1920

Philosophe anglais. Né à Cambridge, il est de 1950 à 1972 Hugues professeur de philosophie à l'université d'Adélaïde, lecteur à la Trobe University de 1972 à 1976 et professeur à la Research School in Social Sciences de l'Université nationale australienne à Canberra. Il publie en 1963 *Philosophy and Scientific Realism* qui constitue le premier manifeste de l'École matérialiste australienne. La thèse privilégie les mécanismes du cerveau. Refusant toute intériorisation psychoaffective, ce matérialisme postule que toutes les entités existantes dans le monde sont physiques. Le corps comme forme spécifique a peu d'importance car la réduction de l'esprit au cerveau, centre organisateur de toutes les activités physiques, permet d'envisager un corps décervelé. Contre les positions positiviste et idéaliste, ce physicalisme de l'esprit identifie la pensée au cerveau, encore dans son ouvrage de 1987 *Essays Metaphysical and Moral*. Son utilitarisme (1973 ; trad., 1997), selon B. Williams, est un « conséquentialisme eudémoniste et direct ».

● « Sensations and brain processes », *The Philosophical Review*, LXVIII, 1959, p. 141-156. – « Materialism », *Journal of Philosophy*, 1963, LX, p. 164-167. – *Philosophy and Scientific Realism*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1963. – *Between Science and Philosophy : an Introduction to the Philosophy of Science*, New York, Random House, 1968. – *Essays Metaphysical and Moral*, Oxford, Blackwell, 1987.

Bernard ANDRIEU

→ Physicalisme ; Rationalisme.

SOCIÉTÉS SAVANTES

Bien qu'incarnée par des individus d'exception, perçus comme des érudits, des artisans, des héros ou des génies, la science moderne exista au travers de réseaux de correspondants puis appela la mise sur pied d'institutions de pairs qui figuraient autant de républiques intellectuelles aristocratiques. Avant d'être professionnalisée, l'activité scientifique fut socialisée. Mais on ne saurait confondre les académies, les sociétés spécialisées et les sociétés savantes qui obéissent à des dynamiques différentes et connurent des évolutions particulières. C'est pourquoi chaque pays, chaque période ou chaque institution doit être étudié en propre mais nos brèves remarques concerneront surtout la France.

Beaucoup d'universités des XVII^e-XVIII^e s. résistaient à la nouvelle philosophie mécanique et expérimentale d'où sortit l'entreprise scientifique moderne. Inversement certains savants pouvaient ignorer le grec, le latin ou l'érudition livresque mais tous devaient communiquer leurs découvertes et montrer leurs expériences. Si bien que l'appartenance aux cénacles scientifiques, plus ou moins formels, était ouverte aux expérimentateurs, ingénieurs, professeurs, artisans et

curieux préoccupés de recherche vive (avec un contenu neuf). Pour l'homme cultivé l'obligation de la collaboration intellectuelle remplaça la préoccupation de la sagesse spirituelle, fruit d'exercices solitaires. Le P. Mersenne, placé au centre d'un réseau de correspondants, formula en 1635 le projet d'une académie dans laquelle les savants européens confronteraient les résultats de leurs expérimentations « sans mystères ni secrets » afin d'augmenter le savoir sur la nature. Pascal résuma cette idée de la science comme élaboration continue et cumulative fondée sur la coopération : le sujet connaissant n'est plus l'individu rattaché aux legs indélébiles des Anciens ou formé à l'analyse méthodique de ses idées claires et distinctes mais « la suite des hommes [...] qui subsiste toujours et qui apprend continuellement ». En une décennie apparurent l'Accademia del Cimento de Florence (1657-1667), la Royal Society (1662) et l'Académie des sciences (1666) dont la marque distinctive fut le patronage royal.

L'Académie des sciences associait le rôle d'expert technique auprès du pouvoir monarchique et la fonction d'entreprise culturelle vouée au développement des connaissances. Ses membres exposaient leurs recherches, délivraient des brevets et statuaient sur l'ensemble des conceptions ou inventions prétendant à la scientificité. Mais elle voulait préserver la liberté d'enquête et éviter l'imposition d'un dogme tout en maintenant des critères scientifiques élevés. À côté de cette institution nationale qui devint l'instance de légitimation et d'évaluation d'un savoir authentique mais ouvert, par opposition à ce qui relève de la charlatanerie, du préjugé ou de la superstition, apparaissent au XVIII^e s. des académies provinciales qui imitent et critiquent l'exemple parisien. Protégées par la monarchie, elles inscrivent les élites locales dans de nouvelles formes de sociabilité culturelle en dessinant un idéal de service civique où les personnes cultivées discutent des connaissances « utiles » et sécularisent l'érudition.

Dans la France centralisée du XIX^e s., l'activité scientifique se caractérise par une prolifération d'organismes et une fragmentation intellectuelle, alors qu'ailleurs en Europe des associations nationales pour l'avancement des sciences fédèrent les différentes disciplines dont tous les représentants étaient annuellement et publiquement rassemblés. L'Institut de France constitué favorisa le conservatisme doctrinal en s'alliant avec la haute administration et en notabilisant ses membres, conférant honneurs et récompenses. C'est pourquoi coexistèrent plusieurs types de sociétés réunissant des savants, depuis des sociétés scientifiques spécialisées dans une discipline jusqu'à des associations provinciales encyclopédistes. Le phénomène commun à tous les pays industriels fut le processus inégal de professionnalisation. 1) Occupation d'hommes disposant de loisirs, l'activité scientifique devint une carrière régulière dans des postes rétribués à plein temps, exigeant des procédures de qualification et de certification. 2) L'autonomisation et la spécialisation du langage, des modèles et des techniques

nécessaires à la formulation des savoirs sur la nature séparèrent les scientifiques des autres catégories d'intellectuels (littéraires, philosophes, théologiens) tout en réalisant une sorte de modèle constitutif (Whewell forge le terme *scientist* en 1833 ; le mot « chercheur » apparaît dans *L'Avenir de la science* rédigé en 1848 et publié par Renan en 1890). Durant plus d'un siècle de troubles politiques, l'idéal du savant incarnait la probité austère hors des machinations et des intrigues de cour. La rectitude et l'indépendance vouées à la recherche de vérités objectives garantissaient son aptitude à interpréter la nature, à devenir une source autonome de légitimation tout en définissant un canon pour les autres champs (religieux, politique, social). Pourtant, les intérêts communs à chaque cité savante s'exprimaient dans des associations nationales démentant l'universalité de la science, des « amateurs » firent des découvertes remarquables, des savants avançaient que « tout homme dispose du pouvoir de distinguer la vérité de l'erreur » (Priestley) et que la recherche est par essence une activité anti-autoritaire à portée démocratique.

Dès le XVIII^e s. la science devenait un objet culturel exigeant une littérature de popularisation (fort diverse) et des formes d'appropriation multiples et localisées. En publiant, à partir de 1856, une *Revue des sociétés savantes* le ministère de l'Instruction donne crédit officiel à une appellation ancienne qui recouvre un large éventail de situations. Alors que la Convention avait fermé les 35 sociétés reconnues par le roi, elles vont se multiplier au XIX^e s. et, pour l'année 1886, Robert Fox en totalise 665 ayant publié près de 15 000 volumes d'actes. Plutôt jalouses de leur indépendance et fières de leur provincialisme, elles remplissent des fonctions très variées : simple cercle intellectuel, reconquête des coutumes locales, diffusion et avancement des sciences, amélioration des techniques agricoles ou industrielles, éducation du peuple... Elles compteront jusqu'à 200 000 membres à l'aube de la guerre de 1914. À l'origine, on trouve le besoin de regrouper localement les membres des classes aisées soucieux de marquer leur distinction grâce au « bon goût » et à l'érudition. L'adhésion est moins fonction d'une compétence particulière que de la possibilité de payer une cotisation, mais on y parle de sciences naturelles, « d'antiquités », de topographie et géographie régionales ou d'histoire locale (beaucoup de sociétés publient des *Mémoires*...). À côté des périodiques de vulgarisation et avant les Expositions universelles, ce sont les principaux véhicules de la popularisation scientifique et de la passion archéologique dans la bourgeoisie instruite de province ; la préhistoire a pris naissance dans une société savante avec Boucher de Perthes. On doit y voir aussi un vecteur de nouvelles formes de sociabilité ainsi qu'une affirmation régionaliste anticentralisatrice : Arcisse de Caumont, fondateur en 1823 de la Société linnéenne du Calvados (puis de Normandie), organisa les Congrès scientifiques de France entre 1833 et 1880 afin de promouvoir l'identité provinciale d'une élite rurale et bourgeoise.

souvent catholique et légitimiste. Culte du passé, inventaire de la nature et diffusion du progrès technique agricole y furent les préoccupations dominantes.

Les Sociétés savantes diffèrent donc des Académies provinciales du XVIII^e s., plus fermées et hiérarchisées, et des sociétés scientifiques spécialisées. Ces dernières cherchaient à professionnaliser les activités de leurs disciplines en définissant des normes de réalisation et de présentation de l'activité de recherche, des niveaux de qualifications et des règles d'appartenance strictes. La première réussite fut sans doute la Geological Society of London (1807) dans laquelle un petit noyau dirigeant réussit à propager de hauts standards d'excellence tout en utilisant l'apport des amateurs. En France, une fois admis que la Société philomatique (1788) vise l'ensemble des savoirs, on peut relever que les Sociétés géologique (1830), entomologique (1832), de biologie (1848), botanique (1854) ou d'anthropologie (1859) entendent rassembler l'élite de chaque discipline mais qu'elles privilégient parfois une orientation doctrinale (positiviste ou matérialiste). À la fin du siècle, les diplômés, les thèses et les publications reconnues établissent définitivement les normes de compétence formelle sanctionnées par un titre et une appartenance universitaires. Ainsi s'établit un nouveau partage des tâches : d'un côté chaque société spécialisée accapare une partie de la diffusion des recherches dans un secteur donné ; de l'autre l'Académie ou une association nationale assument les relations publiques et la renommée de l'activité savante.

Aujourd'hui un chercheur de pointe dans un canton très spécialisé d'une discipline donnée est attaché à un laboratoire ou un institut de recherche ; il appartient à un petit cercle international dont tous les membres se connaissent, se rencontrent régulièrement et reçoivent les épreuves d'articles avant publication dans deux ou trois périodiques assignés ; ils peuvent communiquer par liaison directe instantanée et, tout en étant en compétition pour la priorité dans une découverte, ils se partagent souvent les microsecteurs où une avancée technico-scientifique est prévisible. À l'occasion d'un prix international, d'une crise affectant l'opinion publique ou d'un événement médiatique, certains apparaissent à la télévision, signent un article de vulgarisation et créent momentanément une communauté d'écoute dont ils n'ont aucun retour et qui s'évanouit plus ou moins rapidement. Les sociétés scientifiques et les académies demeurent cependant un élément du patrimoine vivant dans la mesure où leurs publications sont réputées, où leurs médailles et récompenses s'insèrent dans les systèmes d'obtention des crédits et où leurs titres d'appartenance consacrent une carrière et un capital intellectuel convertible sur d'autres plans.

» BERCE F., « Arcis de Caumont et les sociétés savantes », in NORA P. éd., *Les lieux de mémoire*, II, 2, Paris, Gallimard, 1997. — CHALINE J.-P., *Sociabilité et érudition. Les sociétés savantes en France*, Paris, CTHS, 1995. — FOX R., « The savant confront his peers : scientific societies in France, 1815-1914 », in FOX R. & WEISZ G., *The organisation of science and technology in France, 1808-1914*, Cambridge/New York, 1980.

— HAHN R., *L'anatomie d'une institution scientifique. L'académie des sciences de Paris*, Bruxelles, Archives contemporaines, 1993. — ROCHE D., *Le siècle des lumières en province*, Paris, Mouton, 1978. — ROSSI D., *Les philosophes et les machines, 1400-1700*, trad. fr., Paris, PUF, 1996. — ZELDIN Th., *Histoire des passions françaises, 1848-1945*, trad. fr., Paris, Le Seuil, 1978.

Gérard MOLINA

→ Académies ; Enseignement des sciences.

SOCIOBIOLOGIE

La publication en 1975 d'une ambitieuse « synthèse » sociobiologique (E.O. Wilson, 1975, *Sociobiology: the New Synthesis*, Cambridge [Mass.], Belknap Press of Harvard Univ. Press) a engendré un énorme fracas polémique dont la forme a largement déterminé les effets. Dans ce volume monumental qui, de la bactérie à l'homme, survolait le règne animal en s'appuyant sur une bibliographie impressionnante, un entomologiste de renom, Edward O. Wilson, défendait la proposition selon laquelle les comportements sociaux sont fondamentalement soumis à une loi biologique universelle : la sélection naturelle n'est pas centrée sur la reproduction des organismes eux-mêmes, mais elle est plutôt animée à un niveau inférieur par une sorte de spéculation des gènes sur leur propre diffusion à long terme. Ainsi, les actes d'altruisme (où un individu met en danger son avenir pour en aider un autre) ne s'opposeraient pas aux mécanismes de l'évolution conçus par le néodarwinisme : ils en confirmeraient même la logique, pour peu qu'on étudie leur pertinence à l'échelle appropriée. Wilson terminait sa réflexion par un chapitre sur notre espèce, tentant de repérer l'application de ce principe dans les sociétés humaines, ce qui contribua grandement à enflammer les esprits. Deux ans plus tard, le débat avait gagné l'ensemble du monde occidental, impliquant un grand nombre de disciplines, tant en sciences humaines qu'en sciences naturelles. L'ardeur des premiers détracteurs à souligner la teneur politique des enjeux favorisa l'extension de la discussion loin au-delà de l'Université et l'extrême droite donna du crédit à ces soupçons en reprenant pour son compte les thèses du nouvel élan réductionniste.

L'essor institutionnel de la sociobiologie n'en fut que très brièvement ralenti, notamment à cause des erreurs commises par ses premiers adversaires. Pour commencer, ils ne se contentèrent pas d'associer l'alarme politique à la critique scientifique : ils les mêlèrent, au risque de substituer l'accusation aux moments faibles de l'argumentation. La sociobiologie a mis à profit cette agressivité gratuite pour se confectionner une image de science martyre, probe victime des répulsions idéologiques et gardienne intègre du droit à chercher la vérité. Ses partisans manquent rarement l'occasion de rappeler le « paroxysme » de la crise : un seau d'eau renversé en 1978 sur la tête de

Wilson, au cours d'un symposium à Washington. Ensuite, la critique s'attacha à présenter le livre incriminé comme la lubie d'un savant isolé et une prolongation des conjectures de Konrad Lorenz, on reprocha même aux sociobiologistes d'ignorer les avancées de la génétique depuis quarante ans et on passa sous silence la dimension écologique de leurs analyses. Quant à la contre-attaque de l'anthropologie, elle prétendit camper sur la position de l'irréductibilité du phénomène social, mais glissa irrésistiblement vers une défense de l'humain sous le bouclier de la faculté symbolique sans contester la compétence des zoologistes à définir seuls un homologue de la société chez l'animal (M. Sahlins, *The Use and Abuse of Biology: an Anthropological Critique of Sociobiology*, Londres, Tavistock Publ., 1977). De là, une situation confortable pour le déterminisme biologique : sauf à nier l'humanisation, l'exploration du chemin menant de l'animal à l'homme ne saurait être condamnée.

Les sciences sociales n'auraient pas été perturbées par la sociobiologie si l'envergure de son propos n'avait dépassé le cadre du duel inné/acquis : bien qu'amplement vulgarisées, les réflexions de Lorenz et de ses élèves sur l'agression n'ont séduit qu'une fraction de la psychologie, les autres disciplines des sciences humaines ne se sentant pas assez menacées pour s'engager dans une réplique. Tout devient en revanche plus clair si l'on confronte la sociobiologie à son authentique antécédent : le « darwinisme social » du XIX^e s., dont les principales figures furent le philosophe Herbert Spencer et le biologiste Ernst Haeckel. On sait qu'il parasita la théorie darwinienne dès son apparition afin de la mettre au service d'un évolutionnisme généralisé dont les principaux traits étaient déjà assemblés (cf. P. Tort, *La Pensée Hiérarchique et l'Évolution*, Paris, Aubier, 1983). Les relations de la sociobiologie actuelle avec le néodarwinisme reproduisent la stratégie d'altération installée par le « darwinisme social » face à l'œuvre de Charles Darwin.

Le mécanisme central en est très simple : le propos tire sa légitimité de la dimension écologique inhérente à la problématique darwinienne — qui éclaire dans un même mouvement la diversité et l'évolution du monde naturel l'une par l'autre — mais, devant les phénomènes dits sociaux, cette dimension est réduite à une vision étroitement comportementale, c'est-à-dire éthologique. Ainsi, le concept de « lutte pour l'existence » est censé s'appliquer selon Darwin à toutes les relations actives qui déterminent le mode de vie d'une espèce : aussi bien avec les prédateurs ou les proies qu'avec les parasites ou les espèces concurrentes, et le naturaliste anglais précise même qu'il peut y avoir « lutte pour l'existence » avec le climat. Le jeu du « darwinisme social » repris par la sociobiologie dans un vocabulaire moderne consiste alors à amputer cette notion à l'approche de la population et de la société en la restreignant insensiblement à une compétition des congénères entre eux. De cette manière, l'étude de l'évolution des luttes intraspécifiques pour l'existence (et, par conséquent, celle des « comportements

sociaux ») est arbitrairement séparée de l'analyse des relations de l'espèce concernée avec le reste de la nature et se présente comme un noyau particulier ou un volet à part, bien qu'une caractéristique du darwinisme véritable consiste précisément à refuser d'entériner *a priori* de telles dissociations.

On comprend alors pourquoi la notion d'altruisme s'est maintenue comme un agent permanent de ces distorsions : elle contient et assure à elle seule la pérennité de l'artifice méthodologique, en supplantant acquis le fait que les innombrables cas où un individu semble se sacrifier au bénéfice d'un congénère constituent à travers le règne animal une catégorie objective, contenant des réalités homologues. Réalités peu ou prou comparables par-delà la diversité des contextes écologiques à travers l'action répétée d'une hypothétique loi biologique. Le terme proclame *ex nihilo* un phénomène qu'on se donne ensuite pour tâche d'interpréter, mais en escamotant l'obstacle d'un examen critique portant sur la consistance du phénomène lui-même. La théorie est donc construite à partir d'un principe inaltérable qui se place en amont de la discussion bien qu'il détermine à lui seul toute la constitution de ladite théorie.

Pour expliquer la permanence de l'inspiration sociobiologique, mais aussi la désuétude du vieux « darwinisme social » et sa reconstruction sous une forme modernisée, il convient de se centrer sur un événement scientifique majeur : l'avènement du néodarwinisme. On sait qu'il apparaît non pas comme un darwinisme enrichi par des outils de raisonnement supplémentaires mais, bien au contraire, comme un darwinisme épuré et débarrassé d'une composante scientifiquement réfutée : la vision lamarckienne de l'hérédité des caractères acquis, selon laquelle l'évolution pourrait opérer à partir de l'expérience des organismes pour transmettre une adaptation au milieu à des générations ultérieures. Or, le « darwinisme social » initial s'appuie pleinement sur cette hypothèse et croit déceler sa confirmation, voire sa démonstration, dans la théorie de la sélection naturelle. Dans ces conditions, le mécanisme qui autorise un développement de l'altruisme au sein d'une phylogénèse ne pose évidemment aucun problème pratique et Herbert Spencer peut exposer sans entrave les axes permanents de la pensée sociobiologique. Dans *Les Bases de la Morale Évolutionniste* (1880, Paris, Librairie Germer Baillière), il envisage ainsi les degrés du rapport égoïsme/altruisme depuis les organismes les plus simples qui se reproduisent par division jusqu'à l'homme, et défend l'existence d'un progrès graduel de l'altruisme dans la famille à l'altruisme social. L'égoïsme premier évolue en engendrant un altruisme qui dépend de lui mais dont lui-même dépend car, explique-t-il, les efforts au bénéfice de la descendance représentent une partie de la substance des parents.

En réfutant l'éventualité d'une hérédité des caractères acquis, le néodarwinisme prive donc l'évolutionnisme dans la dernière décennie du XIX^e s. du seul mécanisme disponible pour soutenir le progrès des

comportements sociaux. Ceci n'empêche certes pas le « darwinisme social » de poursuivre son extension en tant que schéma idéologique, mais cela restreint considérablement son champ d'activité au sein du débat scientifique proprement dit, et ceci au moment même où, sous l'impulsion d'Émile Durkheim, un courant universitaire prônant une autonomie méthodologique des sciences sociales prend son essor : la genèse des faits sociaux échappe à l'emprise d'une loi biologique universelle qui servirait en quelque sorte de tuteur à la sélection naturelle.

La fréquence des actes « altruistes » dans d'innombrables espèces animales n'en demeure pas moins un des problèmes majeurs à résoudre pour le néodarwinisme : la quête d'une cause méta-écologique (i.e. s'exerçant par-delà la diversité des évolutions forgées par les relations entre un type d'organismes et son milieu) n'est nullement discréditée. L'énigme est seulement mise entre parenthèses pendant que le néodarwinisme reconstruit le paysage des sciences naturelles en imposant et en organisant les disciplines nécessaires à son développement (à commencer par l'écologie et la génétique). L'émergence progressive de la théorie synthétique de l'évolution correspondant à un seuil majeur de cette élaboration, il est symptomatique que la question de l'altruisme soit remise à l'ordre du jour par l'un de ses promoteurs, le généticien John B.S. Haldane, alors que ce mouvement théorique en est à ses tout premiers frémissements (J.B.S. Haldane, *The Causes of Evolution*, New York, Longmans & Green, 1932). La perspective invoquée relève déjà de la dynamique des populations, bien que de façon assez rudimentaire. Le problème continue à préoccuper Haldane qui y revient en 1955 avec une conjecture ambitieuse et précise qui constitue le véritable acte de naissance de la sociobiologie moderne et qu'il présente sous forme de parabole : un individu est porteur d'un gène rare affectant son comportement de telle sorte qu'il sauve un enfant en train de se noyer en n'ayant, pour son compte, que neuf chances sur dix d'en rattrapper. À quelle condition le gène peut-il persister dans la population ? Cela dépendrait du lien de parenté entre le sauveteur et l'enfant, un calcul simple indiquant en effet que l'opération cesse de profiter sensiblement au gène au-delà d'un certain degré de consanguinité (J.B.S. Haldane, 1955, *New Biol.*, 18, p. 34-51).

De ce point de vue, l'altruisme de l'individu n'exprimerait rien d'autre qu'un égoïsme des gènes, et la solidarité des individus résulterait de la compétition des gènes entre eux : la vision spencérienne contourne la difficulté posée par l'absence de l'hérédité lamarckienne au niveau de l'organisme en ressuscitant à l'étage inférieur. Le principe de réductibilité du fait social au fait biologique retrouve ainsi un moyen de s'opposer à la position adverse selon laquelle la société serait capable d'induire une sorte d'héritabilité non biologique des caractères acquis. En outre, cette reformulation offre l'avantage d'entretenir avec l'écologie darwinienne un rapport plus subtil que la théorie initiale en utilisant cette discipline pour expliquer les

démentis produits par la nature : si le comportement animal analysé se révèle compatible avec l'égoïsme des gènes, il faut y voir une confirmation du modèle ; mais, s'il infirme celui-ci, on se contentera d'en déduire que le milieu a forcé la sélection naturelle à respecter d'autres priorités. La sociobiologie « néodarwinienne » cherchera en somme à assurer sa crédibilité par une accumulation d'illustrations favorables à ses thèses.

La spéculation de Haldane intervient lors du triomphe institutionnel de la théorie synthétique de l'évolution, au sein duquel les calculs conjecturaux de la dynamique des populations jouent un rôle croissant : contexte propice à sa diffusion pluridisciplinaire. Par ailleurs, aux États-Unis, l'anthropologie lance « l'écologie culturelle » (dont la teinte fonctionnaliste s'intensifiera rapidement) en même temps qu'elle participe au lancement d'une primatologie de terrain qui disserte sans tarder sur les facteurs écologiques de l'évolution sociale chez les singes (J.H. Crook & J.S. Gartlan, 1966, *Nature*, 210, p. 1200-1203). C'est dans cette ambiance significative caractérisant les années 1960 que, loin derrière la vulgarisation d'une sociobiologie sommaire centrée sur l'éthologie de Konrad Lorenz (qui s'implique peu dans les remous néodarwiniens), une kyrielle de contributions théoriques émanant d'un vaste éventail de disciplines convergent spectaculairement vers le nouveau « darwinisme social ».

En 1962, l'ornithologue V.C. Wynne-Edwards propose ainsi une première polémique universitaire en publiant *Animal dispersion in relation to social behaviour* (Édimbourg, Oliver & Boyd Ltd, 1962). En elle-même, la tentative fait long feu, car les modèles de sélection de groupe qui y sont proposés sont rapidement réfutés, mais l'intervention de la biogéographie sur ces thèmes est retenue comme une innovation prometteuse par les naturalistes. Un peu plus tard, en 1964, deux articles des généticiens britanniques John Maynard-Smith (*Nature*, 1964, 201, p. 1145-1147) et William D. Hamilton (*Journal of Theoretical Biology*, 1964, 7, p. 1-52) marquent la véritable mise en chantier de la réflexion sociobiologique moderne : le premier invente la notion de « sélection parentale » (*kin selection*) et s'appliquera à éclairer, avec le renfort fréquent de la théorie des jeux, les modes de diffusion interpopulations de l'altruisme ; au second revient l'idée d'une « aptitude génétique globale » (*inclusive fitness*) selon laquelle la valeur adaptative d'un individu n'est bien comprise qu'en envisageant ses effets au-delà de lui-même sur toute sa parenté biologique. Manifestement, les deux concepts sont solidaires et se contentent en fait de peaufiner l'intuition de Haldane. D'autres conjectures viendront compléter ces études, telle celle de Robert L. Trivers (1971, *Quarterly Review of Biology*, 46 (4), p. 35-57) qui suppose les possibilités de sélection d'un « altruisme réciproque » entre individus non apparentés.

La contribution de Hamilton a particulièrement frappé l'imagination des zoologistes en s'appliquant au

cas des hyménoptères sociaux où les mâles sont haploïdes et les femelles diploïdes et où la distribution des comportements « altruistes » des ouvrières stériles correspond étroitement au coefficient de parenté génétique qu'elles ont avec les divers membres de leur société. Peu à peu, cette corrélation est même devenue l'emblème des promesses de la sociobiologie, de ses capacités d'élucidation et de ses promesses, à tel point que les adversaires de cette théorie ont parfois admis tacitement son efficacité chez les insectes et se sont limités à critiquer sa transposition chez l'homme. Or, l'explication fournie par Hamilton se heurte au sein de l'entomologie à deux objections solidaires. La première est que des sociétés comparables à celles des hyménoptères existent chez les termites, qui sont diploïdes. La seconde est que les hyménoptères sociaux et les termites partagent des caractères communs : leurs mandibules broyeuses permettent l'édification d'habitats collectifs dont la complexité va de pair avec celle de leurs organisations sociales. Le succès remporté par la version sociobiologique résulte en somme d'un privilège accordé arbitrairement et tacitement à un modèle au détriment d'une voie de recherche logiquement plus satisfaisante sur le terrain envisagé, mais moins exportable à travers le règne animal.

La sociobiologie entame ses « grandes manœuvres » dès 1969, à l'occasion d'un vaste symposium réuni par la Smithsonian Institution où se rencontrent E.O. Wilson et W.D. Hamilton (J.F. Eisenberg & W. Dillon éd., *Man and Beast : Comparative Social Behavior*, Washington, Smithsonian Institution Press, 1971). L'anthropologue Robin Fox et le sociologue Lionel Tiger, éminentes figures d'un réductionnisme revigoré dans les sciences humaines de l'Amérique du Nord, y participent aussi. À côté de l'augmentation du nombre des publications spécialisées consacrées à la fondation biologique du social, on constate ensuite une ouverture vers une diffusion plus large, laquelle prépare le terrain au soudain retentissement public de la « synthèse » bibliographique et théorique de Wilson. Ce lien privilégié avec la vulgarisation (dont les adversaires de la sociobiologie seront, pour leur part, privés dès le début des années 1980) s'est maintenu jusqu'à nos jours et a joué un rôle considérable, principalement à l'approche des questions anthropologiques. Wilson lui-même en a beaucoup usé et des auteurs tels que Richard Dawkins ont été, selon les moments, applaudis ou vertueusement rejetés du côté d'une « sociobiologie vulgaire » (par exemple, R. Dawkins, *The Selfish Gene*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1976).

De nos jours, la controverse scientifique s'est essoufflée en même temps que – ou parce que – le grand public s'en est lassé : il convient de le regretter tant il est clair qu'elle a laissé tous les problèmes entiers et qu'elle a perturbé durablement nombre de relations interdisciplinaires et internationales. Ainsi, en France, les leçons tirées par les zoologistes et les anthropologues vont dans des directions opposées. La plupart des éthologistes ont progressivement admis

l'existence d'une « discipline » sociobiologique, en expliquant sans honte que son existence est désormais trop imposante pour être remise en cause et qu'on se couperait de la communauté scientifique en la contestant : les anciens adversaires de la « nouvelle synthèse » expliquent aux interlocuteurs étonnés par ce revirement peu glorieux que le seul espoir est de corriger de l'intérieur les excès de cette mouvance. En revanche, les chercheurs français en sciences sociales semblent en majorité convaincus que la sociobiologie est une aberration résorbée et une « théorie » à dédaigner. Des silences ont recouvert les malentendus retrouvés, des dialogues entre sciences se sont interrompus et une diplomatie superficielle se substitue souvent à des discussions jugées inutiles. Le « darwinisme social » a reconquis sa superbe d'antan et les embarras méthodologiques qui, par l'entremise du cloisonnement des sciences, ont été occultés ou oubliés au début du XX^e s. sont de nouveau devant nous.

► CROOK J.H. & GARTLAN J.S., « Evolution of Primate societies », *Nature*, 210, 1966, p. 1200-1203. — DAWKINS R., *The Selfish Gene*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1976. — EISENBERG J.F. & DILLON W. éd., *Man and Beast : Comparative Social Behavior*, Washington, Smithsonian Institution Press, 1971. — HALDANE J.B.S., *The Causes of Evolution*, New York, Longmans & Green, 1932 ; « Population genetics », *New Biol.*, 18, 1955, p. 34-51. — HAMILTON W.D., « The genetical theory of social behaviour », I et II, *Journal of Theoretical Biology*, 1964, 7, p. 1-52. — MAYNARD-SMITH J., « Group selection and kin selection », *Nature*, 201, 1964, p. 1145-1147. — SAHLINS M.L., *The Use and Abuse of Biology : an Anthropological Critique of Sociobiology*, Londres, Tavistock Publ., 1977. — SPENCER H., *Les Bases de la Morale Évolutionniste*, Paris, Librairie Germer Baillière, 1880. — TORT P., *La Pensée Hiérarchique et l'Évolution*, Paris, Aubier, 1983. — TRIVERS L., « The evolution of reciprocal altruism », *Quarterly Review of Biology*, 46 (4), 1971, p. 35-57. — WILSON E.O., *Sociobiology : the New Synthesis*, Cambridge (Mass.), Belknap Press of Harvard Univ. Press, 1975. — WYNNE-EDWARDS V.C., *Animal dispersion in relation to social behaviour*, Édimbourg, Oliver & Boyd Ltd., 1962.

Georges GUILLE-ESCURIE

→ Darwinisme ; Écologie comportementale ; Évolutionnisme ; Race ; Sélection.

SOMMERFELD Arnold Johannes Wilhelm, 1868-1951

A.J.W. Sommerfeld est né à Königsberg (Prusse) et mort à Munich. Après avoir obtenu son doctorat à l'université de Königsberg en 1891, Sommerfeld enseigne les mathématiques à l'université de Göttingen, à l'Académie des mines de Clausthal et à l'Institut technique d'Aachen. En 1906, il devient directeur de l'Institut de physique théorique de Berlin, institution créée spécialement pour lui. Il y reste jusqu'en 1940, faisant de l'Institut une institution phare de la recherche. C'est à l'Institut de physique théorique que von Laue découvre en 1912 la diffraction des rayons X. Promoteur enthousiaste de la nouvelle théorie quantique, c'est Sommerfeld

qui suggère à Bohr de l'appliquer à la détermination de la structure atomique. Le modèle atomique élaboré par Bohr consiste en un noyau central entouré d'électrons placés sur des orbites discrètes d'énergies bien définies. Les électrons peuvent passer d'une orbite à l'autre en émettant ou en absorbant des photons de fréquence appropriée correspondant aux fréquences observées dans les lignes spectrales atomiques. Cependant, des recherches plus approfondies soulignent les difficultés de ce modèle circulaire. En 1915, Sommerfeld propose une orbite elliptique pour les électrons autour du noyau. L'analyse spectroscopique effectuée par Friedrich Paschen confirme l'hypothèse de Sommerfeld, renforçant ainsi la réception de la théorie quantique de l'atome. Son manuel sur les atomes et les lignes spectrales est devenu un texte de référence en physique atomique après sa parution en 1919. Pour certains, ses efforts passionnés de pédagogue et d'administrateur, ainsi que son hostilité à l'égard de la persécution nazie, en ont fait une figure centrale de « l'âge d'or » de la physique allemande.

● *Gesammelte Schriften*, éd. F. Sauter, Brunswick, 1968.

► HERMAN A., « Neue Quelle zur Quanten- und Relativitätstheorie », *Physikalische Blätter*, 23, 1967, 431-432 (compris des lettres de plusieurs physiciens à Sommerfeld). — HODGESON L. & BAYM G., « The development of the quantum mechanical electron theory of metals : 1900-1928 », *Proceedings of the Royal Society of London*, A371, 1980, 8-23. — SEITZ W., *Arnold Sommerfelds Stellung zur Relativitäts- und Quantentheorie in den Jahren 1900-1911*, Stuttgart, Historisches Institut, Zulassungsatbeit, 1971. — WHEATON B.R., « Impulse X-Rays and radiant intensity : The double edge of analogy », *Historical Studies in the Physical Sciences*, 11, 1981, 367-390.

John TRESCH et Simon WERRETT

→ Quantique.

SPALLANZANI Lazzaro, 1729-1799

Biologiste italien. Les recherches physiologiques et les nombreuses observations microscopiques pratiquées par Spallanzani éclairèrent la connaissance des lois de la circulation du sang et de la physiologie de la digestion chez l'homme et chez les animaux, ainsi que celle de la respiration et de la reproduction chez les animaux et les plantes. Ses travaux sur les animalcules qui se développent dans les infusions conclurent à l'impossibilité d'expliquer l'apparition des formes inférieures de la vie par génération spontanée (les expériences pratiquées par Francesco Redi sur les asticots volants, 1668, avaient démontré que les animaux complexes ne pouvaient naître spontanément). Théorie que Pasteur discréditera définitivement en répétant les expériences de Spallanzani sur la stérilisation des substances animales et végétales au moyen de la chaleur, à la lumière des enseignements de la bactériologie. L'existence de la « force végétative », active dans les plus minuscules composants de la matière organique, qui,

selon Needham, est à l'origine du « mécanisme de la génération [spontanée ou non] des êtres vivants », sera de même contestée par Spallanzani. Les recherches de ce dernier portant sur la génération le conduisirent à pratiquer un ensemble d'expériences sur la régénération de membres après troncature chez la salamandre, les polypes, les vers de terre et certains reptiles, s'inspirant des travaux de Trembley, Réaumur et Bonnet. D'autres expériences le conduisirent à confirmer les observations de Leeuwenhoek sur les spermatozoïdes et à réfuter la thèse buffonienne de l'existence de « molécules organiques » fourmillant dans les gonades mâles et femelles dans les *Opuscoli di fisica animale e vegetabile* (1776). Enfin, auteur de la première tentative d'insémination artificielle sur un animal vivipare, Spallanzani démontra le caractère indispensable du fluide séminal dans le processus de la génération. Préformiste convaincu, mais d'obédience oviste, comme Malpighi, Haller et Bonnet avant lui, il soutient que l'embryon se trouve déjà à l'intérieur de l'œuf, attendant d'être vitalisé par le fluide séminal afin de pouvoir se dérouler et grandir.

● *Le opere di Lazzaro Spallanzani (1932-1936)*. — *Theses philosophicae...*, 1757. — *Podromo di un opera da impremeri sopra la riproduzione animali*, 1768. — *Expériences sur la circulation*, trad. J. Tourdes, 1800. — *Opusculs de physique animale et végétale*, trad. J. Senebier, 2 vol., 1777. — *Dissertazioni di fisica animale e vegetabile...*, 2 vol., 1780. — *Expériences sur la digestion de l'homme et de différentes espèces d'animaux...* (1783 et 1784) et *Expériences pour servir à l'histoire de la génération des animaux et des plantes...*, trad. J. Senebier, 1785. — *Mémoires sur la respiration* (1803) et *Rapports de l'air avec les êtres organisés*, trad. J. Senebier, 3 vol., 1807. — *Nouvelles recherches sur les découvertes microscopiques, et la génération des corps organisés*, trad. abbé Regley, comm. crit. J. Needham, 1769. — « Fecondazione artificiale », *Prodromo della nuova enciclopedia Italiana*, 1779, 129-134.

► DOLMAN C.E., « Spallanzani », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1975, t. XII, p. 553-567. — PRESCOTT F., « Spallanzani on Spontaneous Generation and Digestion », *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 23, 1930, 495-510. — ROGER J., *Les sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e siècle*, Paris, A. Colin, 1963. — ROSTAND J., *Les origines de la biologie expérimentale et l'abbé Spallanzani*, Paris, 1957.

Éric HAMRAOU

→ Génération spontanée ; Micro-organisme ; Van Leeuwenhoek

SPENCER Herbert, 1820-1903

Philosophe et savant anglais. Spencer est né dans une famille appartenant aux classes moyennes issues de la révolution industrielle, adeptes de la religion méthodiste puis de celle des quakers. C'est dans ce milieu qu'il forge ses croyances fondamentales dans la sûreté et la bonté des lois de la nature, son individualisme absolu et son hostilité radicale envers l'État. Formé à la mécanique et aux mathématiques, Spencer est d'abord ingénieur, travaille dans les nouveaux chemins de fer et

renforce sa croyance dans le progrès. Influencé aussi par la phrénologie puis par la lecture de Lyell et de von Baer, il élabore une théorie du progrès comme loi naturelle. Les bases de son système de pensée s'expriment dès 1850 dans *Social statistics*. La morale individualiste et l'anti-étatisme fondent tout l'édifice qui s'étendra ensuite aux sciences. Par analogie avec la division sociale du travail, il énonce une théorie de l'évolution dès 1852. De l'ordre cosmique à l'ordre social et éthique, en passant par l'ordre biologique et l'ordre psychologique, sa pensée se déroule des *Premiers principes* (1861) jusqu'aux *Principes de sociologie* (1874-1881). Spencer est sans doute l'homme qui a exercé le plus d'influence en Occident dans les années 1860-1890. Par la suite, ses positions morales et politiques le discréditeront largement en Europe où se construira l'État-providence. Il restera surtout populaire aux États-Unis où son individualisme anti-étatique dérivé de la religion naturelle corrobore des socles culturels profonds.

► BECQUEMONT D. & MUCCHIELLI L., *Le cas Spencer. Religion, science et politique au XIX^e siècle*, Paris, PUF, 1998. — ELLIOTT P., « Darwin, Spencer, and the origins of the evolutionary worldview in British provincial scientific culture », *Isis*, 94 (1), 2003, p. 1-29. — PERRIN R.G., *Herbert Spencer. Primary and secondary bibliography*, New York, Garland Pub., 1993. — RYLAND R., *Victorian psychology and British culture, 1850-1880*, Oxford, Oxford Univ. Press, 2000.

Laurent MUCCHIELLI

→ Développement ; Évolutionnisme ; Progrès ; Sélection ; Sociobiologie.

SPENGLER Carl, 1860-1917

Ancien collaborateur de Koch à Berlin (1882-1894), Spengler poursuit ses recherches sur la tuberculose, la syphilis (dont l'influence sur la tuberculose est démontrée), la grippe espagnole et le cancer tout en exerçant la médecine à Davos. Il est l'auteur d'importantes contributions relatives à l'identification de la bactériologie de la tuberculose et à la définition de nouveaux moyens de lutter contre cette maladie. L'étude attentive des conditions environnementales favorisant l'apparition du bacille tuberculeux lui permit de mettre au point de nouvelles méthodes de réalisation des cultures, d'accélération de la croissance de celles-ci ou encore de production de cultures pures à partir de crachats. Il décrit également les spores du bacille de la tuberculose au moyen de la coloration et cultiva un bacille entièrement développé à partir d'eux. Convaincu comme Koch que les tuberculoses humaine et bovine diffèrent et que la seconde est inoffensive pour l'homme, Spengler s'injecta une culture virulente de bacille bovin. Il en résulta une ulcération locale sans extension de la maladie. De même, tout comme Koch, Spengler s'intéressa aux propriétés de la tuberculine. Il tenta d'obtenir une préparation de tuberculine plus active et moins toxique. Ses recherches s'orientèrent

ainsi vers la découverte d'un remède contenant des « corps immunisants » (« Immun-Körper » ou « I.-K. ») provenant du sang acidulé d'animaux (lapins) immunisés contre les différentes sortes de bacilles tuberculeux de l'homme (principalement le bacille de type *humano longus*), capables d'enrayer la progression de la tuberculose. Ces corps immunisants, dont l'action dépend des antitoxines qu'ils contiennent, ont pour vertu de tuer les bacilles de la tuberculose d'une manière graduelle. J. Castaigne et F.-X. Gouraud seront les promoteurs du traitement par « I.-K. » en France dans les années 1910.

● *Chirurgische und klimatische Behandlung der Lungenschwindsucht und einiger ihrer Complicationen*, 1891. — *Über Tuberkulinbehandlung*, 1897. — *Zur Diagnose geschlossener Lungentuberkulose, der Sekundärinfektion, tuberkulöser und syphilitischer Phthise*, 1900. — *Klassenstadieneinteilung der Lungentuberkulose und Phthise und über Tuberkulinbehandlung*, 1903. — *Tuberkulinbehandlung im Hochgebirge*, 1904. — *Tuberkulose und Syphilis Arbeiten*, introd. angl. et all. F.M. Pottenger, prof. de médecine clinique au département de médecine de l'Univ. sud-californienne, 1911. — *Zur Aetiologie der Lungenphthise*, 1911. — *Untersuchung des syphilitisch-tuberkulösen Sputums durch Färbung und Tierexperiment*, 1911. — *Züchtung des Syphilis-Erregers aus Sputum und beliebigem anderem syphilitischem Infektionsmaterial*, 1911. — *Tuberkulose-Aetiologie*, 1911. — *Der Bakterien und Infektionsdualismus der Tuberkulose im Ultramikroskop*, 1911. — *Tuberkulose-Immunblut (I.-K.) Herstellung und Testierung und Eigenschaften des I.-K.*, 1917.

► « Les Corps Immunisants de Carl Spengler », *Presse Médicale*, 21 avril 1909, n° 37. — FISCHER Dr., *Biographisches Lexikon hervorragender Ärzte*, 1880-1930, Munich/Berlin, Urban & Schwarzenberg, 2 vol., p. 1482.

Éric HAMRAOU

→ Bactériophage ; Immunologie ; Koch.

STAHL Georg Ernst, 1660-1734

Médecin et chimiste allemand, professeur à Iéna puis à Halle avant de devenir médecin de l'empereur Frédéric Guillaume I^{er} de Prusse, G.E. Stahl a fortement influencé la pensée scientifique du XVIII^e s. Deux concepts, celui de vitalisme en médecine et celui d'oxydo-réduction en chimie, ont leur origine dans l'œuvre de Stahl, tout comme la controverse qui opposa les chimistes adeptes de la théorie de Lavoisier aux partisans de la doctrine du phlogistique imaginée par le chimiste allemand pour expliquer la transformation réversible des corps combustibles en oxydes ou en acides. Les doctrines professées par Stahl prennent appui sur sa conception des trois règnes de la nature, qu'il considère comme identiquement formés de matière, tout en distinguant les mixtes des êtres vivants qui seuls possèdent l'*anima* capable de diriger et de contrôler l'action des agents mécaniques : soit qu'elle la provoque pour atteindre le but qu'elle se propose, soit qu'elle y fasse obstacle en luttant contre la

décomposition inhérente à l'hétérogénéité des corps organisés.

Père du vitalisme, Stahl est aussi le chimiste qui a expliqué les réactions d'oxydo-réduction par « la perte ou le gain de quelque chose », selon l'expression de Kant. Que ce « quelque chose » ait été pour Stahl le phlogistique perdu dans l'inflammation, ou pour Lavoisier l'oxygène fixé lors de la combustion, il n'en reste pas moins que G.E. Stahl est le premier à avoir donné une interprétation exacte du concept fondamental de la chimie.

► DÉRÉ A.C., *La Mise en évidence du rôle chimique de l'oxygène du XVIII^e au XIX^e s. : l'évolution du concept d'oxydo-réduction*. Univ. de Nantes, 1996 (thèse de doctorat en histoire de la chimie); *Du feu des huiles et des couleurs, matériaux pour l'histoire du phlogistique en France au XVIII^e siècle*, Turnhut, Brépols, coll. « De Diversis Artibus », 2005. — KING L.S., « Stahl », in GILLISPIE Ch.C. dir., *Dictionary of Scientific Biography*, New York, Scriber's Sons, 1975, vol. 2, p. 599-605.

Anno-Claire DÉRÉ

→ Gaz ; Matière ; Phlogistique ; Vitalisme et mécanisme.

STATISTIQUE

Le mot « statistique » a, en français moderne, au moins deux sens distincts. Pour le public et pour la presse, il désigne des mesures portant sur le monde social : chômage, indice des prix. Mais, dans une université ou dans un laboratoire scientifique il correspond à une branche des mathématiques appliquées, apte à modéliser des phénomènes où interviennent des grands nombres, qu'ils soient sociaux ou non. Seule l'histoire explique cette tension entre deux significations. À son origine allemande des XVII^e et XVIII^e s., la *Statistik* de Hermann Conring (1606-1681) et Gottfried Achenwall (1719-1779) était une nomenclature des connaissances nécessaires au Prince. Les matières à traiter par cette « science de l'État » relevaient de l'histoire, du droit, des sciences politiques, de l'économie et de la géographie. Elles étaient réparties, du point de vue des fins et des moyens de l'État actif, en quatre « causes », selon la logique aristotélicienne : matérielle, formelle, finale et efficiente. Ce plan de classement d'un savoir encyclopédique n'impliquait aucune notion de mesure quantitative. Ce n'est qu'au début du XIX^e s. que, notamment en France, le sens du mot statistique s'est progressivement restreint à une description, par des nombres, de l'État puis, par extension, de l'ensemble de la société. À ce moment, la tradition classificatoire et descriptive de la statistique allemande rencontra une autre pratique scientifique, née en Angleterre au XVIII^e s., l'arithmétique politique, un ensemble de techniques d'enregistrement et de calcul, à partir des registres paroissiaux de baptêmes, de mariages et de décès. Inspirées par les travaux de John Graunt (1620-1674) sur les bulletins de décès, ces méthodes avaient été systématisées et théorisées par William

Petty (1623-1687). Elles constituent l'origine de la démographie moderne.

La « statistique » du XIX^e s. était donc une combinaison, peu formalisée, de ces deux traditions de taxinomie et de dénombrement. Puis, au début du XX^e s., elle devint, en plus, une méthode mathématique d'analyse des faits, sociaux ou non, impliquant des grands nombres, et c'est dans ce nouveau sens qu'elle est connue des sciences de la nature. Cette nouvelle branche des mathématiques est le plus souvent (mais non toujours) associée à la théorie des probabilités, qui a connu un grand développement depuis le XVII^e s. (Courmet, 1970 ; Daston, 1989). Les deux sens du mot « statistique » subsistent aujourd'hui. Ils sont cependant liés, par l'intermédiaire du calcul des probabilités, puisque c'est celui-ci qui permet de garantir la crédibilité des mesures statistiques obtenues par exemple par des enquêtes, avec les notions de sondage aléatoire et d'intervalle de confiance.

Mesure de l'incertitude et réduction de la diversité

La diversité et l'enchevêtrement des origines de la statistique expliquent que son histoire puisse être racontée de diverses façons : sociologique, institutionnelle, mathématique ou philosophique. Les ouvrages mentionnés dans la bibliographie abordent chacune de ces dimensions dans des proportions variées. Porter (1986) est plutôt sociologue. Anderson (1988) et l'INSEE (1987) analysent l'histoire sociale des institutions et des sources statistiques. Benzecri (1982) et Stigler (1986) explorent l'histoire des formalismes mathématiques. Gigerenzer et al. (1989) et Hacking (1990) insistent sur les implications philosophiques de la statistique. Armatte (1995) est le plus synthétique. Toutes ces histoires sont en partie communes et en partie différentes. On peut cependant les lire, d'un point de vue de philosophie des sciences, en suivant deux pistes présentes tout au long de cette histoire. La première associe la statistique à la mesure de l'incertitude, comme le dit le titre du livre de Stigler. Elle qualifie des « raisons de croire », des « états de l'esprit » du savant. La seconde, en revanche, en fait un outil de réduction de la diversité. Elle caractérise et donne consistance à des « états du monde ». Cette ambivalence, cet aspect Janus de la statistique, se retrouve aussi dans la théorie des probabilités. L'histoire de la statistique peut être lue comme celle d'une domestication du hasard (selon la belle formule de Hacking, 1990), mais de deux façons : hasards et incertitudes liés aux protocoles d'observation, hasards et dispersions liés à la diversité et à l'indétermination du monde lui-même. Une transition habile entre ces deux aspects est présentée par l'astronome et statisticien belge Adolphe Quételet (1796-1874) à travers le transfert de la notion de moyenne, des sciences de la nature vers les sciences de l'homme et la construction d'un être nouveau, l'homme moyen.

Dès le XVIII^e s., apparaissent les particularités des phénomènes pour lesquels peuvent être accumulées des

observations en grand nombre. Les ouvrages d'introduction aux probabilités et aux statistiques citent toujours les tirages de boules dans une urne, ou les jeux de hasard (pile ou face, dés, jeux de cartes) parce que leur syntaxe est simple et peut être définie complètement. Mais l'innovation majeure de l'époque était le rapprochement entre ces cas apparemment simples et d'autres, comme les rapports à peu près constants entre la population et les naissances ou entre les naissances masculines et féminines (le *sex-ratio*), comme la mortalité résultant directement de l'inoculation préventive de la variole, ou encore comme les mesures successives de la position d'une étoile. Le regard commun porté sur des faits aussi différents provient de la « loi des grands nombres », formulée par Jacques Bernoulli en 1713. Si des tirages dans une urne constante contenant des boules blanches et noires sont répétés un grand nombre de fois, la part observée des boules blanches « converge » vers la part des boules blanches présentes dans l'urne. La nature de cette « loi » resta longtemps un objet de débat. Selon une boutade célèbre, les physiciens pensent que c'est un théorème de mathématique, mais les mathématiciens croient que c'est un résultat tiré de l'expérience. Ainsi, cette fameuse « loi » se trouve au carrefour des deux grands courants de l'épistémologie des sciences, l'un « hypothético-déductif », et l'autre « expérimental-inductif ». La richesse des interprétations possibles du raisonnement probabiliste et statistique provient de cette tension interne qui est une autre forme de la tension entre « raisons de croire » et « diversité du monde ».

L'interprétation classique du calcul des probabilités, selon Lorraine Daston (1989), était centrée sur les « raisons de croire ». L'accumulation d'observations empiriques était perçue dans la perspective d'un renforcement de ces raisons. La « règle de Bayes » (1764) est typique de ce point de vue subjectiviste. La survenue d'un événement permet de modifier l'idée *a priori* que l'on peut avoir de la probabilité d'une « cause inconnue ». La probabilité *a posteriori* est le produit de la probabilité *a priori* par la probabilité conditionnelle de l'événement. Ce type de spéculation sera rejeté par les statisticiens « fréquentistes » du XIX^e s. Pour eux, la notion de probabilité *a priori* ne repose sur rien, ce qui ruine le raisonnement bayésien. Les « probabilités subjectives », typiques de l'époque des Lumières, seront discréditées pour plus d'un siècle (des années 1830 à 1930) par l'« avalanche des statistiques ». L'examen des tableaux de résultats statistiques prend alors le pas sur les réflexions sur les « raisons de croire ». Un des premiers à voir clairement cette divergence et à la formuler est Cournot (1801-1877). En 1843, il montre l'importance de « distinguer entre les probabilités qui ont une existence objective, qui donnent la mesure de la possibilité des choses, et les probabilités subjectives, relatives en partie à nos connaissances, en partie à notre ignorance, variables d'une intelligence à une autre, selon leurs capacités et les données qui leur sont fournies

(A. Cournot, *Exposition de la théorie des chances et des probabilités*, 1843).

À partir des années 1830, la production et la publication de statistiques devient une activité normale de l'État. Auparavant réservées aux Princes, ces informations sont désormais à la disposition des « hommes éclairés ». Elles portent sur la population, les naissances, les mariages et les décès, les suicides et les crimes, les épidémies, le commerce extérieur, les écoles, les prisons, les hôpitaux. Ce sont souvent de simples sous-produits de l'activité administrative, et non pas le résultat d'enquêtes spéciales. Seul le recensement de la population, le produit phare de la statistique du XIX^e s., constitue une enquête régulière. Toutes ces statistiques sont publiées dans d'épais volumes, sans doute trop hétéroclites pour être vraiment lus, mais dont la simple existence suggère que les faits de société relèvent désormais de lois scientifiques et non plus seulement de lois juridiques, c'est-à-dire de régularités constatées et non pas de décisions normatives d'un pouvoir politique. Quételet est l'homme orchestre de cette nouvelle façon de penser le monde social. Dans les années 1830 et 1840, il organise les réseaux administratifs et sociaux de la production statistique, et il invente l'interprétation philosophique de celle-ci qui régnera dans les ouvrages sur la statistique jusqu'au début du XX^e s.

Cette interprétation résulte de la combinaison de deux idées, développements de la loi des grands nombres de Bernoulli : la généralité de la « distribution normale » (ou, dans le vocabulaire de l'époque, utilisé par Quételet, la « loi des possibilités »), et la régularité de certaines statistiques annuelles. Dès 1738, Abraham de Moivre, cherchant à préciser les conditions de convergence de la loi des grands nombres, avait fait apparaître l'expression mathématique de la future « loi de Gauss » comme limite d'une distribution binomiale. Puis Laplace (1749-1827) avait montré que cette loi constituait une bonne représentation de la distribution des erreurs de mesure en astronomie, d'où le nom sous lequel Quételet et ses contemporains la désignaient aussi : loi des erreurs (l'expression loi normale, sous laquelle elle est connue aujourd'hui, ne sera introduite qu'à la fin du XIX^e s. par Karl Pearson). L'audacieux coup de force intellectuel de Quételet a été de rapprocher deux formes, d'une part celle de la déjà décrite loi des erreurs d'observation, et d'autre part celle de la distribution de certaines mesures effectuées sur les corps des individus d'une population, comme les tailles des conscrits d'un régiment. La similitude des allures « gaussiennes » de ces deux distributions va justifier l'invention d'un être nouveau, voué à une belle postérité dans les sciences sociales : l'homme moyen.

Quételet, l'homme moyen et la statistique morale

Des calculs de moyennes étaient déjà utilisés au XVIII^e s., mais ils l'étaient dans deux cas bien distincts, sous des appellations différentes. Dans certains cas, où

on dispose de plusieurs évaluations d'une grandeur inconnue (la position d'une étoile, la surface totale de la France), on calcule une « moyenne proportionnelle » représentant l'estimation jugée la plus plausible d'une quantité unique existant réellement. Dans d'autres cas, en revanche, des objets différents (par exemple des rendements agricoles de terres variées) coexistent, mais on souhaite les résumer. Un calcul de moyenne analogue au précédent est effectué, mais son résultat est présenté sous un autre nom, celui de « valeur commune » : lieue carrée commune ou année commune, selon que ces moyennes sont calculées entre des rendements de lieux différents ou d'années différentes. Cette notion du résumé est typique de la deuxième face de la raison statistique, celle qui vise à rendre compte de l'état du monde et non de l'état de l'esprit. Cette valeur commune renvoie à l'idée intuitive de compensation entre les cas extrêmes, bien exprimée par des formules imagées, usuelles à l'époque : « l'un dans l'autre », « bon an, mal an », « le fort portant le faible ».

L'ingéniosité de Quételet a été de chercher, parmi les cas où pouvaient être calculées de telles « valeurs communes », ceux où la distribution des estimations élémentaires avait une allure gaussienne. Il postulait ensuite que, de même que, en amont de la distribution des positions observées d'une étoile, il y avait une étoile réelle, de même en amont de la distribution de forme gaussienne des tailles des conscrits, il y avait un être doté d'une réalité comparable à celle de l'étoile. L'homme moyen apparaît ainsi chez Quételet comme une sorte de modèle, dont les individus concrets sont des copies imparfaites, de même que les observations de l'astronome sont imparfaites. Il brode longuement sur cette idée de copie, en comparant la distribution des êtres humains à celle d'une série de statues obtenues par imitation d'une magnifique « statue du gladiateur », demandées à la cour de Prusse pour être distribuées à ses meilleurs courtisans. De même la distribution des impacts de balles tirées en visant le centre d'une cible constitue une autre image possible du lien qui peut être opéré entre deux calculs de moyennes, désormais réunis et justifiés par la forme commune de la courbe de Gauss.

Mais l'efficacité cognitive et sociale de ce raisonnement n'aurait pas été complète si celui-ci n'avait été associé avec l'observation de la « remarquable régularité » de certaines séries statistiques, comme celles des mariages, des suicides ou des crimes. De même que des séries successives de tirages dans une urne constante font apparaître une régularité des fréquences observées de boules blanches, de même les régularités des taux de suicide ou de crime peuvent être interprétées comme résultant de séries de tirages successifs dans une population dont certains membres seraient affectés d'une « propension » au suicide ou au crime. L'homme moyen est ainsi doté d'attributs non seulement physiques mais aussi « moraux », comme ces propensions. Là encore, de même que les tailles moyennes des conscrits sont stables d'une année à l'autre (alors que les tailles individuelles sont très dispersées), de même

les taux de crime ou de suicide sont eux aussi stables, alors que ces actes sont éminemment individuels et imprévisibles. On reconnaît dans cette statistique dite alors « morale » le début d'une sociologie, science de la société radicalement distincte d'une science de l'individu telle que la psychologie. Ce raisonnement issu de Quételet sera à la base de celui de Durkheim développé dans *Le suicide* (1897).

La construction brièvement résumée ici aura un important impact dans la seconde moitié du XIX^e s., non seulement en philosophie des sciences, mais aussi en philosophie morale. Elle est en effet largement réinterprétée dans le débat opposant les tenants du déterminisme et ceux du libre arbitre. Si les individus sont dotés de telles propensions et si le nombre des suicides et des crimes est prévisible, que reste-t-il de la liberté morale de la personne humaine ? Ainsi les écrits de Quételet sont commentés et discutés bien au-delà du cercle des « statisticiens », fort peu nombreux à l'époque. Ils rencontraient notamment un débat sur la déshumanisation de la société moderne, important dans la philosophie et dans la littérature allemandes et autrichiennes du tournant du siècle. Une analyse fouillée de cette inquiétude a été proposée par Jacques Bouveresse, dans un ouvrage consacré à l'influence de la philosophie statistique de Quételet sur l'œuvre de Musil. Ce livre (*L'homme probable. Robert Musil, le hasard, la moyenne et l'escargot de l'histoire*, Combas, l'Éclat, 1993) montre que le thème de *L'homme sans qualités* (c'est-à-dire sans singularités spécifiques) a été fortement marqué par ces débats allemands sur l'homme moyen et la liberté individuelle.

L'œuvre de Quételet résultait d'un transfert et d'une retraduction, des sciences de la nature vers les sciences de l'homme. Plus tard, par un mouvement inverse, elle influença de façon décisive la physique de Maxwell et de Boltzmann, par l'intermédiaire de l'astronome Herschell. Une « physique statistique » était construite sur l'idée que des mouvements erratiques de particules microscopiques, définis de façon probabiliste, pouvaient avoir pour résultantes des régularités macroscopiques, de la même façon que l'homme moyen était relativement stable et prévisible, alors que les individus étaient volatiles et imprévisibles. Un déterminisme macroscopique était compatible avec une incertitude radicale au niveau des particules élémentaires.

La critique puis le dépassement du modèle de Quételet sont venus de la remise en cause de l'hypothèse de l'urne unique de composition constante, justification théorique de la construction de l'homme moyen. En 1837, Poisson (1781-1840) propose, lors d'une discussion sur l'épineux problème de la majorité requise pour les décisions des jurys d'assises, un modèle d'urne non pas constante, mais variant selon une loi constante. D'après ce qu'il nomme alors « loi forte des grands nombres », et sous certaines hypothèses de ces variations de l'urne, la convergence des probabilités des tirages vers une loi normale est maintenue. Puis, en 1877, le statisticien allemand Lexis (1837-1914) conteste que les variations observées des taux de suicide

ou de crime soient compatibles avec l'hypothèse de tirages binomiaux dans une urne unique. À l'exception remarquable de la série des rapports de masculinité à la naissance (ou *sex-ratio*), les autres séries exhibées par Quételet présentent en effet des variabilités supérieures à celles qui résulteraient d'un tirage dans une telle urne. Mais il reste à opérationnaliser ces critiques négatives, à les transformer en une construction statistique complètement nouvelle, capable de rendre compte des distributions et des dispersions et non plus seulement des moyennes, et surtout de décrire et de mesurer des liaisons entre variables différentes. La question de l'urne unique sera alors complètement dépassée. Ce renouvellement sera l'œuvre de Francis Galton (1822-1911) et de Karl Pearson (1857-1936).

Les métamorphoses de la causalité

L'histoire de la statistique peut être vue comme incluse dans l'histoire de la notion philosophique de causalité, ou plutôt de l'instrumentation des relations entre causes et conséquences. Le modèle de l'urne de Bernoulli est un modèle de causalité, dont l'interprétation sera retournée par Bayes et Laplace. Pour Bernoulli et De Moivre, les distributions des tirages dans une urne de composition connue convergent vers une loi « normale ». Puis Bayes et Laplace inversent cet argument, en soulevant la question de la probabilité d'une cause inconnue, sachant que tel événement en a été la conséquence. Cette notion de « probabilité d'une cause » est typique du mode de raisonnement « subjectiviste » des philosophes naturels du XVIII^e s. Sous le nom de « probabilité inverse », elle sera rejetée par les fréquentistes du XIX^e s. Ceux-ci, à la suite de Quételet, développent une argumentation beaucoup moins « épistémique », car ils sont convaincus que la soudaine abondance de séries statistiques les dispense des spéculations sur les « raisons de croire » de leurs prédécesseurs. Ainsi, pour Quételet, l'allure « normale » de la distribution des tailles des conscrits est une preuve de ce que, en amont, existe une cause constante, l'imitation (imparfaite) d'un modèle, dont l'« homme moyen » fournit l'idée. L'argument du grand nombre est désormais utilisé d'une façon différente. Au XVIII^e s., il servait à évaluer un degré de certitude à travers la « probabilité d'une cause ». Au XIX^e s., il conforte l'idée de l'existence et du réalisme d'une macrocausalité déterministe, par opposition à une microcausalité de type laplacien, désormais perçue comme une chimère.

Galton et Pearson construisent, entre 1880 et 1900, une instrumentation statistique radicalement nouvelle, qui rend pensable l'idée d'une causalité partielle, absente des philosophies antérieures. Pour celles-ci, A est ou non la cause de B, mais ne peut pas être un peu et incomplètement la cause de B. Or les travaux de Galton sur l'hérédité conduisent précisément à ce genre de formulation. La taille des parents « explique » celle des enfants, mais ne la « détermine » pas entièrement. Plus les pères sont grands, plus les fils le sont en

moyenne, mais, pour une taille donnée du père, la dispersion des tailles des fils est grande. Plus précisément, la taille moyenne des fils de pères d'une taille X est une fonction linéaire croissante de X, de pente inférieure à 1, et la dispersion autour de cette taille moyenne est indépendante de X. Par ailleurs la dispersion d'ensemble des tailles de tous les fils est égale à celle de tous les pères. Ce résultat essentiel, obtenu par Galton en 1886, est à l'origine des notions de régression et de corrélation, essentielles pour l'outillage d'une « causalité » statistique de type nouveau, explicitée par Karl Pearson dans les années 1890. Cette forme de causalité est même tellement nouvelle que Pearson lui refuse ce statut, et affirme vouloir s'en tenir à la seule notion de corrélation.

Pearson a étudié les mathématiques à Cambridge, puis l'histoire et la philosophie en Allemagne. Il a été influencé par la philosophie antiréaliste du physicien Ernst Mach (1838-1916). De ses recherches sur la psychophysiologie des sensations, celui-ci avait déduit une épistémologie scientifique privilégiant le rôle de l'observation et des sensations, et refusant les « choses en soi », au profit « des couleurs, des tons, des pressions, des durées, des sensations qui sont les véritables éléments du monde ». Mach rejetait la notion de causalité, comme subjective. Pour lui, les concepts sont des entités mentales et n'existent pas en dehors de l'esprit. Pourtant ils ne sont pas que des mots. Ils sont stables et riches de contenu parce que chargés d'histoire et d'expérience. La question, ainsi suggérée, des processus de durcissement d'une réalité en gestation, aurait pu ouvrir vers une sociologie des catégories statistiques et vers une forme de réalisme différent de celui qui est implicitement à l'œuvre dans les usages courants de la statistique.

Le vigoureux antiréalisme affirmé par Pearson dans *La grammaire de la science* (1^{re} éd., 1892 ; 3^e éd., 1911, complétée par un chapitre sur la statistique, intitulé : « Contingence et corrélation. Insuffisance de l'idée de causation ») est fortement inspiré de celui de Mach. Pour Pearson les lois scientifiques ne sont que des résumés, des descriptions brèves en sténographie mentale, des formules abrégées, synthétisant, en vue d'usages ultérieurs et de prévision, des routines de perception. Ces formules apparaissent comme des limites d'observations qui ne respectent jamais parfaitement les lois fonctionnelles strictes ; le coefficient de corrélation permet précisément de mesurer la force de la liaison, entre zéro (indépendance) et un (dépendance stricte). La notion métaphysique de causalité est abandonnée au profit de celle de corrélation entre faits observés, dont les connexions mutuelles, mesurées par cette corrélation, sont susceptibles de se reproduire dans l'avenir. De même que la réalité des choses peut être invoquée uniquement à des fins pragmatiques, et sous réserve que soient maintenues des routines de perception, de même la « causalité » ne peut l'être qu'en tant que corrélation avérée et donc prévisible avec une bonne probabilité.

Cette exigeante philosophie des sciences de Karl

Pearson n'a été transmise que sous une forme affadie aux statisticiens qui ont hérité des notions de corrélation et de régression. Ces deux concepts, jumeaux à leur naissance, sont à l'origine de deux rhétoriques d'usage différentes. La corrélation, faisant jouer des rôles symétriques aux variables décrites, peut se maintenir dans le langage des cooccurrences, de la présence simultanée de certains traits. C'est la logique de l'analyse des données telle qu'elle a été développée en France par Jean-Paul Benzecri, depuis les années 1960, et qui porte sur des « tableaux de contingence », reprenant ainsi le vocabulaire de Pearson. La causalité n'est pas implicitement déduite d'une corrélation forte, ne serait-ce que parce que celle-ci n'est pas orientée d'une variable vers une autre. En revanche, la formule de la régression, présentée sous la forme d'une variable Y fonction d'une autre variable X (à un « résidu aléatoire » près), pousse l'interprétation vers l'idée de causalité, même si le statisticien ou l'économètre, ayant retenu au moins la lettre du message de Pearson, déclarent qu'une régression significative n'est pas nécessairement une « vraie causalité ». Mais, à condition de donner à la causalité une définition formelle restreinte (dite par exemple « au sens de Granger » par les économètres) sans rapport en principe avec une causalité « réelle », le vocabulaire des causes peut être conservé de fait dans ses usages pratiques de prévision et de décision. La portée pragmatique de l'outillage de Pearson a ainsi été conservée, même si le vocabulaire de sa justification a changé.

La statistique entre la science et la décision

Les principales formulations de la statistique mathématique actuelle sont issues des travaux de Karl Pearson et de ses successeurs directs : son fils Egon Pearson (1895-1980), le mathématicien polonais Jerzy Neyman (1894-1981), le statisticien pionnier de l'expérimentation agricole Ronald Fisher (1890-1962), et enfin l'ingénieur et brasseur de bière William Gosset, *alias* Student (1876-1937). Ces développements résultent d'une inscription de plus en plus poussée de la statistique dite « inférentielle » dans des modèles probabilistes. L'interprétation de ces constructions est toujours tendue entre deux perspectives : celle de la science, qui cherche à prouver ou à tester des hypothèses, avec une visée de vérité, et celle de l'action dont le but est la meilleure décision, avec une visée d'efficacité. Cette tension explique nombre des malentendus et des controverses qui ont, dans les années 1930, opposé les fondateurs de la statistique inférentielle. En effet, les innovations essentielles sont souvent apparues dans le cadre de recherches directement appliquées à des questions économiques, par exemple dans les cas de Gosset et de Fisher.

Gosset est salarié d'une brasserie. Il met au point des techniques de contrôle de fabrication à partir d'un petit nombre de prélèvements. Il a donc à estimer les variances et les lois de distribution de paramètres

calculés sur des observations ne satisfaisant pas la supposée « loi des grands nombres ». Fisher, travaillant dans un centre de recherche agricole, ne peut procéder, lui aussi, qu'à un nombre restreint d'essais contrôlés. Il pallie cette limitation en créant artificiellement un aléa, lui-même contrôlé, pour les variables autres que celles dont il cherche à mesurer l'effet. Cette technique de « randomisation » introduit l'aléa probabiliste au cœur même de la démarche expérimentale. À la différence de Karl Pearson, Gosset et Fisher sont conduits à utiliser des notations distinctes pour désigner, d'une part un paramètre théorique d'une distribution de probabilité (une moyenne, une variance, une corrélation) et d'autre part l'estimation de ce paramètre, calculée à partir d'observations en nombre insuffisant pour que l'on puisse négliger l'écart entre ces deux valeurs, théorique et estimée.

Cette innovation en matière de notation marque le tournant décisif rendant possible une statistique inférentielle appuyée sur des modèles probabilistes. Celle-ci se déploie dans deux directions. L'estimation de paramètres, compte tenu d'un ensemble de données enregistrées, suppose que le modèle soit vrai. Elle n'implique pas d'idée d'échantillonnage répété, et elle peut s'appuyer soit sur une formulation bayésienne, soit sur une fonction de vraisemblance, dont on cherche un maximum. Les informations issues du modèle sont combinées avec des données, mais rien ne dit si le modèle et les données sont en bon accord. En revanche, les tests d'hypothèse permettent d'éprouver cet accord, et de modifier éventuellement le modèle : c'est la partie inventive de la statistique inférentielle. En s'interrogeant sur la plausibilité qu'un ensemble d'événements ait pu advenir si un modèle est vrai, on compare, explicitement ou non, cet ensemble à celui qui serait advenu si le modèle était vrai, et on porte un jugement sur l'écart entre ces deux ensembles, dans une perspective typiquement fréquentiste.

Ce jugement peut lui-même être porté selon deux perspectives différentes, objets de vives controverses entre Fisher d'une part, Neyman et Egon Pearson de l'autre. Le test de Fisher est inscrit dans une visée de vérité et de science : une hypothèse théorique est jugée plausible, ou elle est rejetée, compte tenu des données observées. Le test de Neyman et Pearson en revanche est lié à une visée de décision et d'action : on évalue les coûts respectifs de l'acceptation d'une hypothèse fautive et du rejet d'une hypothèse vraie, qualifiés de risques de première et de deuxième espèce (Gigerenzer *et al.*, 1989).

Les deux points de vue sur les probabilités, subjectiviste ou fréquentiste, peuvent être mis en relation avec les situations où ce langage offre une ressource pour appuyer une décision, selon qu'un raisonnement statistique est possible ou non. Le fréquentisme est associé au traitement en général, par un décideur collectif, de problèmes pour lesquels des mises en équivalence et des agrégations sont politiquement et socialement plausibles. Il faut que l'urne ait été

construite et que les couleurs des boules ne soient plus un objet de débat. Les questions taxinomiques sont résolues, et enfouies dans des boîtes noires bien fermées. Des traitements statistiques, au sens de la loi des grands nombres, sont possibles. Ils appuient des décisions prises par l'État optimisant un bien collectif, ou par une compagnie d'assurances. Dans ce dernier cas, les conventions taxinomiques peuvent être remises en cause, si on souhaite mettre en relief une sous-catégorie plus particulièrement affrontée à un risque, et modifier ainsi le système des primes, ou si on évoque le fait que les personnes les moins touchées par des accidents abandonnent leur assurance, augmentant ainsi le coût de celle-ci pour ceux qui restent.

Les probabilités subjectives, en revanche, sont mobilisées pour des choix ne prenant pas nécessairement appui sur une idée de répétition. Ces situations impliquent l'évaluation de la probabilité *a priori* d'un événement inconnu, passé ou futur. Très utilisée au XVIII^e s., rejetée au XIX^e s., cette mesure d'un « degré de croyance » a été à nouveau prise au sérieux et formalisée, dans les années 1920 et 1930, par des Anglais, Keynes et Ramsey, par l'actuaire italien De Finetti, par les bayésiens inspirés par Savage. Les problèmes de décision judiciaire (condamner ou non un accusé) ou médicale (diagnostiquer et traiter) relèvent de cette démarche. Dans la pratique, cependant, les deux perspectives sont combinées, puisque des fréquences statistiques observées dans le passé sont intégrées dans des raisonnements de type bayésien. L'opposition philosophique entre les deux points de vue n'interdit pas leur articulation.

La partie pour le tout : la méthode des sondages

Les modes de raisonnement mathématiques et probabilistes évoqués ci-dessus avaient déjà été en grande partie mis en œuvre par Laplace et Gauss au début du XIX^e s., dans des recherches sur les degrés de confiance à accorder aux mesures astronomiques. Le mot « statistique », qui désignait alors une activité très différente de la leur, n'apparaissait bien sûr pas sous leur plume. Le problème de la statistique descriptive et numérique du XIX^e s. était d'asseoir la légitimité et la crédibilité d'une démarche qui suscitait encore souvent le dédain ou les railleries. En ce temps, seule l'exhaustivité de l'investigation pouvait garantir la sérieux de la statistique. Or, dès la fin du XVIII^e s., avaient été imaginées, notamment par Laplace, des méthodes de mesure de la population du Royaume à partir d'échantillons (Brian, 1994). Sachant que le nombre total annuel des naissances était connu grâce aux registres paroissiaux, mais qu'il était jugé impossible de recenser toute la population, un échantillon de paroisses judicieusement choisies permettait d'estimer un multiplicateur des naissances (rapport entre la population et les naissances annuelles). Par extrapolation à tout le pays, Laplace fournissait une évaluation de la population totale, dotée

d'une « erreur à craindre », ce que les sondeurs modernes appellent l'« intervalle de confiance », ou pour le public, la « fourchette ».

Cette méthode habile a été vivement critiquée, à partir des années 1820. Le raisonnement probabiliste était alors associé aux idées d'imprécision, d'incertitude et d'erreur. La valeur de la statistique naissante était garantie par ses liens avec l'État, le droit et l'administration, qui affectaient de façon sûre des cas à des catégories. Elle ne pouvait pas l'être par une science de l'incertain et de l'approximation. Pour cette raison, les enquêtes par sondage, théoriquement concevables à l'époque où Quételet et ses disciples aimaient une internationale des statisticiens, étaient alors jugées illégitimes. La critique portait notamment sur l'« hypothèse de l'urne unique », issue de Bernoulli et de sa loi des grands nombres. Celle-ci fondait, pour Laplace, la validité d'une estimation à partir d'un échantillon. Pour les critiques, rien ne justifiait qu'un pays aussi hétérogène à de très nombreux égards que la France puisse être assimilé à une seule classe d'équivalence, comme peut l'être une urne dans laquelle les boules ne diffèrent que par leur couleur, blanche ou noire. Il a fallu que, vers la fin du XIX^e s., commencent à être construites des législations sociales diverses traitant l'ensemble de la population selon des principes équivalents, pour que l'enquête par sondage (alors appelée « dénombrement représentatif ») redevienne concevable. C'est d'ailleurs dans le cadre explicite de la mise en place de ces premières formes de l'État-providence que, en Norvège, en Angleterre et aux États-Unis, ces premières enquêtes ont été réalisées, entre 1895 et 1914, sans pour autant acquérir une grande notoriété.

Celle-ci vint plus tard, dans les années 1930, quand ces mêmes méthodes d'échantillonnage probabiliste ont été utilisées pour « mesurer l'opinion » ou prévoir les résultats des élections, par George Gallup aux États-Unis, puis par Jean Stoetzel en France. Le succès fut alors si grand que le mot « sondage » devint synonyme d'enquête d'opinion, notamment dans les débats sur le thème « pour ou contre les sondages ». Avait ainsi disparu le sens originel du mot, c'est-à-dire une technique d'échantillonnage, de remplacement du tout par une partie aléatoirement choisie de celui-ci. Alors que cette technique était connue mais illégitime au XIX^e s., elle est devenue banale au point d'être synonyme d'enquête portant sur les comportements politiques, puisque, à la veille d'un suffrage important, certains parlent de celui-ci, de façon paradoxale, comme d'un « sondage en vraie grandeur ».

Pourtant la question centrale de l'histoire longue de plus de deux siècles de la méthode des sondages a été de justifier, d'une manière ou d'une autre, le remplacement du tout par une (petite) partie de celui-ci. Cette justification a toujours oscillé entre deux pôles. L'un, interne, est le modèle de l'urne de Bernoulli et ses propriétés de convergence en probabilité. L'autre, externe, est la référence à une information distincte de celle fournie par l'échantillon. Au XVIII^e s., Laplace prend

appui sur un modèle probabiliste. En revanche, en 1895, le Norvégien Kiaer, réinventeur du « dénombrement représentatif », justifie sa méthode en comparant certains de ses résultats à ceux du recensement exhaustif de la population, supposés exacts, sans mentionner la théorie des probabilités. Dans les années 1920, l'Institut international de statistique, encore partagé sur l'usage des sondages, ne choisit pas entre la « méthode du choix aléatoire », clairement probabiliste, et une « méthode du choix judicieux », utilisée par l'Italien Corrado Gini (1884-1965), qui construit son échantillon en se référant à sept variables de contrôle connues par ailleurs. Ce débat est tranché en 1934 par Jerzy Neyman, qui démontre la supériorité du choix aléatoire, mais propose de compléter celui-ci par la stratification de l'échantillon, ce qui est une façon de combiner la méthode probabiliste avec une information antérieure. Plus tard, les controverses entre l'« échantillonnage aléatoire » (utilisé par les instituts de statistique publique) et l'« échantillonnage par quotas » (utilisé par les instituts de sondage privés) poursuivent encore sous une autre forme une querelle analogue. Enfin, dans les années 1980, ont été développées de nouvelles techniques de modélisation des échantillons, dont le principe est d'utiliser au maximum des informations fournies par d'autres sources, recensements ou fichiers administratifs. Ces méthodes permettent notamment de rendre significatifs et d'utiliser à des niveaux géographiques plus fins des échantillons construits *a priori* au niveau national. Ceci était auparavant plus difficile, et constituait une forte limitation de l'usage des sondages. Les deux modes de justification de la méthode sont donc aujourd'hui étroitement articulés l'un avec l'autre.

► ANDERSON M., *The American Census. A Social History*, New Haven, Yale Univ. Press, 1988. — ARMATTE M., *Histoire du modèle linéaire. Formes et usages en statistique et économétrie jusqu'en 1945*, Paris, EHESS, 1995 (thèse de doctorat à paraître). — BENZECRI J.P., *Histoire et préhistoire de l'analyse des données*, Paris, Dunod, 1982. — BRIAN E., *La mesure de l'État. Administrateurs et géomètres au XVIII^e siècle*, Paris, Albin Michel, 1994. — COUMET E., « La théorie du hasard est-elle née par hasard ? », *Annales ESC*, 3, mai-juin, 1970, p. 574-598. — DASTON L., « L'interprétation classique du calcul des probabilités », *Annales ESC*, 3, mai-juin, 1989, p. 715-731. — DESROSIERES A., *La politique des grands nombres. Histoire de la raison statistique*, Paris, La Découverte, 1993. — GIGERENZER G. et al., *The Empire of Chance. How Probability Changed Science and Everyday Life*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1989. — HACKING I., *The Taming of Chance*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1990. — PORTER T., *The Rise of Statistical Thinking*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1986. — STIGLER S., *The History of Statistics. The Measurement of Uncertainty Before 1900*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1986. — Coll. : INSEE, *Pour une histoire de la statistique*, t. 1 : Contributions ; t. 2 : Matériaux, éd. J. Affichard, Paris, Economica, 1987.

Alain DESROSIERES

→ Causalité classique ; Crise de la physique moderne ; Hasard ; Induction ; Probabilité [LOGIQUE/MATHÉMATIQUE] ; Probabilité [PHYSIQUE] ; Réfutabilité.

STÉRÉOCHIMIE

Quoi de plus semblable à une main droite qu'une main gauche ? Quoi de plus différent, aussi ? En 1874, deux jeunes chimistes, le Hollandais Van't Hoff et le Français Le Bel lancent la chimie à la conquête de l'espace. Alors que les modèles moléculaires du premier quittent la surface plane de la page pour construire des enchaînements de tétraédres, le second développe une théorie habile et sophistiquée sur la symétrie ou l'asymétrie des structures moléculaires. Bien que ces deux jeunes chimistes se soient rencontrés à Paris, chez Wurtz, leurs travaux ont été menés de façon indépendante. Certes, ils ne sont pas identiques et les démarches intellectuelles des deux chercheurs diffèrent sensiblement, mais ils se rejoignent sur le cas particulier et fondamental des structures comportant un atome de carbone. Bel exemple de ces cas de découvertes simultanées dont l'histoire de la chimie est riche et qui montre que la science était prête, à ce moment là, pour une telle découverte.

La préhistoire de la stéréochimie

La question de la géométrie des structures moléculaires hantait les chimistes depuis trois quarts de siècle. Dès les travaux de Dalton qui fondent la théorie atomique moderne, la disposition des atomes est un sujet de préoccupation. L'obtention d'une figure géométrique régulière séduit particulièrement le chimiste. Ampère proposera lui aussi un modèle de corps composés dans lequel la régularité de la structure justifie la stabilité particulière et la stœchiométrie de la réaction de formation du composé.

La question était cependant trop difficile pour l'époque, et ces propositions restent peu fécondes. La théorie atomique elle-même subit pendant tout le XIX^e s. des attaques sévères qui laissent les questions de géométrie à la marge des préoccupations. Quand le jeune normalien Pasteur, qui fut un brillant chimiste avant d'être un brillant biologiste, se penche sur la question, il reste prudemment éloigné des considérations théoriques hardies. À la suite des cristallographes qui connaissent la propriété de quelques cristaux de faire tourner le plan de polarisation de la lumière polarisée, il s'intéresse au « pouvoir rotatoire » des solutions de substances naturelles. Il en déduit que les structures moléculaires des substances ayant le pouvoir rotatoire doivent nécessairement être asymétriques, comme le sont la main gauche et la main droite. S'il donne des exemples concrets et macroscopiques de structures asymétriques (escalier à vis, demi-chaise), il ne propose aucun analogue au niveau moléculaire.

Les travaux fondateurs

Après le congrès de Karlsruhe de 1860, « l'hypothèse atomique » a acquis une solidité suffisante pour que la question de la géométrie des structures moléculaires soit à nouveau à l'ordre du jour. En 1874,

les travaux de Le Bel et Van't Hoff donnent une interprétation satisfaisante des cas d'isométrie géométrique connus, que ce soit l'existence d'isomères géométriques dans la série des dérivés de l'éthylène, ou le cas des isoméries « optiques » étudiées par Pasteur. Nous regroupons sous le terme isométrie de configuration ces cas particuliers. Cependant, l'accueil par la communauté de chimistes n'est pas immédiat. L'isométrie optique est alors considérée comme la plus petite, ou la plus insignifiante des isométries. Il faudra du temps pour que le pouvoir rotatoire opposé ou l'odeur différente des deux limonènes soit plus qu'une curiosité de laboratoire. On sait maintenant que les structures moléculaires organiques intéressant les biologistes possèdent de nombreux atomes de carbones asymétriques, et que leur synthèse doit prendre en compte leur géométrie, au risque de synthétiser le produit désiré en même temps que les millions d'autres isomères possibles, et souvent indésirables.

S'il on identifie assez vite des cas d'isométrie optique comportant un atome d'azote asymétrique, il faudra également du temps pour que l'isométrie optique s'élargisse à des structures éloignées de celle du carbone asymétrique, et de son tétraèdre. En 1911, le premier complexe octaédrique possédant l'asymétrie moléculaire est isolé dans le laboratoire de Werner, après plusieurs années de tentatives infructueuses. Après ce premier succès, les résultats se succéderont à un rythme étonnant.

La curieuse histoire de l'isométrie de conformation

Dès le travail fondateur de Le Bel, on s'était aperçu que le remplacement d'un atome unique et ponctuel par un groupement polyatomique comme le groupement méthyle posait un problème nouveau de géométrie dans l'espace. Le Bel avait déduit des résultats expérimentaux que le groupement pouvait être assimilé à un point, comme si le groupement pouvait tourner librement autour de la liaison.

Par ailleurs, un chimiste peu connu, Sachse, décédé à 31 ans, avait proposé dès 1890 pour le cyclohexane plusieurs dispositions possibles des atomes de carbone respectant le tétraèdre régulier pour chacun d'eux : nous les nommons aujourd'hui conformations chaise et bateau. Bien que le travail de Sachse ait été publié, aucun résultat expérimental ne venait étayer cette proposition. La notion de conformation a, de ce fait, été généralement ignorée des chimistes qui représentent un cyclohexane plan.

C'est la chimie physique qui va faire sortir de l'oubli la notion de conformation. En premier, la diffraction des rayons X sur du diamant valide l'hypothèse des chaises de Sachse. Puis, c'est la mesure des moments dipolaires qui permet de montrer que certaines conformations sont privilégiées et que la rotation autour des liaisons simples n'est pas aussi libre qu'on le pensait. La résonance magnétique nucléaire, développée depuis la Seconde Guerre mondiale, permet une analyse conformationnelle fine.

Bien que construites l'une et l'autre à la fin du XIX^e s., les notions de configuration et de conformation ont eu des développements très séparés. De nos jours, alors que les techniques spectroscopiques rapides permettent d'observer des espèces éphémères, et alors que les structures moins rigides que les structures tétraédriques et octaédriques sont mises en évidence, la frontière entre ces deux notions devient plus floue, la stéréochimie est désormais prise en compte dans sa globalité : elles participent l'une et l'autre à la définition de la forme de la molécule, forme qui, en biologie par exemple, est d'une importance fondamentale.

► COMPAIN J.-C., « Les travaux de Le Bel et Van't Hoff de 1874 et notre enseignement », *Bulletin de l'union des physiciens*, Paris, 1992. — PASTEUR L., VAN'T HOFF J.H. & WERNER A., *Sur la dissymétrie moléculaire*, 1860, 1883, 1887, 1912 ; rééd., 1986. — RAMSAY O.B., « Van't Hoff-Le Bel Centennial », *American Chemical Society*, Washington (DC), 1975.

Jean-Claude COMPAIN

→ Atome ; Cristal ; Molécule.

STRATIGRAPHIE

GÉOLOGIE

Si de tout temps l'homme s'est intéressé aux richesses que lui procurait le sous-sol, l'étude des couches de terrains et de leur distribution dans l'espace et le temps en vue de reconstituer l'histoire de la terre est une préoccupation qui ne remonte guère au-delà du XVII^e s. L'acte fondateur de la stratigraphie est la parution en 1669 du célèbre *Prodrome* de Nicolas Sténon (1638-1686). Le passage le plus important et le plus connu de ce petit traité d'à peine 78 pages est en effet celui où se trouvent formulés clairement et pour la première fois les principes de base de la méthode d'investigation des couches ou strates (le terme est de Sténon) de la terre. L'auteur, tirant les conséquences des observations minutieuses qu'il a faites en Toscane, admet que les couches sont le produit d'une sédimentation qui s'est opérée dans un fluide, qu'elles se sont déposées horizontalement et successivement du bas vers le haut, de sorte que leur séquence nous raconte une histoire. C'est la formulation du principe de superposition. Il déduit également qu'une même couche a le même âge sur toute son étendue, ce qui correspond à notre actuel principe de continuité. On a pu discuter de l'influence réelle des travaux de Sténon sur les développements ultérieurs de la géologie en invoquant l'oubli dans lequel ils seraient tombés, mais il est établi que son œuvre a été très tôt connue en Angleterre et de ce fait on doit considérer qu'elle représente, dès sa publication, un acquis définitif pour la science.

Toutefois une application des seuls principes énoncés par Sténon ne pouvait guère permettre autre chose que l'établissement de chronologies locales, circonscrites aux dépôts étudiés. Pour parvenir à

reconstituer une histoire de la terre, il était nécessaire de trouver un moyen permettant de synchroniser les séries observées dans les diverses régions du globe les unes par rapport aux autres.

Les premières synthèses ont consisté à retrouver, en des points de plus en plus éloignés, une même succession de roches, les plus importantes de ces roches étant appelées formations. Ce terme clef est introduit dans les sciences de la terre par Abraham Gottlob Werner (1749-1817), professeur à l'Académie des mines de Freiberg en Saxe et fondateur d'une discipline nouvelle, la géognosie. Cette dernière a pour objectif de décrire minutieusement les unités lithologiques du sous-sol, de leur donner un nom, de déterminer l'ordre de leur superposition et de s'efforcer de retrouver celui-ci latéralement de proche en proche. La démarche, fondée sur l'étude de la nature des couches de terrains, est donc purement lithostratigraphique. Elle s'enracine dans le savoir-faire des mineurs chez lesquels elle était en germe depuis le XVII^e s. Ses nombreuses observations conduisent Werner à adopter le modèle structural proposé avant lui par Johann Gottlob Lehmann (1713 ?-1767) et Georg Christian Füchsel (1722-1773), qu'il ne fait que compléter. Il divise le bâti souterrain en quatre grands ensembles lithologiques : la formation primaire (*Urgebirge*) dont il sépare la formation de transition (*Übergangsgebirge*), une formation secondaire (*Flötgebirge*), enfin une formation de délavage (*Aufgeschwemmtegebirge*).

Cependant la lithologie wernérienne ne pouvait pas à elle seule donner une véritable histoire de la Terre, parce qu'elle reposait sur une l'idée simple, mais fautive, selon laquelle un océan universel avait déposé non seulement les roches stratifiées et fossilifères, mais aussi le granite et toutes les roches cristallines. Ainsi, pour Werner, ardent défenseur de la théorie neptunienne, à chaque étape de l'histoire de la terre avaient été engendrées, au-delà des variations locales, dans un ordre de superposition constant, des formations générales qu'il s'agissait de retrouver et d'identifier partout où cela était possible. Toutefois, même s'il a fallu l'abandonner, l'utopie neptunienne est loin d'avoir été inutile. La certitude de retrouver les mêmes formations dans toutes les parties du globe a stimulé efficacement les nombreux élèves auxquels Werner a su communiquer son enthousiasme. Et s'ils ont dû finalement déchanter, le rêve qui les animait et plus encore les méthodes d'investigation sur le terrain qu'ils avaient héritées de la géognosie wernérienne ont largement contribué à mettre en place sa remplaçante, la stratigraphie paléontologique.

C'est en effet l'emploi des fossiles qui devait permettre d'introduire une chronologie dépassant la notion de faciès lithologique et rendant possible la corrélation à distance d'assises lithologiquement différentes. Le point de départ est le constat que les faunes et les flores fossiles changent d'une couche à la suivante. Cette découverte avait été faite de façon empirique à plusieurs reprises avant 1800, mais sans que l'on ait tiré véritablement parti. Citons Lister (1671), Woodward

(1695), de Sauvages (1751 et 1752), Füchsel (1761 et 1773) et surtout Arduino (1774 et 1783), « le plus moderne des géognostes du XVIII^e s. ». En 1780, Giraud Soulavie (1752-1813) forme le projet de bâtir une chronologie des terrains calcaires du Vivarais en utilisant plusieurs critères convergents, dont l'utilisation des faunes fossiles. Mais c'est Jean-André De Luc (1727-1817) qui franchit l'étape décisive en suggérant de façon beaucoup plus explicite qu'il est possible de dater les couches par les fossiles. Dans une lettre de 1798 adressée à Blumenbach, il parle de deux histoires collatérales, celle des couches et celle des êtres organisés, ce qui revient à postuler l'existence de deux échelles indépendantes d'identification des couches, l'une lithostratigraphique, l'autre paléontologique. C'est là l'un des fondements essentiels de la biostratigraphie. Mais pour qu'elle puisse permettre d'écrire l'histoire de la terre il fallait que l'échelle des faunes (et des flores) s'affranchisse totalement du critère lithologique. Ce qui s'accomplira par étapes successives. C'est d'abord la parution en 1811 du mémoire de Georges Cuvier (1769-1832) et Alexandre Brongniart (1770-1847) intitulé *Essai sur la géographie minéralogique des environs de Paris*. Ce travail marque un tournant capital, car les formations n'y sont plus décrites par leurs seuls caractères lithologiques, mais aussi par l'ensemble de leur faune (la formation du calcaire grossier, par exemple, renferme une faune très différente de celle de la formation de la craie). De son côté, William Smith (1768-1839) démontre de la même façon, dans un petit ouvrage qu'il publie en 1816 sur les *Strates identifiées par les fossiles organisés*, qu'à chacune des strates d'Angleterre correspond une association donnée de fossiles. Il donne une liste de dix-sept niveaux avec leur faune caractéristique, liste qu'il complètera l'année suivante en ajoutant encore dix autres niveaux. On a beaucoup débattu pour savoir à qui, des deux Français ou de l'Anglais, il fallait réellement accorder l'avantage de la découverte, car les premiers écrits de Smith sur la question avaient commencé à circuler dès 1799. Mais ces querelles de priorité, auxquelles les équations nationales ne sont pas totalement étrangères, sont finalement de peu d'intérêt. Tout au plus permettent-elles de faire remarquer que le problème préoccupait à cette époque beaucoup d'esprits et que la solution a pu être trouvée simultanément par plusieurs. Quoi qu'il en soit, l'ultime pas est franchi par Brongniart en 1821. Jusqu'alors, les synchronismes avaient été obtenus à l'intérieur de bassins sédimentaires. Dans un article portant « Sur les caractères zoologiques des formations », Brongniart montre que les fossiles d'une couche calcaire de la montagne des Fiz (chaîne du Buet) sont les mêmes que ceux de la craie et précise alors que malgré leur lithologie différente, il considère ces deux terrains comme étant de même âge. Des deux critères, lithologique ou paléontologique, c'est donc le dernier qui lui paraît le plus fiable. Ainsi grâce à ce principe, pour la première fois une corrélation était obtenue entre deux formations géographiquement très éloignées dont l'une appartenait à une plate-forme

sédimentaire, l'autre à un orogène. L'année suivante, Conybeare et Phillips font paraître leurs *Éléments de la géologie de l'Angleterre et du Pays de Galles* dans lesquels ils exposent le principe des datations paléontologiques à distance, qu'ils ont parfaitement compris. Et pour la plupart des formations qu'ils décrivent ils donnent des listes de fossiles spécifiques. Désormais, faire l'inventaire complet de la faune (et de la flore) de chaque formation devient une priorité à laquelle s'attelle la communauté géologique (même s'il y eut des combats d'arrière-garde de la part de ceux qui continuèrent à nier l'importance des fossiles). Durant la deuxième moitié du XIX^e s., la stratigraphie va s'emparer progressivement de toutes les formations de la surface émergée du globe, les dater et les corréler.

Grâce aux progrès enregistrés par la stratigraphie paléontologique, la division du bâti terrestre en terrains primitifs, de transition et secondaires héritée de la géognosie wernérienne cède la place à des subdivisions plus fines en ères et systèmes. En 1822, Conybeare crée le terme de Carbonifère pour désigner le terrain à charbon de l'Angleterre. La même année, les formations de la craie sont appelées Crétacé par d'Omalius d'Halloy. Ces deux noms font encore référence à la lithologie des terrains, et c'est l'ultime trace laissée dans la nomenclature stratigraphique par la démarche lithostratigraphique. Alexandre Brongniart introduit le nom de Jurassique en 1829 et Alberti celui de Trias en 1834. Quatre ans plus tôt, le Tertiaire avait été divisé par Deshayes en trois systèmes, aussitôt baptisés Éocène, Miocène et Pliocène par Lyell. De nouvelles classifications générales apparaissent. La plus complète du genre publiée avant 1830 est le *Tableau des terrains qui composent l'écorce du globe* de Brongniart (1829) dans lequel l'auteur propose une nomenclature tirée du grec pour désigner les classes des terrains stratifiés. À mesure que les connaissances stratigraphiques s'accroissent et que les classifications se multiplient, la nécessité d'introduire des subdivisions de troisième ordre qui puissent permettre l'établissement de corrélations et de synchronismes de pays à pays se fait sentir. C'est à ce besoin que répondent les étages proposés par Alcide d'Orbigny (1802-1857) dans deux ouvrages essentiels : le *Cours de paléontologie et de géologie stratigraphiques* (1849) et le *Prologue de paléontologie stratigraphique universelle* (1850-1852). D'Orbigny subdivise les terrains paléozoïques (primaires), triasiques, jurassiques, crétacés, tertiaires et contemporains en vingt-huit étages successifs qu'il désigne par des adjectifs rappelant une localité-type et terminés par la désinence -ien. Les véritables promoteurs de ces noms de localités homophones en -ien sont en réalité Woltz et Thurmann qui ont commencé à les employer dès 1832 (avec Kimméridgien, Portlandien et Oxfordien), puis en 1835 (avec Néocomien). Mais d'Orbigny est le premier qui parvient à se dégager entièrement des nomenclatures lithologiques ou mixtes en substituant à la notion de formation une notion chronologique. Pour lui, l'étage désigne non plus une roche, mais une durée, une

époque caractérisée par une faune donnée et des faciès aussi différents que ceux de notre Globe actuel. C'est encore l'acception actuelle du terme d'étage, même si, pour d'Orbigny, celui-ci correspondait à une période de repos séparée par deux catastrophes de renouvellement, ce qui n'est plus admis aujourd'hui.

Après d'Orbigny les efforts se poursuivent pour tenter de perfectionner et surtout d'unifier le système, le but recherché étant l'établissement d'une échelle stratigraphique internationale permettant de synchroniser toutes les séries d'un bout à l'autre de la terre. Les premières tentatives dans ce sens sont les *Tableaux synchronistiques* publiés par Mayer entre 1864 et 1868. En 1874 paraît le *Tableau des terrains sédimentaires* de Renevier. Des congrès géologiques internationaux commencent à se réunir et permettent de confronter les opinions. Lors du premier d'entre eux, qui se tient à Paris en 1878, une commission internationale est nommée pour l'unification de la nomenclature géologique, mais au cours des congrès suivants les discussions montrent surtout des divergences. Convaincus malgré tout des grands avantages qu'offrirait l'adoption d'une échelle stratigraphique uniforme, Munier-Chalmas et Lapparent publient en 1894 une *Note sur la nomenclature des terrains sédimentaires* dans laquelle ils proposent une classification révisée, applicable pour le monde entier. C'est l'effort le plus notable tenté depuis d'Orbigny. La même année, Renevier présente son *Chronographe géologique*, nouvelle édition du *Tableau de 1874* enrichie de nombreuses nouveautés (avec notamment l'apparition de la gamme des couleurs conventionnelles admises par les congrès internationaux) et accompagnée d'un texte explicatif ainsi que d'un répertoire stratigraphique universel rédigé en plusieurs langues. Il aura donc fallu attendre l'extême fin du XIX^e s. pour être en possession d'une véritable échelle stratigraphique internationale. Mais si cette échelle rendait effectivement compte de la succession des dépôts, des faunes et des flores, elle ne donnait cependant encore aucune indication quant à la durée réelle des temps géologiques. Ce n'est qu'avec l'avènement, au siècle suivant, des méthodes fondées sur l'utilisation des isotopes radioactifs que la chronologie relative, fruit d'une œuvre collective unique en son genre, sera complétée par une chronologie absolue.

- ELLENBERGER F., *Histoire de la géologie*, Paris, Technique et Documentation-Lavoisier, 2 vol., 1988-1994. — GIGNOUX M., *Géologie stratigraphique*, Paris, Masson, 1^{re} éd., 1926. — GOHAU G., *Histoire de la géologie*, Paris, La Découverte, 1^{re} éd., 1987. — LAFFITE R., « La Notion stratigraphique d'étage », *Colloque sur les méthodes et tendances de la stratigraphie*, Orsay, sept. 1970, *Mémoires du BRGM*, 1972, n° 77, t. 1, p. 17-25. — MARCOU J., « Sur les équations personnelles et nationales dans les classifications stratigraphiques », *Bulletin de la Société géologique de France*, 3^e série, t. 25, 1897, p. 803-830. — TATON R. dir., *Histoire générale des sciences*, Paris, PUF « Quadrige », 1^{re} éd., 4 vol., 1995.

STRUCTURE
MATHÉMATIQUES

Le mot « structure » est malaisé à définir, et le mieux est de recourir à une métaphore architecturale. C'est l'articulation entre les diverses parties, au moyen de liaisons rigides qui restent le plus souvent cachées. C'est l'ossature ou la charpente du bâtiment, ce qui lui donne sa stabilité et sa cohésion, mais pas nécessairement son sens. La structure est indifférente aux charmes plus superficiels de l'apparence et de l'habillement, c'est l'envers du décor. Dans les arts, la structure est le canevas, la construction sous-jacente à la représentation créée. Renversant une tradition établie de longue date, de nombreux artistes du XIX^e s. ont rendu la structure manifeste – et elle subsiste parfois seule dans l'art non figuratif. Dans le domaine historique, « structurel » s'oppose à « conjoncturel ». En science, la structure est le mécanisme permanent caché derrière les apparences changeantes, ce qui sous-tend et explique les analogies.

Parti des sciences « exactes » (géologie, chimie...), le structuralisme a migré vers les sciences humaines. Il eut son heure de gloire en linguistique, psychologie, ethnologie... mais nous obéirons à l'adage *sutor, ne ultra crepidam*. Nous nous restreindrons donc au champ mathématique, où le structuralisme est l'idéologie propagée par Bourbaki, et mise en œuvre dans son grand traité. Il est étroitement mêlé à l'axiomatique et au formalisme, dont il a été souvent mal distingué. Les déclarations des principaux acteurs sur ce sujet sont étonnamment datées. Bourbaki, directement ou par les voix de Weil et Dieudonné, s'est exprimé vers 1950, alors qu'il n'était qu'à mi-parcours de son entreprise : de plus, il est souvent plus programmatique que philosophique.

Maintenant que Bourbaki représente un chapitre de l'histoire des idées que l'on peut considérer comme clos, le moment est venu d'un bilan mathématique et philosophique.

Naissance des structures

Science descriptive et science structurelle. – Une science commence souvent par le stade descriptif : on accumule observations, notations, collections, et l'on établit les premières classifications. La physique, la géologie, la botanique, parmi bien d'autres sciences, sont à ce stade vers la fin du XVIII^e s. Goethe – qui contribua de manière significative à ces trois sciences – fut le théoricien de cet idéal d'une science descriptive. Ce n'est qu'au XIX^e s. qu'elles deviendront progressivement structurelles. Citons Dieudonné (*Abrégé*, p. 12) qui, décrivant l'évolution des mathématiques, met en évidence des caractères généraux des sciences : « La compréhension en profondeur d'un phénomène rencontré en mathématiques est due, le plus souvent, au fait que l'on parvient à l'insérer dans un cadre plus général... L'histoire de toutes les théories mathématiques débute invariablement

par l'étude d'objets particuliers, nombres, figures ou fonctions, dont chacun est considéré isolément ; lorsqu'on commence à les grouper, c'est plutôt à la manière des premiers naturalistes, classant les espèces animales ou végétales en se basant sur des analogies apparentes ou extérieures. Une étude plus poussée fait ensuite apparaître des propriétés plus cachées, souvent difficiles à cerner exactement... et des parentés plus subtiles que les ressemblances fortuites du début apparaissent ; il est frappant de constater combien ont été fréquents les cas où est restée totalement insoupçonnée, pendant de longues années, la nature commune de certaines notions, qui nous paraît aujourd'hui "évidente". » La structuration d'une science permet de rassembler une multitude de résultats épars, en discernant les notions vraiment fondamentales, et leurs articulations ; peut-être la recherche des mécanismes prend-elle ici souvent le pas sur une compréhension plus philosophique.

Examinons rapidement de ce point de vue le développement de quelques sciences. Le chimiste découvre d'abord les lois des équivalents, d'où la notation chimique, qui n'est qu'une comptabilité bien faite : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 \cdot \text{H}_2$. Progressivement, les symboles C, O, H prennent vie et s'incarnent en atomes. La stéréochimie introduit un niveau supérieur de compréhension, les atomes devenant des lieux de structures géométriques : la chimie est devenue structurelle – avant que les atomes eux-mêmes n'acquiescent une structure interne, dont seule la mécanique quantique dévoilera la rationalité profonde. L'introduction de la dimension historique en géologie – couches, plissements, sédimentation – permettra l'intégration d'une énorme masse d'observations ; le niveau suivant de structure, avec en prime une explication des volcans et des séismes, devra attendre le modèle de la tectonique des plaques. La planétologie comparée, qui est maintenant possible, devrait permettre l'élaboration d'un modèle global de la Terre et de son histoire. En biologie, la structuration passe par plusieurs étapes bien connues : paléontologie comparative, évolutionnisme, hérédité, biologie moléculaire.

Restons plus près des mathématiques. Dans le domaine musical, deux notions théoriques fondamentales sont celles de hauteur d'un son et d'intervalle musical. La réflexion à ce sujet, commencée avec Pythagore, trouve un achèvement provisoire avec Euler (*Théorie de la musique*, 1739). Entre-temps, il a fallu se débarrasser des apparences – longueur des cordes et des tuyaux – pour arriver à l'élément structural : ce qui caractérise la hauteur d'un son a est une fréquence ν_a et la formule d'Euler $I(a,b) = \log_2(\nu_a/\nu_b)$ donne l'intervalle de a à b mesuré en octaves. Cette dernière formule est une règle opératoire conventionnelle, non une loi physique, mais elle fonde rigoureusement une pratique. L'histoire de la mécanique céleste peut s'articuler autour de quelques étapes de structuration : le système géocentrique d'Aristote, l'héliocentrisme d'Aristarque, les épicycles de Ptolémée, les trajectoires elliptiques de Kepler. Ce sont autant de montées vers la rationalité, des lois de plus en plus englobantes qui

culminent dans la loi de gravitation universelle de Newton. Celle-ci gouverne les deux mondes, la sphère céleste et notre monde sublunaire, qui obéissent à la même dynamique. Est-ce pour autant une explication ? Il faut encore deux siècles pour qu'Einsteins isole l'élément structurant, sous la forme d'une métrique pseudo-riemannienne sur l'espace-temps, incarnée dans le tenseur symétrique $g_{\mu\nu}$. Nous examinerons plus loin le développement de l'optique ; il faut attendre Maxwell et Minkowski pour découvrir l'élément structurant, sous la forme du champ électromagnétique incarné dans le tenseur antisymétrique $F_{\mu\nu}$. On a là les deux théories des champs classiques, gravitation et électromagnétisme, et Einstein a cherché en vain l'élément structurant qui les unirait.

Propriétés métriques et déplacements en géométrie euclidienne. – Un point souvent souligné de l'histoire de l'Algèbre est le suivant : au XIX^e s., les opérations deviennent un sujet d'étude mathématique en soi, indépendamment des objets auxquels elles s'appliquent. On a vu là le cheminement principal vers la mathématique des structures. C'est un autre cheminement que je voudrais retracer qui, de Poncelet à Klein et à Hilbert, élargit les enjeux de la géométrie, et introduit la notion d'isomorphisme comme constitutive de celle de structure.

La notion de transformation géométrique s'est d'abord imposée comme transformation de point à point. La notion de déplacement (rigide) est implicite dans celle d'égalité des figures (triangles par exemple) ; elle acquiert une existence propre pour les besoins de la cinématique (avec l'étude de la toupie par Euler). Immédiatement surgissent deux questions : Quelle est la forme générale d'un déplacement ? Quels sont les éléments laissés invariants par les déplacements ? La réponse à la première est assez facile (rétrospectivement) : les déplacements forment un groupe – on peut les composer, et à tout déplacement correspond un déplacement inverse, qui ramène les choses dans leur état initial. De plus, tout déplacement est composé d'une translation et d'une rotation autour d'un axe, deux catégories de déplacements qui s'étaient déjà imposées. Répondre à la deuxième question revient à décrire les propriétés métriques des figures ; elles sont de nature quantitative – distances et angles – ou qualitative – parallélisme, orthogonalité... Il est remarquable que toutes ces notions se ramènent en définitive à celle de distance, qui est donc l'élément structurant : par exemple en notant $|ab|$ la distance de a à b , c'est-à-dire la longueur du segment ab , l'orthogonalité des segments ab et ac s'exprime par la relation de Pythagore $|bc|^2 = |ab|^2 + |ac|^2$.

Les propriétés métriques et les déplacements se font face : les propriétés métriques sont celles qui sont invariantes par les déplacements, et les déplacements sont les transformations de l'espace qui respectent les propriétés métriques. Pour dépasser ce *circulus vitiosus*, deux attitudes sont possibles : si l'on suit F. Klein, dans son programme d'Erlangen (1867), le groupe des

déplacements est la donnée première, il définit la géométrie euclidienne. Dans l'optique structurale au contraire, on choisit un élément structurant qui est ici la distance de deux points. Ce sera la tâche de Bourbaki de définir avec précision ce qu'est un élément structurant, et le groupe correspondant d'automorphismes de la structure. Ici les automorphismes sont les isométries, c'est-à-dire les transformations de l'espace qui appliquent tout segment sur un segment de même longueur. Mais surgit une formidable difficulté : déplacement et isométrie ne sont pas synonymes. Klein y répond par un décret : le champ de la géométrie euclidienne est défini par la donnée du groupe des déplacements, non celui des isométries. Du point de vue structural, il nous faut décrire un nouvel élément structurant, qui sera laissé invariant par les déplacements, mais non par les antidéplacements (les isométries qui ne sont pas des déplacements). L'élément cherché sera fourni par l'orientation de l'espace. G. Châtelet a analysé d'un point de vue philosophique l'histoire tortueuse de ce concept au XIX^e s. Pour faire bref, utilisons la notion de repère euclidien (un point auquel sont attachés trois axes orthogonaux). Moyennant une analyse soignée de la déformation continue des repères (qui n'appartient pas à la géométrie « élémentaire »), ou, ce qui revient au même, moyennant l'organisation de l'ensemble des repères en un espace géométrique, on constate que les repères forment deux familles connexes. Chacune de ces familles définit une orientation de l'espace ; un déplacement respecte chacune des orientations, et un antidéplacement les échange. De manière analogue, les isométries se répartissent en deux familles connexes, les déplacements et les antidéplacements. Ce détour par les repères sera développé par Ehresmann vers 1940, par l'introduction des fibres principaux et de la réduction du groupe structural ; on aura ainsi un outil très performant de définition et de subordination de géométries, réconciliant le point de vue de Klein et le point de vue structural.

Nous pouvons alors examiner d'un œil neuf une difficulté qui avait beaucoup troublé Kant : la distinction entre la gauche et la droite. Que signifie l'assertion que la distance est un élément structurant suffisant pour les isométries ? Une réponse pragmatique est la constatation que pour chacune des propriétés invariantes par isométrie que l'on rencontre, un jeu de réductions successives permet d'en ramener la vérification à une série de mesures de longueurs et à la satisfaction de certaines relations numériques entre ces longueurs. La preuve *a priori* de cet état de fait suppose l'élaboration d'une langue logique précise pour exprimer les propriétés géométriques, et une analyse syntaxique fouillée pour assurer la réduction de toutes les propriétés (iso)métriques à la notion de distance. En ce sens, les propriétés relatives à l'orientation ne sont pas réducibles aux mesures de distances. Ainsi, la symétrie par rapport à un plan, telle qu'effectuée par la réflexion dans un miroir, échange les deux orientations – comme la symétrie par rapport à un point, mais à l'inverse d'une symétrie par rapport à une droite. Par suite, une

main gauche et une main droite sont isométriques, mais n'ont pas la même orientation. La géométrie euclidienne « interne » est la même pour les deux mains, seule la confrontation permet de les distinguer. Pour Kant, chacune des mains était pourvue d'une qualité « gauche » ou « droite » irréductible à l'analyse logique ; il fallait un recours à l'intuition sensible. Pour nous, les trois premiers doigts d'une main, pris dans l'ordre, pouce, index, majeur, forment un repère qui définit une orientation de l'espace. Toutes les mains gauches (ou droites) définissent la même orientation, que l'on peut nommer « gauche » (ou « droite »). La distinction entre les deux orientations s'analyse logiquement ; que l'une s'appelle « gauche » et l'autre « droite » est une convention nominale, et elle ne peut que se constater. C'est là le dernier recours à l'intuition sensible qui a tant obsédé Wittgenstein.

Modèles et isomorphismes en géométrie. — Le développement des méthodes de la perspective, mathématisées par Desargues, impose l'idée d'un relativisme en géométrie : le même objet peut être représenté de divers points de vue, qu'il importe de coordonner en dégageant les éléments invariants. Pour la géométrie d'Euclide, la notion d'égalité des figures se fonde sur les déplacements — auxquels on peut adjoindre les anti-déplacements pour rendre compte des symétries. À l'époque grecque classique, l'idée est familière d'objets de même forme, et de dimensions différentes ; l'élément structurant est ici le rapport de deux longueurs et ceci correspond à l'idée qu'il n'y a pas d'unité de longueur « naturelle » (voir ci-dessus la réponse nominaliste au kantisme ; la domination du point de vue cartésien a occulté ce point et rendu incompréhensible au mathématicien courant le sens et l'utilité de l'analyse dimensionnelle du physicien). Le groupe correspondant est celui des similitudes, qui inclut en particulier déplacements et homothéties. Les angles sont invariants par les similitudes ; la géométrie conforme ne garde que les angles comme élément structurant. Elle correspond au groupe conforme, qui inclut l'inversion par rapport à une sphère ; notons seulement que la notion de droite n'est plus intrinsèque dans cette géométrie, ce n'est qu'une forme limite du cercle (qui, lui, est intrinsèque).

Cette hiérarchie de géométries — euclidienne, des similitudes, conforme — répond à un élargissement progressif du groupe qui leur correspond au sens de Klein. Autrement dit, on se permet de donner d'un objet une classe de représentations de plus en plus déformées, avec de moins en moins d'invariants. L'idée qui domine la géométrie du XIX^e s. est d'inclure tous ces groupes dans celui des projectivités, qui gouverne les propriétés projectives des figures. Les propriétés métriques des figures planes correspondent ainsi aux propriétés projectives de ces figures auxquelles on adjoint les deux points cycliques (deux points imaginaires à l'infini, communs à tous les cercles). Les autres géométries se distinguent aussi par l'introduction d'un absolu particulier, qui joue le même rôle que les points cycliques.

On peut fonder la géométrie projective sur deux notions structurantes : 1) La propriété qualitative pour trois points distincts d'être alignés (situés sur une même droite). 2) La propriété quantitative du birapport de quatre points a, b, c, d distincts et (trois à trois) alignés ; il est donné par $\pm \frac{ac|bd}{ad|bc}$, affecté d'un signe qui dépend de l'ordre dans lequel on rencontre les points sur une droite. Mais la géométrie projective (plane, par exemple) est gouvernée par un principe de dualité. On sait qu'à la notion de droite formée de points correspond dualement celle de pinceau de droites (celles qui passent par un point donné) ; on peut définir le birapport de quatre droites distinctes appartenant à un même pinceau ; on sait aussi qu'il existe des corrélations, par exemple la transformation par polaires réciproques. La signification des corrélations est la suivante : on peut organiser l'ensemble des points d'un plan par la relation de colinéarité, et par le birapport ; on peut structurer de manière analogue l'ensemble des droites d'un plan, par la relation de concurrence, et le birapport. Une corrélation est une correspondance biunivoque entre les éléments de ces deux géométries, qui réalise un isomorphisme de ces deux structures. Autrement dit, la même géométrie peut s'incarner dans un ensemble de points et dans un ensemble de droites, fort dissemblables *a priori*.

La géométrie non euclidienne de Lobatchevski n'a été légitimée que lorsqu'on en a décrit un modèle euclidien. Le modèle le plus simple à décrire est celui de Poincaré : les points non euclidiens sont les points d'un demi-plan euclidien, et les droites non euclidiennes sont les demi-cercles orthogonaux à la droite qui borde le demi-plan ; les angles restent les angles. La circonstance intéressante est la multiplicité des modèles ; cependant, deux modèles sont toujours isomorphes en ce sens qu'on peut réaliser une correspondance biunivoque entre les points de l'un et les points de l'autre, qui conserve tous les éléments de structure : droites, angles, longueurs... La géométrie non euclidienne, tout comme la géométrie euclidienne, est un système axiomatique fermé, en ce sens que deux modèles sont toujours isomorphes. Le fait qu'on ne puisse pas déduire l'axiome des parallèles (« postulat d'Euclide ») des axiomes restants montre que ceux-ci forment un système axiomatique ouvert : la « pangéométrie » de Lobatchevski qu'ils décrivent admet plusieurs modèles non isomorphes.

Vers la fin du XIX^e s., c'est une idée familière, particulièrement développée par Lie, qu'on peut organiser en « géométrie » une classe d'objets géométriques : par exemple, les cercles d'un plan peuvent jouer le rôle de points dans une variante de la géométrie de Lobatchevski à trois dimensions, les familles de cercles connues sous le nom de pincesaux jouent le rôle des droites. Lie a aussi étudié la géométrie de l'ensemble des sphères dans l'espace à trois dimensions. La géométrie des droites dans cet espace est particulièrement riche, comme l'a montré Hamilton à propos d'optique. Depuis l'Optique d'Euclide, on assimile les rayons lumineux aux droites ; reformulée dans notre langage

géométrique moderne, la découverte de Hamilton revient à dire que l'ensemble des rayons lumineux est un « espace homogène symplectique ». Plus précisément, l'espace des droites est à quatre dimensions, celui des déplacements est à six, un déplacement transforme droite en droite, et étant données deux droites, il y a un déplacement qui transforme la première en la deuxième : voilà pour un « espace homogène ». La structure symplectique est un tenseur antisymétrique d'ordre 2 ; de manière intuitive, un triangle infinitésimal de la géométrie, formé de 3 droites infiniment proches, possède une aire (infinitésimale). On aura remarqué que cette structure est infinitésimale (et *a fortiori* de caractère local) ; on sait, depuis Gauss et Riemann, que la géométrie euclidienne est, elle aussi, infinitésimale, étant tout entière construite sur la donnée de la longueur des segments infinitésimaux. La géométrie euclidienne est rigide : si l'on transporte un objet, aussi petit soit-il, d'une position à une autre, il y a un unique déplacement de l'espace tout entier qui réalise ce transport. Hamilton a découvert les transformations symplectiques (qu'il appelait canoniques) : dans un système optique, aussi compliqué soit-il, l'ensemble des rayons lumineux qui frappent l'objectif forme une région de l'espace des droites, et il en est de même pour l'oculaire ; l'instrument d'optique réalise donc une transformation d'une région de l'espace des droites vers une autre, qui respecte l'élément infinitésimal structurant (les aires des triangles). Mais en général, cette transformation n'est pas réalisée par un déplacement et permet beaucoup de distorsions : il est faux que les points de l'objet et de l'image se correspondent avec conservation des distances, et l'existence des aberrations permet à un point de l'objet de donner une tache dans l'image. La géométrie symplectique n'est donc pas rigide, et il faut distinguer isomorphismes globaux et locaux, ces derniers dépendant d'une infinité de paramètres.

Le modèle mathématique de l'optique décrit par Hamilton résulte donc d'une structuration de l'espace des droites, identifiées aux rayons lumineux. Mais la lumière est pourvue d'autres qualités ; sans parler de l'intensité lumineuse, l'expérience du prisme et l'arc-en-ciel mettent en évidence la couleur. Cette dernière qualité est analogue à la hauteur des sons, et elle sera expliquée par l'introduction des longueurs d'onde, de un concept de la même classe que la fréquence. Depuis Fresnel et Maxwell, l'optique moderne est ondulatoire, et l'élément structurant est le champ électromagnétique qui a son support dans l'espace-temps (car c'est un objet dynamique).

Bourbaki et la restructuration des mathématiques

La théorie naïve des ensembles. — Lorsque Bourbaki se lance dans son entreprise vers 1935, il est animé d'un sentiment d'urgence — lié sans doute à la montée des menaces de guerre. Il veut nettoyer les écuries d'Augias mathématiques en reconstruisant l'édifice selon le point de vue des structures (voir le manifeste-programme

publié en 1947 dans les *Grands courants de la pensée mathématique*). En comparant avec les écrits contemporains de Lautman et de Cavailles — très proches du groupe — il est clair que Bourbaki, à défaut d'une définition précise d'une structure mathématique, perçoit les nécessités de son entreprise de refondation. Elle se déroule en deux temps : on pare au plus pressé en publiant dès 1939 le *Fascicule de résultats de théorie des ensembles*, et l'on attendra les années 1950 pour faire paraître le livre I du traité, consacré à la *Logique et la théorie des ensembles*.

Le *Fascicule*, de moins de 40 pages, décrit la théorie « naïve » des ensembles, c'est-à-dire les règles opératoires qui permettent de manipuler les ensembles, et d'en construire de nouveaux à partir d'ensembles donnés. Il fixe aussi une terminologie restée jusque-là mouvante, avec quelques créations heureuses : injectif, surjectif, bijectif. Il codifie les nombreuses « applications canoniques » courantes, et se termine par une courte section décrivant les structures et leurs espèces en termes encore généraux, mais non ambigus. Le fascicule a été si fermement conçu qu'il ne subit que peu de modifications au cours des rééditions successives et qu'il fournit bien le soubassement désiré pour le reste du traité.

Bourbaki a fait des choix drastiques. Le fait d'inclure une section sur les ensembles ordonnés dans le « fascicule » manifestait son intention de ne pas développer ultérieurement cette théorie. Ce choix allait à l'encontre d'une tendance forte à l'époque — Birkhoff, Glivenko — et empêchait Bourbaki d'entrer dans le champ de la combinatoire. Ce domaine, énorme et disparate, riche en applications dans et hors les mathématiques, sera structuré dans les années 1960 par G.C. Rota, dans un esprit très fidèle à Bourbaki. Il est encore plus surprenant de ne pas trouver mention des ordinaux et des cardinaux dans un livre consacré à la théorie des ensembles ; la récurrence transfinitie y est remplacée par l'usage systématique du théorème de Zorn ; c'était retrancher beaucoup dans l'héritage de Cantor. Là, l'histoire a justifié ce choix : la mathématique courante utilise comme une base suffisante la théorie « naïve » des ensembles, qui représente un acquis définitif ; la théorie des ensembles proprement dite n'est plus l'affaire que d'un nombre restreint et assez isolé de spécialistes.

La première partie de Bourbaki : une synthèse.

— Lorsque paraît Bourbaki, la méthode axiomatique n'est pas nouvelle. Les *Grundlagen der Geometrie* de Hilbert ont servi de modèle. L'algèbre, grâce aux efforts de l'École allemande — Artin, E. Noether, Krull, Hasse, Deuring, Van der Waerden... —, a pris un tour fortement axiomatique, et le traité de Van der Waerden (1930-1931) en a donné une présentation systématique. Après des efforts préliminaires de Hilbert et de Weyl, et l'œuvre de pionnier de Fréchet, la topologie générale a été axiomatisée par Hausdorff (1927). Le calcul des probabilités — et donc indirectement l'intégrale et la mesure — a reçu un traitement magistral dans l'ouvrage

de Kolmogoroff (1933). La *Théorie des opérations linéaires* de Banach est publiée en 1932, et Pontrjagin publie son ouvrage sur les groupes topologiques en 1939. La théorie des espaces de Hilbert et des opérateurs qui y agissent est exposée de manière axiomatique et systématique par M. Stone (1932) et von Neumann (1932).

Pour composer sa première partie (livres II à VI), Bourbaki pourra puiser dans tous ces travaux. Ce qui est nouveau est la volonté encyclopédique de rassembler tous ces champs de connaissance – algèbre, topologie, espaces fonctionnels, intégration – en les subordonnant au point de vue structural. Le mot « structure » revient comme une obsession ; l'ouvrage s'appelle *Les structures fondamentales de l'analyse* ; il y a des chapitres intitulés « Structures algébriques », « Structures topologiques », « Structures uniformes » et chaque définition comporte la litanie : « [...] un ensemble muni de la structure définie par la donnée... » Le plan de l'ouvrage est dicté par la conviction qu'un objet mathématique courant est le lieu d'un enchevêtrement de structures élémentaires ; à la manière d'un chimiste, on exposera donc d'abord les propriétés des espèces simples avant de décrire les espèces composées.

Le résultat est assez surprenant. Les classifications traditionnelles, algèbre, géométrie, analyse..., sont écartées (au moins en apparence) et remplacées par un nouveau déroulement : groupes, anneaux, corps, espaces vectoriels, espaces topologiques, espaces normés..., qui sera repris par toute une génération de manuels. Les lieux familiers de la mathématique, nombres réels ou complexes, espace euclidien..., représentent des structures si complexes qu'on ne peut les aborder que très tard. Il faut 3 000 pages de préliminaires avant de définir les nombres réels, et presque 2 000 pages supplémentaires avant d'aborder sérieusement l'intégrale. Bourbaki s'est imposé un ordre strictement linéaire, chacun des livres ne reposant que sur les précédents, et s'est interdit tout recours à une mathématique existant hors de lui. En fait, avec le temps il a dû biaiser et introduire un *leitfaden* plus compliqué ; la rigidité induite par ces principes de rédaction imposait une limite matérielle à la taille du traité, et c'est une des raisons de l'arrêt de toute publication par le groupe Bourbaki. Malgré ces réserves, l'ensemble du traité est un monument à l'austère beauté. Un standard a été créé, codifiant ce qui devrait être le bagage commun de tous les mathématiciens pour une assez longue période. Mais c'est un champ mort, et Dieudonné lui-même, dans un palmarès curieux, lui attribue une « densité bourbachique nulle ».

La deuxième partie de Bourbaki : une aventure interrompue. – Sur ce soubassement, on pouvait construire une mathématique plus ouverte vers l'avenir ; ce sera la tâche de Bourbaki après 1956, lorsque les fondateurs commenceront à se retirer. Dans son magistral article sur l'« Avenir des mathématiques », paru en 1947 (*Œuvres*, t. II, p. 359-372), Weil

trace les perspectives. Au sommet se trouve l'arithmétique avec ses grands problèmes ouverts : hypothèse de Riemann, corps de classes, « théorème » de Fermat. L'École allemande – Weber, Artin, Deuring, Hecke, Siegel – a commencé la structuration de ce domaine, et la clé en sera la géométrie sous toutes ses formes. Or un immense édifice géométrique fait partie de l'héritage, mais il demande une sérieuse consolidation : Géométrie algébrique italienne (Severi, Castelnuovo, Veronese...) en partie algébrisée par Dedekind, Weber, Krull... ; topologie algébrique fondée par Poincaré et développée surtout par Dehn, Alexandroff, Lefschetz ; groupes de transformations : la théorie fondée par Lie a fructifié entre les mains d'Élie Cartan et de Weyl ; fonctions de plusieurs variables complexes développées par Oka, Hartogs, Ahlfors..., relayés par Henri Cartan dans les années 1950 ; méthodes globales en géométrie différentielle, par Morse ou Hodge, s'appuyant sur les équations aux dérivées partielles ; théorie spectrale des opérateurs (il y a toujours l'espoir que les zéros de la fonction de Riemann soient des valeurs propres).

Cette consolidation sera achevée vers 1970, grâce à la parution d'ouvrages fondamentaux : *Foundations of Algebraic Geometry* (1946) par Weil ; *Theory of Lie Groups* (1946) par Chevalley ; *Foundations of Algebraic Topology* (1952) par Eilenberg et Steenrod ; *Homological Algebra* (1956) par H. Cartan et Eilenberg ; *Commutative Algebra* (1958-1960) par Zariski et Samuel ; *Topologie algébrique et théorie des faisceaux* (1958) par Godement ; et *Basic Number Theory* (1967) par Weil. Tous ces auteurs (sauf Steenrod et Zariski) sont membres actifs de Bourbaki, et tous ces livres ont été fortement influencés par les discussions internes à Bourbaki et les documents non publiés du groupe. Ajoutons que le séminaire Cartan donne le départ à une école internationale très vivante dans les fonctions de plusieurs variables complexes (Andreotti, Grauert, Douady..., tous proches de Bourbaki). Il n'est pas jusqu'en analyse fonctionnelle, où les contributions fondamentales de Dixmier, de Grothendieck et de Schwartz sont dans la stricte orthodoxie de Bourbaki ; les mathématiques industrielles en France ont été créées et dominées par J.-L. Lions, élève de Schwartz, et le style en mathématiques appliquées et analyse numérique à la française s'en ressent.

Bourbaki a espéré à plusieurs reprises traiter des sujets mentionnés ci-dessus. Mais, pour des raisons que nous analyserons plus loin, les développements précédents n'ont pu se faire (surtout en topologie) sans entorses sérieuses à la lettre, sinon à l'esprit structuraliste. Examinons pour le moment l'œuvre publiée de Bourbaki.

En géométrie différentielle, Bourbaki n'a publié qu'un long résumé, très charpenté, avec des définitions soigneuses de toutes les notions de base, dans la généralité maximale. L'héritage était très branlant : E. Cartan avoue vers 1935 que « la notion de variété est difficile à définir ». Le premier ouvrage décrivant en termes globaux et intrinsèques une variété est celui

de Chevalley (1946) consacré aux groupes de Lie. Il n'est pas inutile de rappeler l'importance de la relativité générale, où l'Univers est donné en soi, non plongé dans un réceptacle plus grand, et où le jeu des changements de coordonnées a permis la création de modèles pour les trous noirs. Une acquisition plus récente provenait du développement des espaces p -adiques, qui jouent un rôle central dans l'arithmétique à la Weil. Il fallait donc à Bourbaki un cadre assez général pour contenir toutes les théories connues (réelle, complexe, p -adique) sans oublier les variétés de dimension infinie (qui sont peut-être une illusion dans ce point de vue). Mais il lui fallait aussi résister aux sirènes de ceux (Eilenberg, Grothendieck) qui voulaient développer une théorie très générale des structures locales. Bourbaki s'est épuisé en vingt ans de discussions internes, oscillant entre les points de vue opposés ; l'ouvrage publié résulte d'un compromis et nul n'aura ensuite l'énergie d'entreprendre un exposé détaillé.

Au-delà de la définition des variétés, les grandes notions modernes de la géométrie différentielle (espaces fibrés principaux, et vectoriels, connexions, transport parallèle) sont la mise en forme de l'œuvre d'Élie Cartan, qui s'appuie sur Levi-Civita, et est influencé par Einstein et Weyl (relativité générale). Les définitions principales sont ici dues à Ehresmann, un extraordinaire inventeur de concepts, qui fut associé à Bourbaki de 1936 à 1947 (et fut l'un des plus fervents thuriféraires du point de vue structural). Ce sont ces mêmes notions, alliées aux groupes de symétrie, qui sont permis de structurer, dans les années 1970, la physique des particules élémentaires autour de l'idée de champ de jauge – non sans influence en retour sur le style des mathématiciens.

Weil, inspiré par Hodge, de Rham et Chern, a tôt compris comment ces notions vont renouveler la géométrie algébrique. Dans son ouvrage de 1946 sur les fondements de la géométrie algébrique il définit les variétés algébriques « abstraites » par recollement de variétés affines. La mise en œuvre, qui n'utilise pas explicitement la topologie, est certes maladroite et lourde. Mais la création de Weil est approfondie par Serre qui, en 1955, met au premier plan la topologie de Zariski et introduit les faisceaux cohérents, puis par Chevalley qui remplace une variété algébrique par son schéma, c'est-à-dire la collection des anneaux locaux associés à toutes les sous-variétés irréductibles. Les constructions de Serre et de Chevalley souffrent de restrictions gênantes, et c'est le génie de Grothendieck d'avoir compris qu'il fallait s'affranchir de toute espèce de restriction et considérer les schémas généraux obtenus par « recollement » d'anneaux commutatifs arbitraires.

Le livre de Bourbaki sur l'*Algèbre commutative* est en fait une juxtaposition de deux ouvrages. Les chapitres consacrés aux entiers, aux valuations et aux diviseurs fournissent le fondement de la théorie algébrique des nombres, dans la tradition de Kummer et Dedekind ; c'est ce qui reste du projet initial conçu par Weil. Les autres chapitres établissent les propriétés

algébriques des anneaux et des idéaux nécessaires à l'édification de la géométrie algébrique : cela résulte d'un partage explicite des tâches entre Bourbaki et Grothendieck, dont les *Éléments de géométrie algébrique* sont la suite de Bourbaki (Dieudonné sera la plume commune des deux séries d'ouvrages). En un sens, ce livre, bien que fidèle à la méthode axiomatique d'exposition, est le moins structural de la série : on y étudie en détail les propriétés de classes plus ou moins vastes d'objets déjà définis. La nouveauté principale est l'utilisation d'une forte dose d'algèbre homologique. Fidèle à son principe d'autosuffisance, Bourbaki présente, dans un volume additionnel à son Livre II, les bases de l'homologie ; il réussit le tour de force de le faire sans briser le carcan qu'il s'est imposé.

Le livre de Bourbaki sur les groupes de Lie est aussi très novateur. Lie a, dès 1890, solidement établi le lien réciproque entre les groupes et les algèbres de Lie, et les résultats sur la classification des algèbres de Lie simples ont été acquis dès la fin du XIX^e s. (Lie, Engel, Killing, Cartan). Les progrès de l'algèbre linéaire permettaient de refaire au XX^e s. un exposé plus synthétique et cohérent : Weyl ouvrit la voie dans ses leçons de Princeton en 1935 et son disciple Jacobson publia en 1962 un ouvrage de référence sur le même modèle. Il y a deux axes majeurs dans l'exposé de Bourbaki. Le premier est le lien avec les groupes dits de Coxeter. Ce géomètre canadien, aux goûts très classiques, a étudié à fond les polyèdres réguliers à 3, 4, 5... dimensions, les pavages réguliers et les groupes qui leur sont associés. Dès 1935, Coxeter (en collaboration avec Weyl) découvre que la classification des groupes de Coxeter est la même que celle des algèbres de Lie simples. Ce qui aurait pu être une simple coïncidence devient l'articulation essentielle dans le Livre de Bourbaki – qui est le premier à prendre ce point de vue. Il s'agit ici de la structure de la théorie – et non de celle des objets mathématiques – ce qui illustre une certaine myopie d'un point de vue axiomatique trop strict : pour ce dernier, le concept « algèbre de Lie simple » est naturel et simple et celui des groupes de Coxeter est artificiel. Or, seul le renversement de point de vue a permis le dépassement de la théorie classique : depuis 1970 sont apparues de multiples classes d'objets mathématiques nouveaux (algèbres de Kac-Moody, groupes quantiques, algèbres de vertex), principalement sous l'influence de la physique mathématique, et elles se sont harmonieusement adaptées au point de vue des groupes de Coxeter.

Le deuxième axe majeur est celui des groupes algébriques. Essentiellement développés par Chevalley, puis A. Borel, entre 1950 et 1958, ils apportent unité et élargissement à la théorie des groupes. En particulier, comme l'avait soupçonné Weil dans son article sur l'« Avenir des Mathématiques », la théorie des groupes finis simples est absorbée dans celle des groupes de Lie via le détour des groupes algébriques et des groupes de Coxeter. Mais, si le connaisseur reconnaîtra que nombre de choix dans l'exposé de Bourbaki sont dictés par le point de vue des groupes algébriques,

et que ceux-ci sont l'aboutissement naturel de la théorie, ils ne sont nulle part mentionnés explicitement.

La constatation s'impose : la deuxième partie de Bourbaki est un traité inachevé. L'algèbre commutative s'arrête là où le langage algébrique devient incommode, et où le point de vue géométrique s'impose. La géométrie différentielle reste au stade des fondements et ne s'éclaire pas vers les sujets vraiment captivants. Enfin, l'étude de la structure et de la géométrie des groupes de Lie s'arrête à mi-chemin avec celle des groupes compacts. La géométrie algébrique, et *a fortiori* la synthèse avec les groupes de Lie que fournissent les groupes algébriques, n'auront pas droit de cité. Il y a plusieurs sortes de raisons à cet inachèvement, à cette paralysie aux portes sacrées de la géométrie. Les unes sont conjoncturelles : le monolithisme du traité, la lassitude, la relève des générations dont les intérêts changent. Ajoutons que les sujets intéressants en géométrie utilisent des préliminaires très nombreux et divers et que la doctrine d'autosuffisance de Bourbaki trouve là une limite naturelle. Peut-être la deuxième partie échappe-t-elle partiellement au projet initial, et devait-elle s'enliser à l'endroit où la philosophie structuraliste, sous sa forme initiale, perd de sa pertinence. Nous y reviendrons plus loin.

Enjeux logiques

Axiomatiques. — L'idéal d'une théorie axiomatique s'est modifié d'Euclide au XX^e s. Pour nous, axiomatiser une science consiste à faire l'inventaire des notions fondamentales et à donner la liste des axiomes : ce sont des propriétés qui ne requièrent pas de démonstration, car leur essence est de définir implicitement les notions fondamentales, caractérisées par les mécanismes de base auxquels elles obéissent. Mais à partir de là, tout doit se démontrer sans recourir à autre chose qu'aux notions fondamentales et aux axiomes. Il y a des axiomatiques fermées (que Bourbaki appelle univalentes) qui ne décrivent qu'une seule théorie possible : les nombres entiers, ou la géométrie euclidienne. Il y a des axiomatiques ouvertes (ou multivalentes) comme celle des groupes. L'avantage d'une axiomatique ouverte réside dans les possibilités d'applications : la théorie axiomatique des groupes ne décrit pas un groupe particulier, mais donne les propriétés communes à tous les groupes. Un énoncé typique portera sur un groupe non spécifique, qu'on peut appeler le groupe générique, mais après avoir vérifié que l'addition des nombres réels satisfait aux axiomes des groupes, tout énoncé sur le groupe générique a une traduction axiomatique portant sur l'addition des nombres réels, et toute démonstration se traduit de la même manière. De là résulte une grande économie de moyens. L'exposé selon le modèle de Bourbaki comporte un empilement d'axiomatiques ouvertes, avec une cascade d'interprétations. En informatique, le même idéal prévaut sous le nom de programmation structurée : la taille et la complexité des programmes actuels, et la difficulté de la maintenance, ont conduit

les esprits les plus pragmatiques à retenir au moins une part de cet idéal.

Certaines axiomatiques sont autonomes. C'est le cas de l'axiomatique de Hilbert pour la géométrie ; conformément à l'ordre historique, elle ne postule pas les nombres réels, mais a les moyens de les reconstruire de l'intérieur. Il semble aujourd'hui plus commode de postuler les nombres réels et d'axiomatiser la géométrie, soit par la notion de distance (un nombre associé à toute paire de points), soit en utilisant les vecteurs, leur addition et leur produit scalaire — qui est un nombre. Si l'on se satisfait de l'existence de « sciences mathématiques » indépendantes, on peut les axiomatiser de manière autonome. Si, comme Bourbaki, on est obsédé par l'unité des mathématiques, il faut mettre en place un jeu d'axiomatiques interdépendantes, ouvertes ou fermées. Mais l'idéal scientifique abhorre une régression infinie des causes, et se pose l'existence d'un référent universel. La géométrie euclidienne a fourni ce référent jusqu'à la crise des géométries non euclidiennes, et raisonner *more geometrico* fut longtemps l'idéal suprême. La crise non euclidienne et l'effort simultané de reconstruction de l'analyse conduisirent au point de vue de Kronecker (~ 1870) affirmant le primat logique des nombres entiers. Mais cette notion ne s'impose pas encore suffisamment à l'entendement pour qu'on puisse se dispenser de l'axiomatiser à son tour. N'y aurait-il pas une « loi naturelle » qui s'impose à tous, comme il y a une « théologie naturelle » — du moins certains veulent-ils le croire. Tout un courant (Frege, Dedekind, Russell) croit que la logique fournit cette loi naturelle, antérieure aux mathématiques : on tente de définir le nombre entier au moyen de la notion logique de classe (ou collection, ou système, ou catégorie, ou ensemble).

Ce programme logiciste a à la fois réussi et échoué. Il a réussi, car Bourbaki a réussi à construire un agencement suffisamment précis de structures pour permettre de fonder toutes les constructions mathématiques à l'intérieur de la théorie des ensembles. Mais, même si l'on se limite à la théorie « naïve » de ces ensembles, la complexité des opérations en jeu pose le problème de leur légitimité. Le programme logiciste a donc échoué car, pour éviter les paradoxes, il a fallu axiomatiser à son tour la théorie des ensembles, lui faisant perdre son caractère d'évidence au sens cartésien.

La construction logique de Bourbaki. — Elle est décrite dans son Livre I et comporte trois niveaux : formalisation des mathématiques ; description axiomatique des ensembles ; et construction des structures et de leurs espèces. Nous revenons un peu plus loin sur la formalisation ; pour la théorie des ensembles, l'axiomatique adoptée n'est qu'une variante des systèmes standard. Reste le troisième point.

Reprenant à son compte l'expression d'Élie Cartan, Bourbaki constatait en 1936 : « La notion générale de structure est assez difficile à définir. » De fait, à la lecture des écrits canoniques, on constate que reviennent toujours deux ou trois exemples, toujours les mêmes :

loi de composition, topologie, relation d'ordre. La définition générale donnée en 1939 dans le « fascicule » s'inspire des idées de Russell sur l'échelle des types : une hiérarchie d'objets, où une relation entre objets d'un certain niveau devient un objet de niveau supérieur (idée reprise en informatique). Pour définir une structure d'une certaine espèce, il faut choisir un ou plusieurs éléments structurants de types précisés à l'avance, soumis à des restrictions énoncées sous forme axiomatique ; cette dichotomie entre « données » et « axiomes » est un élément important du style de Bourbaki. Le résultat est que sur un ensemble donné, il y a non pas une structure d'espèce donnée, disons une loi de groupe, mais tout un réservoir de structures possibles. De plus, il y a une conviction ontologique très forte : un objet détermine ses symétries, dans l'esprit du programme d'Erlangen. Les définitions sont ainsi construites que la notion d'isomorphisme, pour une espèce de structure donnée, est définie sans ambiguïté, via la notion équivalente de transport de la structure : toute correspondance biunivoque entre deux ensembles X et Y permet de transporter une loi de groupe sur X, par exemple, en une telle loi sur Y, et ces deux lois ont les mêmes propriétés.

Il est passionnant de suivre d'édition en édition l'évolution stylistique de Bourbaki, qui atteste d'un processus d'auto-apprentissage des structures. Au fur et à mesure que se multiplient les structures, reviennent comme une antienne les mêmes constructions : sous-objets, produit cartésien, quotient, avec des propriétés similaires. De plus, se développe l'algèbre universelle : groupes ou algèbres de Lie libres, algèbre enveloppante d'une algèbre de Lie, algèbre extérieure d'un module... ; Bourbaki adopte progressivement le point de vue des applications universelles, introduit par Samuel en 1948 et mentionné seulement dans un Appendice pour commencer. Ce qui finit par comprendre Bourbaki c'est qu'à côté des isomorphismes il y a dans chaque cas une notion sous-jacente et plus générale de morphisme : fonctions continues en topologie, homomorphismes de groupes... Mais contrairement au credo ontologique, les morphismes ne sont pas définis de manière univoque : une théorie complète se doit de donner indépendamment la description des structures et des morphismes. Bien entendu, c'est là le point de vue de la théorie des catégories introduite en 1943 par Eilenberg (du groupe Bourbaki) et Mac Lane.

Le volume de Bourbaki sur les structures, paru finalement en 1957, incorpore toutes ces évolutions. D'une part, c'est un traité honteux des catégories, où les notions-clés (catégorie, foncteur...) apparaissent en filigrane, mais pas dans le texte « officiel ». D'autre part, c'est une grammaire des structures : analysant son propre style, Bourbaki y décrit un certain nombre de raisonnements-types, qui reviennent à l'occasion de chaque structure. Ironiquement, la science des structures ne dépasse pas le stade descriptif et n'accède pas au stade structurel !

La légitimation des mathématiques. — J'ai déjà abordé la question du référent universel. Bourbaki fait sien le programme de Hilbert : les ensembles seront ce référent. Assez curieusement, alors que Bourbaki adopte le point de vue descriptif des axiomatiques ouvertes dans le cas des structures multivalentes (groupes, espaces...), il tient au point de vue constructif et réductionniste du XX^e s. pour les structures univalentes. Il construit par étapes les nombres entiers, rationnels, réels et complexes, mais ne donne pas de caractérisation axiomatique du corps des nombres réels par exemple. L'important est que la réduction aux ensembles s'accomplisse.

On a déjà remarqué que la nécessité d'une axiomatique sophistiquée pour les ensembles (dont Bourbaki à ses débuts ne voulait pas) remet en cause le caractère d'évidence cartésienne des ensembles, indispensable à la légitimation des mathématiques. En dépit de l'ampleur des discussions à ce sujet, ne sont pas en cause les axiomes « dangereux » de la théorie des ensembles : Gödel a prouvé en 1940 que si l'on se restreint à la classe constructible d'ensembles — suffisante pour la pratique — l'axiome du choix est valide. Quant à l'hypothèse du continu, elle n'intervient que de manière marginale en mathématiques, dans certaines parties très techniques des processus aléatoires. La difficulté majeure est qu'il y a eu une révolution non cantorienne, analogue à la révolution non euclidienne et dont on n'a pas encore pris la mesure. Si l'axiome des parallèles est indécidable, l'axiome du choix l'est aussi ; s'il y a plusieurs géométries possibles, il y a plusieurs théories des ensembles possibles, et l'on a renoncé à faire un choix entre les divers modèles.

Exeunt les ensembles. S'ils ont perdu leur caractère d'évidence, il y a deux solutions possibles : le relativisme, ou le choix d'un autre référent. La multiplicité des modèles des ensembles a été utilisée de manière positive par Abraham Robinson qui a pu justifier les infinitésimaux dans son analyse non standard. Un relativisme plus absolu est celui des topos. Indépendamment, Lawvere pour des raisons logiques, et Grothendieck pour des raisons mathématiques, ont cherché à décrire des théories des ensembles minimales, sous la forme de catégories spéciales : les topos. Dans ces catégories règne une logique interne qui est intuitionniste (!), et l'on a expérimenté qu'il est fécond d'y répéter des constructions qui ont bien fonctionné à l'intérieur de la théorie des ensembles, par exemple les groupes. Un essai voisin et moins ambitieux est celui des opérades : il s'agit d'une codification, plus mathématique que logique, de systèmes de calcul avec de nombreuses opérations imbriquées. (Insistons sur le fait qu'il s'agit là non de recherches sur les fondements mais d'une pratique mathématique interne.) Adopter ce point de vue relativiste — et cela me semble la seule possibilité — exclut un référent universel, et repose le problème de la légitimité et de l'unité des mathématiques.

L'autre alternative connue repose sur la formalisation. Bourbaki a toujours adopté à ce sujet une position

pragmatique. Citons une source autorisée : « La dernière crise [...] a eu pour nous un résultat non moins heureux... Nous avons appris à faire remonter toute notre science à une source unique, composée seulement de quelques signes et de quelques règles d'emploi de ces signes, *réduit sans doute inexpugnable, où nous ne saurions nous enfermer sans risque de famine* (souligné par nous), mais sur lequel il nous sera toujours loisible de nous replier en cas d'incertitude ou de danger extérieur » (Weil, *L'avenir des mathématiques*). Et voici en écho ce que dit Bourbaki dans son introduction générale : « En fait, le mathématicien qui désire s'assurer de la parfaite correction, ou, comme on dit, de la "rigueur" d'une démonstration ou d'une théorie, ne recourt guère à l'une des formalisations complètes dont on dispose aujourd'hui, ni même le plus souvent aux formalisations partielles et incomplètes fournies par le calcul algébrique et d'autres similaires : il se contente en général d'amener l'exposé à un point où son expérience et son flair de mathématicien lui enseignent que la traduction en langage formalisé ne serait plus qu'un exercice de patience (sans doute fort pénible). »

À ce propos, dissipons un malentendu récurrent : le style de Bourbaki est abstrait et austère, mais les canons très rigoureux de rédaction ne me semblent pas préjuger d'une quelconque philosophie sur le sens véhiculé par le discours.

Le réduit inexpugnable mentionné par Weil est le dernier des référents universels qui aient été inventés par Hilbert. L'idée en est qu'on peut codifier avec assez de précision le jeu du raisonnement mathématique pour qu'il se transcrive sans ambiguïté en un texte écrit, codé de manière convenable. Dans cette construction, les définitions – que Bourbaki appelle avec condescendance « introduction des symboles abrégés » – permettent le jeu réductionniste grâce à l'adage de Pascal de « toujours substituer la définition au défini ». Ces réductions décrivent en fait un automate, c'est-à-dire une machine idéale – dont une variante est la machine de Turing – définie par ses états internes et les actions possibles, et dont le but est de produire un texte, sous forme d'une suite de symboles – qu'on peut réduire à deux, disons 0 et 1. L'idée hardie de Hilbert est de prétendre que ces textes codés et leur manipulation sont le référent ultime ; l'entendement cartésien est convié à vérifier que les manipulations se font selon les règles, et le sens est totalement éliminé.

Plutôt que de revenir sur la tarte à la crème de l'indécidabilité, je voudrais ouvrir quelques sujets de réflexion moins habituels. Bourbaki mentionne déjà que cette réduction produit des textes d'une longueur insupportable. Cependant, ce qui n'était qu'une fable logique est devenu une réalité concrète grâce aux ordinateurs et à leur capacité à manipuler l'information. Ce qui est plus inquiétant est que le texte codé a perdu toute trace de la structuration logique implicite ; il en résulte un manque de plasticité, car l'altération d'un seul signe peut détruire toute signification. L'idée de Hilbert était de domestiquer l'infini – en principe

inconnaissable – en en fournissant une image dans le fini. Mais nous commençons à réaliser qu'entre le fini et l'infini, il y a la zone, difficile à appréhender, du fini très grand – au moment où les physiciens commencent à explorer la physique mésoscopique à la jonction de la physique quantique microscopique et de la physique classique macroscopique. Plusieurs tentatives de raisonner sur ce fini très grand ont eu lieu ; l'analyse non standard en est une, et nous mentionnerons aussi les travaux sur les entiers « faisables ». Ceci ouvre deux possibilités nouvelles. Tout d'abord, on pourrait rencontrer des systèmes logiques qui seraient en principe contradictoires, mais dans lesquels la contradiction ne pourrait être explicitée à cause de limitations physiques – elle pourrait par exemple nécessiter 10^{10000} caractères pour être écrite. Par ailleurs, l'étude de la structure d'un raisonnement logique, et de ses symétries, conduit à étudier le rôle négligé des références internes – on cite le théorème de Pythagore dans une démonstration sans le démontrer à nouveau – avec l'intention de condenser une démonstration dans des limites « faisables ».

Pour revenir à Bourbaki, il faut bien constater que ces recherches logiques ont eu très peu d'influence sur sa pratique des mathématiques, et que le Livre I est isolé dans son œuvre. Comme le dit Dieudonné : « Bourbaki ne fait pas de philosophie. »

Les limites du structuralisme mathématique

La nature de l'espace. – Les développements de la géométrie, de 1950 à nos jours, ont battu en brèche le dogme selon lequel un espace est un ensemble de points habillé d'une structure. La première difficulté est venue dans l'étude des variations de structures. Si l'on classifie, pour les besoins de la cristallographie ou de l'arithmétique, les réseaux cristallins de l'espace, on a affaire à un mélange de combinatoire et de variations continues de structure. La géométrie selon Riemann, et les applications à la dynamique, nous ont familiarisé avec l'idée qu'on peut attacher à chaque point de l'espace un ensemble de vecteurs, avec leur produit scalaire, et que ces données varient régulièrement avec le point donné. La géométrie différentielle s'est structurée autour des diverses notions d'espace fibré, mais un fibré vectoriel est plus qu'une collection d'espaces vectoriels. C'est le prototype d'une structure mixte : l'espace de base porte un certain type de structure (disons une topologie) et chaque point de cet espace détermine un objet (la fibre) avec une structure d'un autre type (disons un groupe, ou un espace vectoriel), mais il faut exprimer correctement comment « recoller » les fibres. Dans chaque situation particulière, on a trouvé un artifice convenable pour se ramener à l'orthodoxie des structures, mais la multiplication des cas appelle une théorie générale. Les questions voisines de passage du local au global nécessitent un usage intensif des faisceaux (inventés par Leray vers 1945, et développés par les écoles de Cartan et Grothendieck). Le cadre naturel est celui des catégories d'Eilenberg et Mac Lane, et même plus particulièrement des topos de Grothendieck.

Conformément à la philosophie relativiste mentionnée plus haut, un fibré vectoriel est un espace vectoriel internalisé dans une catégorie convenable d'espaces fibrés. Il y aura donc des groupes, ou des anneaux, dans une catégorie donnée, mais il y aura aussi des catégories qui en un sens convenable sont des groupes ou des anneaux : des catégories structurées.

En géométrie algébrique, le point de vue de Dedekind et Weber affirme qu'une courbe algébrique se reflète fidèlement dans le corps de ses fonctions rationnelles. Gelfand a découvert en 1940 qu'un espace compact et l'algèbre de ses fonctions se déterminent mutuellement. On connaît depuis longtemps l'exemple d'équations à coefficients réels (par exemple $x^2 + y^2 + 1 = 0$) qui n'ont pas de solution réelle ; on savait remédier à ce manque de points en admettant des points à coordonnées complexes (avec Poncelet) et la théorie de Lie montrait que cela ne pouvait se produire pour les groupes. Or, à ma grande surprise et en approfondissant les travaux de Dieudonné sur les groupes formels, je fus conduit à la plus belle découverte de ma thèse : des « groupes » à un seul élément (sur un corps de caractéristique non nulle) possédant une « algèbre de fonctions » non triviale. Les problèmes de classification déjà mentionnés fournissent de nombreux exemples d'opérations de groupes où les structures qu'on peut définir sur l'ensemble des orbites n'épuisent pas la situation. Tous ces « espaces avec trop peu de points » ont conduit au changement de paradigme codifié dans la théorie des schémas de Grothendieck, où l'anneau des « fonctions » est mis au premier plan. Alain Connes a mené à son terme cette logique dans sa « géométrie non commutative », où les points perdent à peu près toute pertinence. D'où une question redoutable : Dedekind et Cantor nous ont convaincu que le continu mathématique – et le monde physique qu'il modélise – est composé de points ; la microphysique oblige-t-elle à abandonner ce postulat ?

Un bilan du structuralisme. – Notre conclusion sera sans appel : Bourbaki n'a pas produit une théorie mathématique des structures, et n'y tenait peut-être pas. On peut comprendre le structuralisme en mathématique soit comme une vision organique ou métaphorique des mathématiques, soit comme un système logico-formel interne aux mathématiques. Weil – signe peut-être du dilettantisme affiché dans sa jeunesse – a joué de l'ambiguïté entre les deux points de vue. Que les mathématiques, comme les autres sciences étudiées plus haut, aient besoin de passer d'un stade descriptif à un stade structurel, semble indéniable. Bourbaki a été l'instrument d'une telle structuration des mathématiques, réalisée pour une large part dans son ouvrage principal, qu'il appela un temps *Traité d'analyse des temps nouveaux*. Il avait cru pouvoir les enfermer dans des fondements codifiés pour 2000 ans – le nouvel Euclide. Nous avons vu comment des limitations internes forcent à réintroduire une bonne dose de relativisme : les mathématiques, qui sont une science ouverte, subiront d'autres restructurations. Ici, comme

ailleurs, il n'y aura pas de « solution finale ». Albert Lautman, tout en employant le mot « structure » avec la même ambiguïté que son ami Weil, a jeté les bases d'une analyse dialectique de la structure des théories mathématiques ; qui aura le talent de reprendre cette recherche là où la guerre l'a brisée ?

Pour ce qui est d'un structuralisme logico-mathématique, nous en voyons les prodromes dans l'œuvre de Grothendieck et de ses émules, et le développement des mathématiques dans les quinze dernières années (groupes quantiques, systèmes complètement intégrables, invariants des nœuds) a conforté les intuitions de Grothendieck. Le point de vue des structures conduisait inexorablement, comme je crois l'avoir montré, à son propre dépassement dans la théorie des catégories. D'où la question : pourquoi Bourbaki, alors qu'il admet implicitement et hypocritement l'existence et l'importance des catégories, alors que les catégories doivent tant aux travaux de ses membres les plus actifs entre 1945 et 1970, ne saute-t-il pas le pas ? Je crois que la réponse tient dans son exigence monolithique de rigueur. Bourbaki peut fort bien décrire mathématiquement une catégorie explicite, il aurait pu aussi écrire une grammaire des catégories, au niveau mathématique utilisé pour la grammaire des structures – je l'avais proposé en 1956 ! Mais il ne pouvait développer la nécessaire théorie mathématique des catégories. Il y a des difficultés logiques, déjà signalées par Eilenberg et Mac Lane dans leur article fondateur de 1945, et non résolues de manière satisfaisante. Comme nos prédécesseurs utilisant les infinitésimaux au XVIII^e s., nous devons accepter de vivre dans un monde mathématique apparemment contradictoire, de connaître l'existence du gouffre logique et de ne pas trop nous en approcher. L'admettre eût été pour Bourbaki un renoncement philosophique inacceptable.

► BOURBAKI N., « L'architecture des mathématiques », in LE LIONNAIS F. éd., *Les grands courants de la pensée mathématique*, rééd., Paris, Rivages, 1986 ; ÉLÉMENTS D'HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES, Paris, Masson, 1984. – DIEUDONNÉ J., *Panorama des mathématiques pures : le choix bourbachique*, Paris, Bordas, 1977 ; *Abrégé d'histoire des mathématiques*, Paris, Hermann, 2 vol., 1986. – KLEIN F., *Le programme d'Erlangen*, Paris, J. Gabay, 1991. – MAC LANE S., *Categories for the working mathematician*, New York, Springer, 1971. – WEIL A., « L'avenir des mathématiques », in LE LIONNAIS F. éd., *Les grands courants*, op. cit.

Pierre CARTIER

→ Axiomatisme et formalisation ; Bourbaki ; Ensemble ; Formalisme ; Géométries ; Groupes et symétrie ; Logicisme ; Transformation géométrique.

SUBSIDENCE

Le terme de subsidence désigne de nos jours un enfoncement graduel de l'écorce terrestre qui peut se produire aussi bien en milieu océanique qu'au fond des bassins sédimentaires. À l'origine, ce terme fut

popularisé par Charles Lyell dans le premier tome de ses *Principles of Geology* (1830). Une stricte application du principe uniformitariste impliquait, pour préserver l'uniformité des relations entre les terres et les mers, de faire appel à un mécanisme susceptible de compenser les effets des soulèvements. Or, quelques années auparavant, Alexandre Brongniart (1821) avait établi que « certains terrains [...] des sommets d'un des chaînons du Buét », qui culmine à 2 500 m en Haute-Savoie, peuvent être rapportés à la « craie inférieure ». C'est pourquoi, après avoir consacré une cinquantaine de pages de son ouvrage à énumérer les exemples de subsidence observés au cours du siècle précédent, consécutivement à des tremblements de terre, Lyell croyait pouvoir affirmer que soulèvement et subsidence étaient mécaniquement liés : « Si, par exemple, des couches marines ayant approximativement l'âge de la craie et des sables verts ont été soulevées en Europe jusqu'à une altitude extrême de plus de onze mille pieds et jusqu'à une hauteur moyenne de quelques centaines au-dessus du niveau de la mer, nous pouvons conclure que certaines parties de la surface terrestre, qui existaient soit au-dessus, soit au-dessous des eaux quand ces couches furent déposées, se sont affaissées ultérieurement jusqu'à une profondeur extrême de plus de onze mille pieds au-dessous de leur niveau original, et à une profondeur moyenne supérieure à quelques centaines » (p. 477).

Connaissant l'influence exercée par Lyell sur le jeune Charles Darwin au moment où il s'embarqua en décembre 1831 sur le *Beagle*, muni du premier volume des *Principles*, on ne sera pas surpris de découvrir que, dès 1837, il intitula son premier article consacré aux récifs « Sur certaines aires de soulèvement et de subsidence dans les océans Pacifique et Indien, déduites de l'étude des formations coralliennes ». Il y démontrait qu'« un simple récif frangeant serait ainsi nécessairement converti par la croissance vers le haut des coraux en un récif de type "encerclant", et celui-ci, finalement, par suite de la disparition de la terre centrale sous l'action du même mouvement [de subsidence], en une île à lagon ».

La structure et la distribution des récifs coralliens (1842) permit à Darwin de généraliser sa théorie à l'ensemble des vastes espaces océaniques qu'il avait explorés. Dans l'*Explication de la Carte géologique de la France*, publiée en 1848, Léonce Elie de Beaumont (1798-1874) décrit « la structure du bassin jurassique de Paris », d'où il déduisit que l'« on peut regarder comme extrêmement probable que chacune des couches dont se compose le grand dépôt jurassique du bassin parisien s'est formée sous une profondeur d'eau peu considérable et qui, pour la plupart, a été inférieure à cent mètres » (p. 610). Or, « une pareille disposition qui se présente à tous les étages et dans toutes les parties du bassin, ne peut s'expliquer que par une variation graduelle du niveau relatif de la surface de la mer et du fond du bassin pendant le dépôt du terrain jurassique » (p. 610). Il en concluait que : « Ce n'est donc pas par une élévation progressive que le niveau de

la mer aurait éprouvé [sic] pendant la période jurassique que peut s'expliquer l'augmentation graduelle qu'a éprouvée, pendant la même période, la distance de la surface de la mer au fond initial du bassin jurassique. Cette augmentation graduelle de profondeur ne peut être expliquée que par l'enfoncement graduel du fond du bassin, enfoncement déterminé peut-être par le poids graduellement croissant des sédiments qui s'y superposaient » (p. 611).

La notion de subsidence fut adoptée par James Hall (1811-1898) qui, dans son *Introduction* au troisième volume de la *Palaeontology* de la *Natural History of New York*, y fit appel pour expliquer la structure des Appalaches, fondant un concept que James D. Dana (1873) allait nommer géosynclinal : « La ligne de plus grande dépression serait le long de la ligne de plus grande accumulation ; et dans la direction des marges amincies du bassin, la dépression serait moindre. Par ce processus de subsidence, comme le côté inférieur se trouve graduellement courbé, il peut s'ensuivre, en conséquence, des fissures et des fractures de ce côté ; ou bien la diminution de surface au-dessus, engendrée par cette courbure en profondeur, produira des ondulations et des plissements des strates » (p. 70).

Plus près de nous, Pierre Pruvost (1890-1967) fit état, en 1930, de ses observations personnelles sur la sédimentation dans le bassin houiller du Nord de la France où il avait constaté que « la puissance des couches accumulées, d'origine lacustre, plus rarement marine, dépasse deux kilomètres, et atteint peut-être trois en certains endroits et que, malgré cela, non seulement jamais de grandes profondeurs n'ont été réalisées dans le bassin, mais que même, à chaque instant, son fond s'est maintenu au voisinage immédiat du niveau de la mer... » (p. 553). Il soulignait en outre le caractère répétitif de la série formée de séquences (ou cyclothèmes) associant le mur, formé d'un ancien sol de végétation, la veine de houille et le toit schisteux, riche en débris végétaux aériens flottés, qui « apparaît comme le produit d'un brutal affaissement », lequel se serait répété au moins 400 fois. Il pouvait alors conclure en ces termes : « La subsidence ne s'opère point n'importe où ; elle requiert pour se produire une région prédisposée, une zone faible de l'écorce terrestre où le moindre déséquilibre la provoque. Il nous paraît alors nécessaire d'invoquer à la fois des causes tectoniques profondes, créatrices de ces "aires de subsidence" à l'origine régulatrices de leur mouvement de chute dans la suite ; puis, une fois ceci admis, d'invoquer en même temps la pesanteur. Il est en effet bien vraisemblable que le poids des sédiments suffit à provoquer les descentes successives, lorsqu'une certaine limite de charge est atteinte. »

À la lumière de la théorie de l'expansion océanique, on explique actuellement la subsidence océanique par le refroidissement de la lithosphère océanique qui, produisant une contraction et donc un accroissement de sa densité, est responsable de son enfoncement dans le manteau par effet isostatique. Dans les bassins sédimentaires, la subsidence paraît résulter plus

particulièrement d'un amincissement crustal favorisant un enfoncement progressif du fond du bassin sous le poids des sédiments accumulés.

► BRONGNIART A., « Sur le caractère zoologique des formations, avec l'application de ces caractères à la détermination de quelques terrains de craie », *Ann. Mines*, 6, 1821, p. 537-572. — DARWIN C., « On certain areas of elevation and subsidence in the Pacific and Indian oceans, as deduced from the study of coral formations », *Proc. geol. Soc. London*, 2, 1837, p. 552-554 ; *The structure and distribution of coral reefs*, Londres, Smith, Elder & Co. 1842. — ELIE DE BEAUMONT L., *Explication de la Carte géologique de la France*, t. 2, Paris, Imprimerie nationale, 1848, chap. IX. — HALL J., *Palaeontology*, vol. 3, part 1 de *Natural History of New York*, Albany, C. van Benthuysen, 1859, p. 1-96. — LYELL C., *Principles of Geology*, vol. 1, Londres, John Murray, 1830. — PRUVOST P., *Sédimentation et Subsidence. Livre jubilaire 1830-1930*, t. 2, Paris, Société géologique de France, 1930.

Jean GAUDANT

→ Courant de convection ; Lyell ; Tectonique des plaques.

SYMBOLE

CHIMIE

Dans son acception la plus courante, la notion de symbole désigne une image ou un signe servant à représenter un objet déterminé. Cette définition générique ne suffit toutefois pas à rendre compte de manière satisfaisante de la nature et des visées du symbolisme alchimique et chimique. Dans les essais qu'il a publiés sur la nature de l'alchimie le philosophe suisse Carl Gustav Jung pose que l'image symbolique constitue l'essence proprement dite de l'expression alchimique. Les alchimistes considéraient que les symboles étaient chargés d'un pouvoir d'évocation que les mots, dans leur univocité sémantique, ne pouvaient posséder, raison pour laquelle ils eurent recours à des représentations iconographiques complexes pour transcrire leurs contributions théoriques et expérimentales les plus importantes.

L'origine de ce moyen d'expression particulier remonte au moins à la première moitié du XVII^e s., époque où sous l'influence des doctrines médicales et alchimiques de Paracelse nombre de naturalistes européens s'engageaient dans la recherche assidue d'un langage différent de celui des aristotéliens. Bien que Paracelse lui-même ne se soit jamais servi de symboles pour exprimer les complexités de sa philosophie de la matière, il invitait ses disciples à ne pas s'arrêter aux aspects extérieurs de la nature et les exhortait à lire et à interpréter le sens obscur des « signatures » à l'aide de moyens intuitifs extralinguistiques. Couronné de succès, ce mode d'interprétation aurait permis de saisir le lien qui rattache le microcosme de la matière sublunaire au macrocosme de la voûte céleste, et, partant, de révéler les causes des maladies humaines ainsi que les secrets les mieux cachés de la nature. Aux yeux des disciples de Paracelse et des alchimistes du XVII^e s., ces objectifs de

nature ésotérique et métaphysique faisaient bien évidemment du symbolisme un outil des plus efficaces pour représenter la philosophie particulière de la matière. Cette période vit la production de véritables œuvres d'art d'une grande valeur esthétique et religieuse ; les traités d'alchimie étaient systématiquement illustrés de superbes gravures allégoriques qui dans certains cas viennent se substituer au texte.

Dans la seconde moitié du XVII^e s., la chimie commença à présenter des caractéristiques formelles qui la rapprochaient des autres sciences expérimentales et à prendre ses distances avec l'alchimie. La situation conflictuelle ainsi créée allait influencer de façon déterminante sur les modalités d'utilisation et sur la fonction des symboles. Pour Robert Boyle, par exemple, le langage obscur et symbolique des alchimistes était un piège susceptible de gravement compromettre l'avenir de la chimie expérimentale. Les naturalistes de l'Europe entière voyaient en effet dans l'obscurité des symboles alchimiques la preuve par excellence que la chimie ne constituait qu'une activité récréative aux mains de charlatans ou de métaphysiciens dogmatiques ; aussi était-il indispensable de dégager la chimie expérimentale du symbolisme en usant d'un langage purement descriptif à même d'exprimer ses objectifs et ses résultats propres.

Les recommandations de Boyle ne restèrent pas lettre morte ; nombre de ses contemporains se rendirent compte qu'adopter les symboles alchimiques revenait à faire une concession dangereuse à la validité épistémologique de la discipline qui les avait soutenus et formés. On peut par conséquent comprendre la réticence des chimistes expérimentaux à recourir à un symbolisme quel qu'il soit. Et prendre la mesure de l'influence que l'alchimie conservait sur la chimie expérimentale en constatant que bien des naturalistes qui reprenaient les critiques de Boyle à l'encontre du langage obscur et allégorique de l'alchimie continuaient d'introduire dans leurs travaux des tableaux aux symboles manifestement plus alchimiques que descriptifs. Il n'est pas difficile d'imaginer comment cet appareil de signes, bien souvent différents, rendait particulièrement lourds et peu compréhensibles des textes qui n'avaient plus rien à voir ni avec les ambitions ni avec la teneur de l'alchimie de Paracelse. La permanence de cette symbolique non descriptive conduisit les plus conséquents des chimistes expérimentaux à s'en remettre exclusivement au langage pour communiquer leurs résultats scientifiques.

C'est au cours de la seconde moitié du XVIII^e s. qu'apparurent pour la première fois de timides tentatives visant à réformer le symbolisme alchimique en fonction de critères linguistiques et expressifs totalement remaniés. En 1786, Louis Bernard Guyton de Morveau introduisit des rapports numériques conventionnels destinés à indiquer la valeur quantitative de la force d'attraction à l'œuvre entre les substances chimiques. Les nombres en eux-mêmes représentaient des symboles sans lien aucun avec la quantification de la force d'attraction mais qui, au niveau comparatif,

fournissaient des données crédibles sur les différentes valeurs de la force d'attraction manifestée par diverses substances. Le symbolisme exerça une influence plus décisive encore sur Antoine Laurent Lavoisier, qui dans un mémoire publié en 1783 s'efforça le premier de décrire une réaction chimique au moyen d'une équation stoechiométrique et de nouveaux symboles chimiques. L'absence de données quantitatives précises sur la composition des substances chimiques trahissait l'impossibilité structurelle de rendre le déroulement et les modifications des réactions chimiques à l'aide de paramètres et de symboles numériques. Ce n'est pas un hasard si, après avoir conçu un système de symboles chimiques construits sur les modèles algébriques, Lavoisier préféra recourir à la nomenclature et aux définitions pour décrire les réactions chimiques.

La situation devait changer du tout au tout avec l'apparition des théories atomiques d'Amedeo Avogadro et de John Dalton. L'introduction des formules et des équations dans le langage de la chimie est en effet indissociable de la théorie atomique, et ce système de symboles doit beaucoup à la découverte des poids atomiques des éléments dont les paramètres quantitatifs furent précisés entre 1810 et 1818 par John Dalton et Jons Jacob Berzelius. Le symbole chimique de base choisi par Dalton était le cercle ; le système de représentation qu'il adopta en conséquence comportait : 1) un signe conventionnel à l'intérieur du cercle, ce qui donnait, pour prendre quelques exemples, le cercle seul pour l'oxygène, un point pour l'hydrogène, un tiret vertical pour l'azote, une croix pour le soufre et ainsi de suite ; 2) l'initiale en majuscule du nom anglais de l'élément inscrite dans le cercle.

La notation symbolique imaginée par Dalton ne parvint toutefois pas à s'imposer et c'est à Berzelius qu'il revient d'avoir développé et perfectionné la symbolique utilisée en chimie ; son système simple et facilement compréhensible de signes littéraux qui donne une traduction exacte et immédiate de la composition atomique des éléments chimiques s'est maintenu jusqu'à nos jours. Berzelius estimait qu'une formule devait indiquer de façon précise les éléments dont se formait un composé et afficher le nombre relatif d'atomes de chaque élément constitutif. Ses symboles correspondent à la lettre initiale en majuscule du nom latin attribué à la substance ; le symbole O fut ainsi rattaché au nom *Oxygenum*, le S à *sulphur*. Si correspondait à *Silicium*, et ainsi de suite pour les quarante-cinq éléments alors découverts. La valeur du poids atomique était donnée en chiffres. Un autre chiffre placé à gauche du symbole spécifiait le nombre d'atomes entrant dans la réaction. Adopté après de légères modifications par l'ensemble des chimistes européens, le système de Berzelius est à la base des symboles chimiques aujourd'hui en vigueur.

► BERETTA M., *The Enlightenment of Matter : The Definition of Chemistry from Agricola to Lavoisier*, Canton (Mass.), Science History Publ., 1993. — CROSLAND M., *Historical Studies in the Language of Chemistry*, Londres, Heinemann,

1962. — DAGOGNET F., *Tableaux et langages de la chimie*, Paris, Le Seuil, 1968. — JUNG C.G., *Psychologie und Alchemie*, Zurich, Rascher Verlag, 1944.

Marco BERETTA
(trad. O. Bonis)

→ Alchimie ; Lavoisier ; Paracelse.

SYMÉTRIE

MATHÉMATIQUES / PHYSIQUE

Consciente ou non, la force expressive ou organisatrice pour l'imagination que présentent les propriétés de symétrie (ou de dissymétries correspondantes) se manifeste depuis que des êtres humains traduisent graphiquement ou architecturalement leurs émotions, leurs visées ou leurs représentations du monde. Jusqu'à l'utilisation des figures géométriques régulières, tels les polyèdres platoniciens, comme éléments fondateurs de l'ordre caché du monde. Bien des ethnologues ont, pour leur part, observé le rôle symbolique que jouent dans les sociétés les rapports symétrie/dissymétrie, ne serait-ce que dans le traitement culturel du dimorphisme sexuel, ainsi que dans celui des symétries bilatérales qui lui sont parfois associées (Héritier), en soulignant le fait que plutôt que chacun de ses termes pris séparément, c'était finalement le couple non dissocié symétrie/brisure de symétrie qui était utilisé comme support de sens culturel et symbolique.

Ces constats soulèvent la question de savoir s'il existe une donnée irréductible de la conscience, d'origine biologique, qui rende l'être humain sensible aux structures symétriques et, par contraste, aux brisures de symétrie, d'une façon qui attire son attention et les lui fasse sélectionner. Il semble bien, en effet, que ces propriétés constituent des moyens cognitifs élémentaires qui permettent de conjuguer les exigences conjointes de permanence et de stabilité d'une part, de capacité de changement et de variabilité de l'autre, nécessaires pour appréhender et catégoriser le réel. La sensibilité à la symétrie — et son utilisation en vue de la signification — relèverait alors d'un schème cognitif profond dont l'aptitude serait génétiquement présente chez tous et dont la mobilisation serait épigénétiquement assurée, notamment par l'environnement culturel qui lui permettrait de s'exprimer par des modalités diverses. Des travaux récents (Enquist *et al.*, Johnstone, Kirkpatrick *et al.*) sur la perception animale suggèrent de rapporter une telle sensibilité aux propriétés d'apprentissage de « réseaux de neurones » qui reconnaissent plus aisément un objet symétrique s'il se présente dans des positions différentes du fait de ses invariances. Ces recherches sont encore embryonnaires et leurs premiers résultats restent sujets à larges débats.

Par-delà perception sensible et significations associées, la question de la symétrie comme telle et comme source d'invariances a gagné le domaine de

l'intelligibilité scientifique. Avant d'entrer dans plus de détails faisons deux mises au point préalables. D'une part, lorsque l'on parle de symétries en mathématiques ou dans les sciences de la nature, il faut distinguer entre deux points de vue différents (qui peuvent parfois se rejoindre) : ou bien on s'intéresse aux propriétés intrinsèques d'un objet et ce sont ses structures « géométriques » propres que l'on étudie sous l'angle des symétries, ou bien on s'intéresse aux transformations qui laissent invariant cet objet, dans son ensemble ou dans certains de ses aspects, et l'on dégage alors des lois de conservation auxquelles il obéit, ce sont alors les propriétés de l'espace dans lequel cet objet est plongé qui prévalent. D'autre part, rappelons que les mathématiques ont élaboré, avec la théorie des groupes, un outil conceptuellement très profond et opératoirement très puissant pour théoriser tout ce qui a trait aux transformations de symétrie, au point que certains épistémologues (Ullmo) ont fait de la structure mathématique de groupe la clef même de l'intelligibilité physique de la nature. Les résultats les plus récents obtenus dans les domaines relativistes et quantiques permettent d'abonder en ce sens. Mais il reste un domaine de la physique, actuellement en pleine expansion, qui sans se dérober à une approche en ces termes ne s'y réduit pas : c'est la physique des phénomènes critiques et des systèmes dynamiques (domaines où la théorisation formalisante de la biologie va puiser préférentiellement (Bouligand, Nicolis *et al.*, Thom [a-b]) du fait qu'ils semblent plus adéquats pour traiter de la complexité), où les théories des singularités, de la mesure ou de l'ergodicité jouent un rôle plus important encore. Cette remarque non pour amoindrir l'importance fondamentale de la théorie des groupes mais pour souligner le fait que, dans la construction de l'objectivité scientifique, symétries et brisures de symétries semblent former un couple bipolaire qui délimite un vaste champ conceptuel où trouve place l'essentiel des phénomènes physiques actuellement observés et étudiés.

*Les symétries en mathématiques
et dans les sciences de la nature*

Parmi les premières réalisations qui ont recouru aux symétries spatiales de répétition on trouve les frises et les pavages réguliers et parmi les premières études théoriques qui leur sont associées on trouve les constructions relatives aux polygones et polyèdres réguliers. Ces travaux ont eu des suites très fécondes en mathématiques et en physique (groupe des déplacements, cristallographie). De même, le recours aux symétries temporelles périodiques (alternance des jours et des nuits, observation des cycles planétaires) a donné naissance à bien des méthodes d'analyse mathématique et de traitement du signal (analyse de Fourier associée à la symétrie de dilatation d'échelle spatiale, analyse en ondelettes). D'un point de vue plus abstrait, les propriétés de commutativité de certaines opérations du calcul (addition, multiplication) et de

non-commutativité de certaines autres (soustraction, division) ont illustré simplement des propriétés de transformations algébriques dont certaines ont conduit à la caractérisation d'objets mathématiques nouveaux (matrices, commutateurs). Il n'est jusqu'au domaine des statistiques et probabilités qui, comme B. van Fraassen l'a montré, ne mobilise implicitement (pour lever des ambiguïtés associées à l'usage du « principe d'indifférence ») les propriétés de symétrie de certains problèmes : ce sont fréquemment des arguments de symétrie qui permettent d'éclairer certaines controverses, voire de résoudre des paradoxes statistiques, dont la solution tient pour l'essentiel à l'identification des symétries pertinentes.

Toutefois, malgré la puissance des instruments théoriques et techniques que mettaient à la disposition des scientifiques les approches fondées sur l'étude des symétries (Collectif, Sivardièrre (a-b), Weyl), il est apparu que bien des phénomènes rencontrés dans la nature semblaient leur échapper et même les mettre en défaut. Ainsi, comment expliquer le passage, lors d'une transition de phase, telle la congélation de l'eau par exemple, d'une symétrie plus élevée (isotropie du liquide) à une symétrie moins élevée, celle du cristal de glace ? Ou le fait qu'un aimant qui, à basse température, présente la direction magnétique privilégiée de son moment magnétique, la perde spontanément au-delà d'une certaine température et devienne alors isotrope ? L'étude de telles situations a conduit au développement de la théorie des phénomènes critiques (Boccard, Le Bellac, Toulouse *et al.*, Wilson). Celle-ci a débouché sur la mise en évidence de nouveaux invariants (nouvelles symétries) en dégagant pour ces phénomènes des classes d'universalité où les spécificités propres à nombre de systèmes se trouvent gommées au profit de comportements très stéréotypés ne mettant en jeu que des caractéristiques extrêmement générales (telles que les dimensionnalités des espaces pertinents pour rendre compte des phénomènes), révélant ainsi un niveau plus profond encore de propriétés d'invariances.

L'existence de ces brisures de symétrie a aussi donné naissance à des controverses en matière de principes et de méthodes et, à propos du principe de Curie, l'occasion d'approfondir la notion de causalité physique. En effet, à son niveau le plus général ce principe énonce que, dans les phénomènes naturels, la symétrie des causes se retrouve dans la symétrie des effets. Ce principe s'est révélé avoir une pertinence certaine et une grande extension ; toutefois dans ces situations critiques accompagnées de brisures de symétrie il devenait apparemment inapplicable. Pour le généraliser à ces cas on est alors conduit à considérer non plus seulement une expérience singulière qui manifeste cette brisure, mais la classe entière des expériences équivalentes et de leurs résultats. Comme les brisures de symétrie se trouvent singularisées de façon aléatoire par des fluctuations qui les orientent, la prise en compte de toutes les expériences possibles élimine ce caractère aléatoire en le moyennant et restaure la

symétrie des potentialités. Il reste que le résultat d'une expérience donnée demeure en partie imprédictible car s'il appartient nécessairement à la classe des symétries autorisées par le principe de Curie on ignore quelle possibilité il actualise : une bille placée en équilibre instable au sommet d'un monticule peut tomber à la moindre fluctuation dans un état d'équilibre stable en un point quelconque de la circonférence de base ; chaque chute particulière forme un état de symétrie brisée par rapport à l'état de départ mais, si l'on procède à un très grand nombre d'essais, chaque direction se trouvant équiprobable, la symétrie initiale se trouve restaurée en moyenne.

De même, la thermodynamique des processus irréversibles, son traitement par la mécanique statistique et les paradoxes qui ont pu en résulter (les équations de la mécanique des éléments d'un système isolé sont réversibles dans le temps, alors que les grandeurs moyennes caractérisant ce système — température, densité, pression — évoluent de façon irréversible vers l'équilibre lorsqu'elles en ont été écartées) ont contribué à mettre en évidence les problèmes de brisure de symétrie temporelle liés à l'irréversibilité du temps et à poser la question de l'existence d'une irréversibilité intrinsèque des phénomènes naturels (Prigogine *et al.*, Prigogine [b]) et d'une « flèche du temps » (Klein *et al.*). Cette dernière a pu être associée à divers phénomènes physiques (Zeh), parfois fort différents (thermodynamique, rayonnement, propriétés quantiques), mais une des raisons avancées parmi les plus spectaculaires l'attribue à des causes cosmologiques en liaison avec la théorie du « big-bang » et l'expansion de l'univers. Le big-bang lui-même a pu être associé à une hypothétique brisure spontanée de symétrie (du vide quantique énergétique sous l'effet de fluctuations quantiques intrinsèques). La controverse continue de se développer à ce propos entre les tenants de ces diverses explications, mais aussi entre ceux (la grande majorité, actuellement), qui considèrent que cette flèche, comme le temps et l'espace eux-mêmes d'ailleurs, est une conséquence seconde de l'apparition de l'univers actuel après le big-bang et ceux (Prigogine (b)) qui estiment au contraire que le temps et sa flèche précèdent cet univers. Signalons d'autre part, puisque nous évoquons la cosmologie moderne, que les tentatives les plus récentes pour construire une théorie unifiée des interactions fondamentales explorent la voie de symétries nouvelles (les supersymétries), susceptibles d'unifier les comportements fermioniques et bosoniques, que nous évoquerons brièvement plus loin.

Pour clore cette partie revenons à la distinction entre propriétés de symétrie des objets eux-mêmes et opérations de symétrie (transformations abstraites) qu'on peut leur faire subir. C'est cette dernière approche qui a conduit à la formulation de principes de conservation très généraux. Le pas principal a été franchi grâce aux théorèmes de Noether montrant que les contraintes qu'imposent des symétries mathématiques sur les lois et théories physiques engendrent des propriétés de conservation. Ainsi, à l'hypothèse de l'homogénéité et

de l'isotropie de l'espace qui entraîne une invariance de translation correspond la conservation du moment cinétique ; de même, à la symétrie de translation dans le temps d'un système correspond une conservation de l'énergie de ce système. Et pareillement pour des propriétés moins intuitives comme l'invariance sous un changement de l'origine de la phase d'une fonction d'onde électronique à quoi correspond la conservation de la charge électrique. Il en dérive toutes les théories de jauge, si importantes en théorie quantique des champs, grâce auxquelles on a déjà pu procéder à l'unification de certaines interactions physiques sous l'égide des groupes de transformation auxquelles elles répondaient (par exemple l'unification électro-faible entre l'interaction électromagnétique et l'interaction faible). Cela pour les symétries continues, mais l'existence de symétries discrètes peut contraindre tout aussi fortement certaines propriétés physiques. On peut mentionner les symétries sous les opérateurs de parité (P), de renversement du temps (T), ou de conjugaison de charge (C) et le théorème PCT (invariance des lois de la physique sous la combinaison de ces trois transformations), mais il en existe d'autres. Ainsi les propriétés de symétrie ou d'antisymétrie des fonctions d'ondes d'assemblées de quanta commandent-elles leurs comportements collectifs, c'est-à-dire la nature des statistiques auxquelles ils obéissent (statistique de Fermi-Dirac et principe d'exclusion de Pauli des fermions, pour l'antisymétrie, statistique de Bose-Einstein et condensation de Bose des bosons, pour la symétrie).

Plus : il faut rappeler que les théories relativistes ont posé en principe constitutif l'existence de certaines symétries. Ainsi, l'invariance des lois de la dynamique sous le groupe de Lorentz est au fondement de la relativité restreinte qui rend compte des lois de l'électromagnétisme et modifia la dynamique galiléenne. Appliquée à la théorie quantique elle fut aussi à l'origine de l'équation de Dirac et donc à la source de l'explication du spin de l'électron et de l'existence de l'antimatière. De même, l'exigence d'invariance des lois locales de la physique sous les transformations différentiables fut à l'origine de la relativité générale, qui établit une correspondance intime entre la géométrie de l'espace-temps et la distribution énergétique dans l'univers ; cette théorie se révèle être une théorie invariante de la gravitation, qui vient se substituer à la théorie newtonienne ; en cela elle est à l'origine de toute la cosmologie contemporaine. Rétrospectivement il apparaît d'ailleurs que les théories antérieures, telle la dynamique galiléenne, étaient elles-mêmes des théories « relativistes », répondant à des principes de symétrie moins étendus, certes, mais tout aussi déterminants.

Tous ces exemples et leur portée montrent combien les concepts associés aux symétries sont devenus omniprésents et opératoires dans la recherche en physique, et en même temps éclairants pour la compréhension des théorisations antérieures qui n'en étaient pas forcément conscientes. A tel point que, comme le relève C. Chevalley dans sa *Présentation* à l'ouvrage de

B. van Fraassen, on en vient à « [...] substituer au concept de loi celui de symétrie ». étendant ainsi l'appréciation de l'auteur qui affirme à propos de la symétrie : « Je considère ce concept comme la principale voie d'accès au monde que nous construisons dans les théories. » Une telle radicalité pourrait surprendre ; elle s'explique si l'on prend conscience qu'il s'agit de considérer des éléments essentiels du processus même de construction de l'objectivité physique et de la détermination des objets scientifiques correspondants. En effet, comme aux principes de relativité sont associées des conservations et que toute la physique s'appuie sur la mesure de quantités qui doivent rester stables pour pouvoir être observées, on peut aller jusqu'à soutenir que ces relativités et symétries, alors même qu'elles semblent réduire les informations relatives aux systèmes étudiés, sont constitutives de l'identité même de ces systèmes. Identité dont sont constitutives aussi des classes bien définies de brisures de symétrie : ce qui existe à un côté dissymétrique, celui-là même grâce à quoi nous le distinguons. Ce qu'exprime I. Prigogine (a) lorsque, discutant l'irréversibilité des phénomènes, il s'exclame : « L'univers est dissymétrique » et lorsque, pour appuyer son propos, il cite Pasteur : « La vie telle qu'elle se manifeste à nous est une fonction de l'asymétrie de l'univers et une conséquence de ce fait. » C'est en effet Pasteur qui fut parmi les premiers à prendre en compte explicitement le rôle des brisures de symétrie dans le vivant. Du fait, sans doute, qu'il avait eu l'attention attirée par ses travaux de physico-chimiste sur la rotation opposée du plan de polarisation de la lumière par les tartrates selon que leur molécule présente une configuration ou la configuration symétrique dans un miroir et que les activités biologiques correspondantes se sont révélées dépendre fortement de ces configurations. Notons ici que la question des symétries et de leurs brisures se fait également très présente en biologie : symétries bilatérales (gauche/droite), symétries de répétitions (métameries) ou encore symétries de dilatations manifestées par les propriétés d'allométrie mises en évidence par d'Arcy Thompson et développées ultérieurement en termes de propriétés d'invariances d'échelle — de « scaling » — (Peters, Schmidt-Nielsen), voire présence de géométries fractales dans bien des organes (membranes d'interfaces, réseaux arborescents).

Discussions : symétries, brisures de symétries et catégorisation du réel

Nous avons effectué une approche un peu générale du paysage conceptuel et théorique qui semble s'être progressivement organisé autour des notions de symétrie et de brisure de symétrie à partir de constructions de plus en plus abstraites qui ont permis les passages du mythique au rationnel, de l'intuitif au scientifique, de l'empirique au formel, du contingent au causal. Il est apparu que les concepts de symétrie et de leurs brisures constituent un franchissement supplémentaire dans la généralité théorique au point que, par-delà leur usage

opérateur, se trouvent remis en perspective certains principes épistémiques.

En effet, un premier aspect qui en résulte concerne la façon dont se trouve bousculé le concept de causalité, surtout quand on tente de le relier au concept de force. Ainsi, la relativité générale souligne la dualité existant entre la caractérisation de la géométrie de l'univers et celle de l'énergie-impulsion dans cet univers. De par cette dualité et les effets du principe d'invariance sous les difféomorphismes de l'espace-temps, les « forces » sont relativisées à la nature de cette géométrie : elles vont jusqu'à apparaître ou disparaître selon la nature géométrique de l'univers choisi pour décrire les comportements physiques. Il en va de même dans les théories de jauge où, cette fois, ce sont des variables internes qui se trouvent concernées : comme pour la relativité, le choix des jauges et leurs changements permettent de définir, ou au contraire de faire disparaître, certaines interactions. Si l'on considère qu'une des modalités d'expression et d'observation des processus causaux est à trouver dans la caractérisation des forces et champs qui « causent » les phénomènes observés, on voit que cette modalité se trouve remise en question par les effets de ces transformations. Non pas que la structure causale elle-même s'en trouve ruinée, mais la description de ses effets s'en trouve relativisée. Ce qui conduit à s'en faire une représentation plus élaborée et plus formelle que celle qui résulte de l'intuition issue des comportements classiques : les causes deviennent des interactions et ces interactions elles-mêmes constituent le tissu de l'univers de leurs manifestations ; qu'on déforme ce tissu et les interactions semblent se modifier, qu'on intervienne sur les interactions et c'est le tissu qui se déforme.

Par ailleurs, relativement au concept d'observabilité cette fois, nous avons vu que l'existence d'invariances sous des opérations de symétries équivaut à l'expression de restrictions formelles à certaines possibilités d'observation. Ainsi, théories de jauge et groupes de relativité fixent les limites de la connaissance que l'on peut avoir d'un système et des quantités que l'on peut mesurer. L'extraordinaire tient au fait que ce sont précisément ces principes de relativité, ces limites imposées à l'observation, qui contribuent à déterminer, en un sens très fort, les objectivités physiques qui y obéissent. En fait, il convient de distinguer soigneusement entre la nature de ce sur quoi portent les inobservabilités et la nature des quantités invariantes qui en résultent. L'analyse des exemples déjà mentionnés montre que ce qui fait l'objet des inobservabilités fondamentales est toujours relatif au cadre référentiel, c'est-à-dire à l'univers de repérage, auquel les phénomènes sont rapportés : les espaces-temps de nature variée (y compris des espaces très abstraits) dans lesquels ils sont définis. Ainsi, la détermination des objectivités physiques semble corrélative de l'indétermination (réglée) des repères relativement auxquels elles se manifestent.

Plus fondamentalement encore, il apparaît que le

couple symétrie/brisures de symétrie commence à jouer dans l'intelligibilité de la physique un rôle semblable à celui que détiennent déjà dans d'autres secteurs disciplinaires certaines dichotomies fondatrices comme, en mathématiques, fini/infini, continu/discret, local/global (Lautman). Nous avons vu qu'à travers la dialectique de ce couple, thématiques d'un côté l'invariance, la conservation, la régularité, l'équivalence, et de l'autre côté la criticité, l'instabilité, la singularité, la mise en ordre, c'est un pan essentiel de l'identité même de l'objet scientifique qui se trouve mis en scène et objectivé. Peut-on aller plus loin et considérer qu'ainsi on parvient à construire cette identité à un niveau tel que se trouvent dorénavant mobilisés des schèmes cognitifs conçus comme des conditions de possibilité de toute construction d'objectivité, renouant en cela avec une forme d'approche transcendante (Petitot) ? De fait, on peut montrer qu'il existe une parenté formelle étroite entre les propriétés abstraites de symétrie que capturent les structures mathématiques de groupe et des structures logiques aussi fondamentales que la relation d'équivalence (B. van Fraassen soutient même que « les trois concepts de relation d'équivalence, de partition et de groupe de transformations reviennent en réalité à un seul et même concept »). Comme on sait que l'ensemble des opérations de symétrie laissant invariant un système forme un groupe, on voit que les propriétés de symétrie elles-mêmes sont reliées à la relation d'équivalence. Parallèlement, on peut montrer qu'il existe une parenté formelle similaire entre structure de semi-groupe, dont on fait un usage essentiel pour le traitement en renormalisation des phénomènes critiques, et la structure logique de la relation d'ordre. Or, l'analyse formelle des notions abstraites d'espace et de temps renvoyant elle-même aux structures mathématiques de groupe et de semi-groupe respectivement (les propriétés de l'espace renvoient à celles du groupe – déplacements –, celles de l'écoulement temporel aux caractéristiques du semi-groupe), nous voyons alors se constituer un couple de complexes abstraits qui représente sans doute une des bases essentielles de toute interprétation objective dans les démarches de connaissance : les complexes (espace, structure de groupe, relation d'équivalence) d'une part et (temps, structure de semi-groupe, relation d'ordre) d'autre part. Précisons que les espace et temps évoqués dans ces complexes ne renvoient plus désormais à des entités physiques proprement dites, mais plutôt aux cadres conceptuels qui sont censés permettre à toute physique de se manifester, c'est-à-dire à des conditions de possibilité abstraites et non à des réalisations effectives, réactualisant un point de vue (Kant) où espace et temps ne sont plus considérés comme des « objets » que l'on étudie mais comme des conditions de possibilité de toute expérience sensible. Si cette approche est correcte, il apparaît alors qu'avec la formation de ces deux pôles (renvoyant aux sémantiques respectives de permanence et de changement, d'identité et de différenciation) se trouverait entièrement balisé le champ des conditions de possibilité de toute science de la nature.

En ce sens, symétries et brisures de symétries associées à ces complexes gnoseologiques apparaissent non seulement comme des éléments d'intelligibilité du réel physique mais bien comme des facteurs de constitution scientifique d'un tel réel.

► BOCCARA N., *Symétries brisées*, Paris, Hermann 1976. – BOULIGAND Y., *Biologie théorique*, Solignac 1987, Paris, CNRS, 1989. – ENQUIST M. & ARAK A., « Symmetry, beauty and evolution », *Nature*, 372, 10 nov. 1994. – HÉRITIER F., *Masculin/Féminin. La pensée de la différence*, Paris, Odile Jacob, 1996. – JOHNSTONE R.A., « Female preference for symmetrical males as a by-product of selection for mate recognition », *Nature*, 1994, 372, 10 nov. – KANT E., *Critique de la raison pure* (1781 et 1787), trad. fr. A. Tremesaygues & B. Pacaud, Paris, PUF, 1986. – KIRKPATRICK M. & ROSENTHAL G.G., « Symmetry without fear », *Nature*, 372, 10 nov. 1994. – KLEIN E. & SPIRO M. éd., *Le temps et sa flèche*, Paris, Frontières, 1994. – LAUTMAN A., *Essai sur l'unité des mathématiques*, Paris, UGE, 1977. – LE BELLAC M., *Des phénomènes critiques aux champs de jauge*, Paris, CNRS, 1988. – NICOLIS G. & PRIGOGINE I., *À la rencontre du complexe*, Paris, PUF, 1989. – NOETHER E., « Invariante Variationsprobleme », *Kgl. Ges. d. Wiss. Nachrichten. Math.-phys. Klasse*, 1918, n° 2, p. 235. – PETERS R.H., *The ecological implications of body size*, Cambridge Univ. Press, 1983. – PETITOT J., « Refaire le Timée », *Rev. Hist. Sc.*, 1987, XL, 1, p. 79. – PRIGOGINE I. (a), *Les lois du chaos*, Paris, Flammarion, 1994 ; (b), *La fin des certitudes*, Paris, Odile Jacob, 1996. – PRIGOGINE I. & STENGERS I., *Entre le temps et l'éternité*, Paris, Fayard, 1988. – SCHMIDT-NIELSEN A., *Scaling*, Cambridge Univ. Press, 1984. – SIVARDIÈRE J. (a), Remarques sur le principe de Curie, *Bull. Un. Phys.*, 1986, n° 689 ; (b), *La symétrie en mathématiques, physique et chimie*, Grenoble, Presses Univ., 1995. – THOM R. (a), *Stabilité structurelle et morphogénèse*, Paris, InterEditions, 2^e éd., 1977 ; (b), *Modèles mathématiques de la morphogénèse*, Paris, Christian Bourgeois, 1981. – THOMPSON D'ARCY W., *On Growth and Form*, Cambridge Univ. Press, 1961 ; *Forme et croissance*, Paris, Le Seuil/CNRS, 1994. – TOULOUSE G. & PFEUTY P., *Introduction au groupe de renormalisation et à ses applications*, Grenoble, Presses Univ., 1975. – ULLMO J., *La pensée scientifique moderne*, Paris, Flammarion 1969. – VAN FRAASSEN B., *Laws and Symmetry*, Oxford Univ. Press, 1989 (trad. fr. C. Chevalley, *Lois et symétrie*, Paris, Vrin 1994). – WEYL H., *Symmetry*, Princeton Univ. Press, 1952 ; *Symétrie et mathématique moderne*, Paris, Flammarion, 1964. – WILSON K.G., « The renormalization group and critical phenomena », *Rev. Mod. Phys.*, 1983, 55, n° 3. – ZEH H.D., *The physical basis of the direction of time*, Berlin/Heidelberg, Springer, 1989. – Coll. : *La symétrie aujourd'hui*, Paris, Le Seuil, 1989.

Francis BAILLY et Rémy MOSSERI

→ Big bang ; Groupes et symétrie ; Invariance de jauge ; Irréversibilité ; Structure ; Temps.

SYNTHÈSE

CHIMIE

Prométhée délié

La synthèse organique s'enracine dans la philosophie des Lumières et l'*Encyclopédie*. Il s'agit de faire pièce au créationnisme d'origine divine. Le Romantisme littéraire et la science, sa contemporaine,

éprouvent une égale fascination pour le mythe de Prométhée. Shelley, qui faillit se faire chimiste, écrivit un grand poème sur ce héros. Mary Shelley poussa peut-être plus loin encore son exploration du même thème. Lorsque Victor Frankenstein entreprend de donner vie à un magma de chair, son inspiration lui vient des découvertes de la chimie contemporaine, celle d'Humphry Davy en gros. D'emblée, après Friedrich Wöhler et sa synthèse involontaire de l'urée (1828), la synthèse organique s'efforce de clore le débat sur une quelconque distinction entre le naturel et l'artificiel. Elle se fait quête d'une identité entre la substance, création de la nature, et le produit, résultat de l'art.

Ainsi, la synthèse infirme le sens commun, tel qu'il perdure dans le lucratif marché des aliments sains, hors engrais chimiques ou dans des réglementations qui prévoyent par exemple que la vanilline – l'arôme des glaces à la vanille – d'origine naturelle se vend 25 000 F du kilo contre 100 F du kilo pour la molécule de synthèse, alors qu'à de minimes différences près de teneurs isotopiques, les deux produits sont identiques. Le préjugé de l'artificiel est coûteux, la chimie de synthèse le répète à l'oreille de sourds. La chimie anéantit d'entières économies traditionnelles : la synthèse de l'alizarine (1868) met fin à la culture de la garance, pour teindre des tissus en rouge ; les parfumeurs de Grasse, ayant mis sur les essences de plantes, sont balayés par l'introduction dans les parfums de molécules artificielles, dont on contrôle beaucoup mieux la pureté et les proportions relatives ; les fibres synthétiques viennent dans les mêmes années 1950 donner le coup de grâce à l'industrie textile du Nord et des Vosges, et aux soyeux de Lyon.

Glissement historique du projet

Les quelques rares synthèses accomplies durant la première moitié du XIX^e s. s'inscrivent dans le débat philosophique autour du vitalisme et de la Naturphilosophie, retranchés dans des Facultés de médecine sur tout. La synthèse de grandes molécules organiques participant du métabolisme, celle de l'urée par Wöhler – croyant fabriquer du cyanate d'ammonium, il obtint un isomère –, celle méticuleuse, étape par étape, de l'acide acétique par Hermann Kolbe (1844), démontrent aux intellectuels l'absence d'une force vitale, et la validité opératoire du réductionnisme.

Tel n'était pas particulièrement l'objectif de leurs auteurs. Ils avaient voulu simplement prouver une hypothèse structurale, par la synthèse d'une molécule répondant à la formule postulée. Cela deviendra, durant toute la période approximative 1880-1940, le premier objectif de la synthèse que de valider, de la sorte, une structure, conjecturée à la suite d'une série d'opérations, dont certaines à haut risque car susceptibles de modifier la structure de l'objet moléculaire.

Il revient à Marcelin Berthelot, auteur ou captateur des synthèses d'objets moléculaires centraux pour la chimie, le benzène tout particulièrement, de redéfinir le projet du chimiste de synthèse : « La chimie crée son

objet. » Mais Berthelot, bien qu'auteur de la réflexion épistémologique sur la synthèse la plus détaillée, la mieux argumentée (1869), est d'ores et déjà marginalisé vis-à-vis de la synthèse chimique de la seconde moitié du XIX^e s.

La synthèse significative n'est pas tant la synthèse totale de molécules emblématiques simples telles que l'acétylène ou le benzène. Ce sont des objets moléculaires plus complexes, polyfonctionnels, qui s'emparent de l'imagination des chimistes et des capitaux des financiers, investissant dans l'industrie chimique naissante.

Dans les années 1850, en effet, le tout jeune étudiant William Henry Perkin, au vu de la formule brute de la quinine, imagine de la préparer par quasi-doublement à partir d'un composé d'une masse moléculaire équivalente approximativement à la moitié. Ce faisant, il prépare un colorant, la mauvéine (1856), exploité immédiatement dans une entreprise lancée avec son père et son frère. Sa vogue chez les élégantes, plusieurs années durant, aide au lancement de l'industrie des colorants. L'idée fautive de Perkin est des plus fructueuses, elle est à l'origine des rapports étroits qu'entreprendront désormais l'industrie pharmaceutique et la chimie de synthèse.

Aujourd'hui encore, les laboratoires de chimie synthétisent des substances naturelles complexes, pour fournir aux études pharmacologiques des quantités beaucoup plus abondantes que celles issues, en règle générale, des organismes, plantes ou insectes (gelée royale des abeilles) ; et pour élaborer de nombreux analogues, permettant de mettre au point des médicaments plus actifs, pénétrant mieux la barrière cérébro-meningée, résistant davantage à la dégradation métabolique et en tirant donc une durée d'action accrue.

C'est encore la chimie de synthèse que l'homme met à contribution dans sa lutte implacable contre les bactéries. Il nous faut constamment élaborer de nouveaux antibiotiques dans la guerre chimique nous opposant aux microorganismes, dont les mutations font des souches résistantes aux antibiotiques de la génération antérieure. La mise en chantier de la synthèse de la pénicilline durant la Seconde Guerre mondiale par l'industrie chimique dans des conditions de secret, d'urgence et d'ampleur des moyens matériels comparables à celles du Manhattan Project, fut le premier essai de synthèse de médicaments, enfin réellement efficaces dans la lutte antimicrobienne. La structure de la pénicilline établie (Woodward, 1944), sa synthèse chimique put se faire (John Sheehan, 1957).

Fonctions épistémiques

Synthétiser une substance s'inscrit dans une logique de la confirmation, et non pas dans une approche de conjectures et de réfutation. En règle générale, le chimiste synthétisant une substance – un travail de longue haleine, nécessitant souvent au moins une trentaine d'années-chercheur – est ou se croit certain de la structure de la molécule qu'il bâtit. La preuve du succès,

bien qu'opératoire, est irréfutable. L'absence de dépression du point de fusion, au mélange de la substance naturelle avec le produit de synthèse, établit sa pureté. Cette identification, on le voit, n'a rien à envier aux démonstrations des mathématiciens. Outre quelques raisonnements fondés sur la symétrie ou son absence, c'est l'une des rares certitudes pour la science expérimentale.

Si synthétiser l'un des édifices moléculaires complexes de la nature accède en son achèvement à une logique de l'identité, ce moment ultime de satisfaction positiviste est précédé d'un long labeur, d'abord analytique, puis effectif.

C'est le lieu de remarquer que les mots « analyse » et « synthèse » n'ont plus, pour la chimie, de sens opposés et complémentaires. Le premier a été remplacé par « la détermination de structure », qui n'entre plus guère dans les missions de la chimie analytique, mais qui a été institutionnalisée au sein soit de la chimie organique, soit de la chimie inorganique. Cette détermination de structure s'effectue soit par la diffraction des rayons X, chaque fois qu'on peut cristalliser la molécule-cible, soit en combinant les informations fournies par diverses spectroscopies, surtout résonance magnétique nucléaire et spectrométrie de masse. Ainsi, le prérequis est la détermination de la structure de la molécule-cible, connaissance de l'arrangement précis des atomes constitutifs, dans l'espace à trois dimensions.

Vient alors la partie analytique, formalisée par Élias J. Corey, qui lui valut le prix Nobel de chimie en 1990, l'« analyse rétrosynthétique ». Partant de la molécule-cible comme d'une donnée, on examine, de manière systématique, la déconnexion des paires d'atomes liés entre eux, dans la molécule-cible. Cet ensemble d'opérations formelles, des transformations antithétiques, car en sens inverse des constructions synthétiques, définit un certain nombre d'autres structures, plus simples. Et on recommence.

Puisque le nombre de sous-structures augmente très vite, au fur et à mesure de cette régression logique, le chimiste s'aide de l'ordinateur : pour cataloguer les molécules intermédiaires ; pour modéliser leur géométrie ; pour évaluer ses chances de succès au départ de précurseurs plus simples, compte tenu du répertoire des réactions de la chimie et du catalogue des matières premières disponibles et de leur coût. De la sorte, la synthèse se planifie rationnellement. Cette conception assistée par ordinateur de la meilleure voie d'accès à un objectif ne diffère pas, dans son essence, des procédures mises en œuvre dans un état-major, militaire ou civil, qu'il s'agisse de faire évacuer le Koweït, d'envoyer une sonde dans l'espace, ou de construire un Airbus.

Les synthèses biomimétiques s'inspirent des voies métaboliques de la biosynthèse. L'artifice y cherche à copier le naturel, non seulement dans l'objet moléculaire fini, mais aussi dans la manière d'y accéder. À l'école de la nature, le chimiste réalise ainsi des syn-

thèses courtes et spécifiques. Cependant, la nature est plus parcimonieuse dans la variété de ses procédures, moins imaginative aussi. De telles synthèses valent plutôt par le décalage astucieux d'avec les procédures naturelles que par l'imitation servile.

Esthétiques

Il est un art de la synthèse, telle que mise en œuvre dans les laboratoires universitaires, et il est un utilitarisme de la synthèse, telle que pratiquée dans l'industrie, pour produire un médicament au meilleur coût. Il n'est pas rare qu'une synthèse classique, admirable dans sa conception et dans son exécution, ne reçoive jamais d'application. C'est le cas du longifolène, une substance provenant d'un pin de l'Himalaya, qui fut l'objet de synthèses superbes par E.J. Corey (Harvard), par Wolfgang Oppolzer (Genève), et par Alex Fallis (Ottawa). Il est fréquent que des synthèses en laboratoire de molécules utiles pour leurs activités biologiques (antitumorales, par exemple) soient totalement revues, aux fins d'industrialisation.

L'art de la synthèse, c'est tout d'abord son efficacité, telle qu'on peut la chiffrer au nombre d'étapes et au rendement global : la synthèse de la rifamycine, un antibiotique, fut ainsi améliorée par Masamune Satou (MIT) par rapport aux trois synthèses antérieures par Kishi Yoshio (Harvard). Osons une métaphore. Les grimpeurs parlent de « directissime » pour une voie, ouverte dans une face, et se rapprochant de la trajectoire la plus courte entre la base et le sommet. Lorsque Clayton Heathcock (Berkeley) obtint la daphniphylline, un alcaloïde, avec 65 % de rendement, en formant cinq nouvelles liaisons chimiques dans une séquence spontanée, sans isoler d'intermédiaires, il accomplit aussi une directissime.

L'art de la synthèse, c'est aussi une manifestation de la maîtrise de son créateur : quel meilleur moyen d'introduire une nouvelle réaction chimique, ou une variante améliorée d'une réaction existante, que de l'incorporer à la synthèse multistades d'une substance naturelle complexe ! L'art de la synthèse, c'est surtout la réussite de l'étape-clé : C'est dans celle-ci qu'intervient une modification structurale faisant basculer la *Gestalt*, de la structure de précurseurs, ne laissant pas pressentir la forme de l'objet final, à une structure préfigurant celle de la molécule-cible. Les grandes synthèses se jaugent à l'élégance de cette étape-clé, à son caractère implausible, surprenant, auquel on n'aurait pas pensé. Pour cette raison, il n'est pas rare d'assister à une transposition, dans cette étape-clé. L'art de la synthèse, c'est enfin l'aptitude à contourner l'échec. La chimie, science volontariste, n'est pas encore capable de réussite assurée dans chaque transformation. La nième étape d'une synthèse peut se solder par un échec imprévu ; et il ne peut être question d'abandonner, alors qu'on est si près du but. Le chimiste doit imaginer alors une autre manière de franchir, ou de contourner l'obstacle.

Un artiste de génie

L'aptitude cognitive caractéristique du grand chimiste de synthèse est la perception de rapports non évidents entre des objets moléculaires *a priori* non ressemblants, d'où il tire une conception originale de l'accès à la molécule-cible. Certes, cette faculté coïncide avec le sens étymologique de « intelligence », dans son acception la plus forte d'imagination créatrice. La chimie de synthèse fournit ainsi aux sciences cognitives un très riche lot de données.

Nul n'a mieux déployé ce talent que Robert Burns Woodward (1917-1979), sans doute le plus grand chimiste du XX^e s. Enfant prodige, au fulgurant parcours universitaire, Woodward mit à son crédit les grandes synthèses des substances naturelles les plus complexes, les plus présentes à l'horizon de la chimie : quinine (1944), strychnine, auréomycine, terramycine (1945-1956), cholestérol et cortisone (1951), strychnine (1954), réserpine (1956), chlorophylle (1960)... Le prix Nobel couronnait en 1965 ces conquêtes de sommets jugés inaccessibles. Woodward fit converger son savoir encyclopédique des réactions de la chimie, sa maîtrise des méthodes physiques de détermination structurale, l'utilisation de considérations mécanistiques, et celle, en pionnier, de données stéréochimiques. Un exemple de sa vision est la perception de la ressemblance structurale entre l'homoméroquinone, un précurseur de la quinine, et l'isoquinoline : la synthèse de la quinine pouvait s'ancre dans cette observation.

Le chef-d'œuvre woodwardien est sa synthèse de la vitamine B12, conjointement avec le groupe d'Albert Eschenmoser (1976). Durant cette synthèse, Woodward fut intrigué par le contraste stéréochimique entre les produits de cyclisations, suivant qu'ils provenaient d'un chauffage ou d'une irradiation photochimique. Cette observation, qu'il fit suivre d'une collaboration avec le jeune théoricien Roald Hoffmann, déboucha sur l'énoncé de règles de sélection applicables à une grande classe de réactions chimiques, les réactions électrocycliques. Ces règles, d'une grande simplicité et d'une indéniable beauté, comparables pour l'importance aux lois de Maxwell, sont l'un des fleurons de la chimie du XX^e s.

Esquisse d'une sociologie

La synthèse exige une main-d'œuvre nombreuse. Des groupes de plusieurs dizaines de personnes sont fréquents. Dans la tradition du laboratoire de Justus von Liebig, à Giessen, la répartition des tâches est contrastée, entre le patron, responsable de la conception d'ensemble et du financement, et les manants. Leur formation les prépare particulièrement bien à une carrière industrielle. L'imbrication université-industrie investit le domaine de valeurs industrielles, telles que le dogme de l'empirisme essai-erreurs, la méfiance à l'égard du rationnel et de la théorie.

► BERTHELOT M., *La synthèse chimique*, Paris, Félix Alcan, 6^e éd., 1887. — FURHOP J. & PENZLIN G., *Organic synthesis. Concepts, Methods, Starting Materials*, Weinheim, Verlag Chemie, 1983. — LASZLO P., *Logique et synthèse organique*, Paris, Ellipses « Coll. des cours de l'École Polytechnique », 1993. — NICOLAOU K.C. & SORENSEN E.J., *Classics in total synthesis*, Wiley-VCH, Weinheim, 1996. — NICOLAOU K.C. & SNYDER S.A., *Classics in total synthesis II, more targets, strategies, methods*, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.

Pierre LASZLO

→ Berthelot : Chimie physique ; Molécule.

SYNTHÈSE MATHÉMATIQUE → Analyse et synthèse

SYSTÈME

L'étonnante universalité de la notion de système, qui suggère l'attribution de quelques caractères communs à des phénomènes apparemment fort disparates, du système nerveux au système solaire en passant par le système métrique et le système politique, intrigue depuis quelques siècles la recherche scientifique. Peut-on penser que le hasard ou l'arbitraire aient incité les humains à identifier tant de concepts familiers et mutuellement incommensurables par ce même préfixe système ? Ne faut-il pas présumer quelques invariants conceptuels masqués sous la diversité des attributs ? Former cette hypothèse plausible suggère déjà des programmes de recherche aux scientifiques qui les considèrent.

Les systèmes sont-ils dans la nature ?

Condillac le soulignait déjà dans l'article « Système (métaphysique) » pour l'*Encyclopédie raisonnée des Arts et des Métiers*, peu après avoir publié son célèbre *Traité des Systèmes* (1749-1754) : « Il n'y a point de science ni d'art où l'on ne puisse faire des systèmes. Mais dans les uns on se propose de rendre raison des effets, dans les autres, de les préparer et de les faire naître. Le premier objet est celui de la physique ; le second est celui de la politique. » « Observez l'esprit humain », ajoutait-il dans son *Traité*, « et vous verrez dans chaque siècle que tout est système chez le peuple comme chez le philosophe ». Ce « tout est système » n'annonce-t-il pas le célèbre « systems everywhere » par lequel le biologiste L. von Bertalanffy introduira, deux siècles plus tard, la General System Theory (GST) ? Mais qu'est cet universel système ?

Les réponses que proposait Condillac s'entendent dans le contexte du siècle des Lumières qui, depuis Leibniz, cultivait volontiers ce concept fédérateur. Trois *Systèmes de la Nature* au moins, fort différents au demeurant, furent publiés entre 1735 et 1770 (Linné, de 1735 à 1768 ; Maupertuis en 1754 et Hollbach en 1770) ! Condillac publiait son *Traité des Systèmes* pour se démarquer explicitement de conceptions qu'il tenait

pour trop théoriques ou abstraites (« Descartes, Malebranche, Leibniz... chacun à l'envi nous en a prodigué ») ou trop hypothétiques (« c'est l'insuffisance des maximes abstraites qui a obligé à avoir recours à ces sortes de supposition »). Il plaide pour les « vrais systèmes, ceux qui ne s'appuient que sur des faits bien prouvés... systèmes qui exigent un assez grand nombre d'observations pour qu'on puisse saisir l'enchaînement des phénomènes ». Position empiriste inspirée par J. Locke que développera son *Traité des sensations* (1754), privilégiant une conception phénoménologique ou interactionniste de la connaissance qui tardera à réapparaître dans la réflexion scientifique : « Nous ne pensons qu'au contact du monde. »

Cette définition instrumentale de Condillac : « Le système est ce qui permet à l'esprit humain de saisir l'enchaînement des phénomènes » va pourtant progressivement constituer le noyau des conceptions contemporaines constructivistes du concept de système ; mais sa maturation au fil de ces deux siècles va s'avérer si effervescente que l'on ne peut ici qu'esquisser certains de ses traits saillants. Effervescence dont témoigne dès l'origine la présentation même du concept de système par l'*Encyclopédie* : à l'article « Système (métaphysique) » viendront très vite s'ajouter de nombreux autres paragraphes allant du « Système du philosophe chrétien » au « Système en terme d'astronomie », au « Système du monde », au « Système de fortification militaire », au « Système en musique » ou au « Système en finance ». Au total, plus de quarante pages dont « l'enchaînement » sera souvent difficile à saisir ! Dès l'origine, le concept de système devra souvent être utilisé comme un concept-valise, permettant à bien des auteurs ayant quelque difficulté à se faire entendre dans leur discipline d'origine de publier leurs réflexions sous ce label sans se soucier beaucoup de la légitimité épistémologique et méthodologique de leur démarche.

Cet usage laxiste du concept de système compréhensible dans les écrits scientifiques et techniques du XVIII^e s., alors que son statut épistémologique était encore fort confus, oscillant entre physique et métaphysique, se poursuivra jusqu'à la fin du XX^e s., affectant longtemps sa respectabilité académique et retardant ainsi sa recevabilité par les institutions d'enseignement et de recherche.

Mais cette précipitation, en se décantant, nous laisse l'argument fort sur lequel pourra se développer l'épistémologie du concept de système (on dira bientôt : le paradigme [de la] systémique) : le système est ce qui permet à l'esprit humain de saisir l'enchaînement (puis les interactions) des phénomènes qu'il perçoit ou qu'il conçoit. Un langage pour « l'exercice de la pensée, qui permette de raisonner abstraitement sans rompre avec la réalité sensible » dira S. Aurox, présentant le dernier ouvrage de Condillac au titre significatif : *La Langue des calculs* (1780-1798). Le système n'est pas *a priori* dans la nature, il est dans l'esprit humain, lui permettant de saisir l'enchaînement des phénomènes ou de les modéliser intentionnellement pour nous les rendre intelligibles, disons-nous aujourd'hui.

Le traité des systèmes n'allait pourtant pas connaître une grande audience dans le siècle qui suivit. L'empirisme de Condillac s'estompa bientôt dans la culture scientifique du XIX^e s., dominée par le cartésianisme et le rationalisme. Si bien que Claude Bernard, voulant restaurer la *Méthode expérimentale*, la définira comme « anti systémique... Les systèmes sont séduisants parce qu'ils donnent la science absolue réglée par la logique seule : ce qui dispense d'étudier... Il faut donc éviter avec soin toute espèce de système, et que la raison que j'en trouve, c'est que les systèmes ne sont point dans la nature, mais dans l'esprit des hommes » (*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, 1865, p. 297). Ainsi l'argument de Condillac semblait se retourner contre sa thèse : puisque « les systèmes ne sont pas dans la nature », il faudrait « éviter toute espèce de système », ceci au nom du même empirisme que celui qu'il avait plaidé (en prolongeant la pensée de J. Locke) en recherchant le système modélisateur « dans l'esprit des hommes ».

Sans doute faut-il ici encore entendre le propos de Claude Bernard dans son contexte culturel : la postérité ne tiendra-t-elle pas ce grand physiologiste pour un des « grands précurseurs » de la systémique contemporaine (L. von Bertalanffy, *GST*, 1968, p. 12) ? Peut-être récusait-il plus volontiers une systémique arborescente linnéenne devenue positiviste sur laquelle se développaient les sciences naturelles au XIX^e s. (alors dans une inspiration souvent plus anatomiste ou morphologique que physiologique ou phylogénétique), qu'une systémique non linéaire dont le projet même semblait alors inconcevable ? Il en eut peut-être l'intuition en complétant sa profession de foi par un corollaire épistémologique, audacieux en 1870 : « Le positivisme qui, au nom de la science, repousse les systèmes philosophiques, a comme eux le tort d'être un système » (p. 297). Autrement dit « une doctrine [...] que l'on regarde comme immuable et [...] que l'on se croit dispensé de soumettre désormais à la vérification expérimentale » (p. 296). La thèse des « vrais systèmes » de Condillac réapparaissait par ce détour un siècle après sa publication : « S'il y a des effets qu'il [le système] n'explique pas, on ne doit pas le rejeter, on doit travailler à découvrir les phénomènes qui le lient avec eux et qui forment de tous un seul système » (article « Système, métaphysique » de l'*Encyclopédie*, 1760) ! Si la théorie initiale du système semblait ainsi sinon oubliée du moins peu et malaisément invoquée tout au long du XIX^e s. et au début du XX^e, peut-être faut-il en attribuer la responsabilité à deux des caractéristiques fondamentales que Condillac lui avait spontanément attribuées dans le contexte culturel duquel il l'avait élaborée.

D'une part, il entendait la modélisation des phénomènes sur le schéma cartésien de l'enchaînement (« ces longues chaînes de raisons toutes simples et faciles dont les géomètres ont coutume de se servir », *Discours de la Méthode*), suggérant ainsi le modèle de l'arborescence sans boucles sur lequel allait se construire la systémique, réduisant ainsi implicitement la théorie des systèmes à une théorie des systèmes

linéaires de causes présumées efficientes. D'autre part, il entendait la modélisation des phénomènes par l'observation des « faits a-téléologiques » (ou des objets ou des parties ou des résultats) plutôt que par celle des « faire téléologiques » (ou des actes ou des opérations ou des processus). Cette attention aux faits plutôt qu'aux faire va inciter le modélisateur à « procéder à des dénombrements aussi entiers [...] [qu'il] fut assuré de ne rien omettre » (*Discours de la Méthode*), et donc à fermer le modèle du système avant de l'interpréter. La modélisation des systèmes fermés devenait dès lors nécessairement analytique, ou anatomique ; on peut présumer que c'est cette caractéristique que le physiologiste Claude Bernard tenait pour dissuasive, l'incitant à ne pas privilégier un mode de représentation qui tenait compte de l'état des organes plutôt que de l'activité des processus auxquels il invitait le biologiste à s'intéresser.

Ce diagnostic de la réduction implicite de la modélisation d'un phénomène par un système fermé à la modélisation analytique, et de son interprétation par un raisonnement causaliste linéaire (ou déductif) allait être formulé par quelques épistémologues dès le début du XX^e s. On cite aujourd'hui volontiers des pages fort explicites de *La Tektologie* de Bogdanov (1913) et surtout des *Cahiers* de P. Valéry (1894-1945), grâce auxquelles on peut aisément reconnaître les effets pervers du monopole de la modélisation analytico-linéaire dans les pratiques de la « découverte scientifique » depuis un siècle. Mais ces textes ne furent accessibles que dans les années 1970 (l'œuvre épistémologique de Bogdanov fut bannie sous l'ère stalinienne et n'est disponible que dans une traduction anglaise réduite (*Essays in tektology*), publiée par G. Gorelik en 1980 ; quant aux *Cahiers* de P. Valéry, ils ne furent édités par J. Robinson qu'en 1973, si bien qu'on ne peut leur attribuer le crédit du renouveau de la modélisation systémique qu'on observera dans les cultures et les institutions scientifiques deux siècles après la parution du *Traité des systèmes* de Condillac, à partir de 1948.

Le système des sciences appelle une science des systèmes

Sans doute est-ce à nouveau une confuse aspiration à l'unité de la science sinon à l'unité de la connaissance qui motivait les scientifiques auxquels on accorde le crédit d'avoir alors « ré-activé » le concept de système dans la culture scientifique contemporaine... après « une aussi longue absence ». Il semble qu'aucun de ceux dont on va évoquer les contributions à cette « Révolution scientifique » au sens de T.S. Kuhn (1963) qui allait voir l'émergence progressive des paradigmes de la cybernétique et de la *GST* puis de la systémique dans les discours et les pratiques des sciences aux abords de l'an 2000, aient dans les années 1950 eu souvenir du *Traité des systèmes* de 1749 ou de l'impressionnante effervescence que suscitait la notion de système dans la recherche scientifique au XVIII^e s. La systémique elle-même, pourtant issue du premier

Système de la nature de Linné (1735), semblait avoir épuisé son potentiel de production dans le développement des sciences naturelles au XIX^e s. (Elle ne se renouvellera qu'à partir des années 1970 avec l'essor et les controverses épistémologiques suscitées par l'école cladiste ou phylogénétique de W. Hennig, sans que ses contributions aux développements de la systémique contemporaine soient encore notables : voir P. Tassy éd., *L'ordre et la diversité du vivant*, 1986.)

En revanche les uns et les autres, bien qu'issus de champs disciplinaires très divers, souhaitaient manifestement retrouver les repères d'une unité de la connaissance que la diaspora des innombrables disciplines et sous-disciplines positives avait apparemment fait oublier. Aspiration culturelle qui se doublait d'une aspiration civique ou politique, les effets pervers pour les sociétés du scientisme prôné par les épistémologies positivistes alors dominantes devenant insupportables à nombre d'entre eux : P. Valéry évoquera, en 1943 « ce funeste présent de la science positive [...] que l'Europe [...] lègue au monde, c'est-à-dire à la vie des êtres vivants » (*Cahiers*, *Pléiade*, II, p. 1533). La quête de ce *Paradigme perdu*, *l'Unité de l'homme*, ainsi que l'intitulera E. Morin dans un essai devenu célèbre (1973), était aussi la quête de l'Unité de la connaissance humaine. Comment rendre compte de cette Unité de la science que ne parvenait plus à exprimer « l'arbre des sciences positives » apparemment immuable depuis qu'A. Comte l'avait dessiné en 1828 : chaque discipline semblant revendiquer la propriété exclusive de « son arbre », de son objet, de sa méthode, de ses procédures d'évaluation, en affichant son autonomie par rapport à toutes les autres et son indépendance arrogante vis-à-vis de la société. Les innovateurs n'ayant d'autres ressources que de constituer à leur tour une nouvelle sous-discipline, également autonome, et de batailler pour l'imposer sur l'échiquier fermé des disciplines académiquement enseignables. Cette quête du « paradigme perdu » s'exprimait par les efforts de reconfiguration d'un « système des sciences » qui assure à la fois l'entendement des rapports du savoir et de la société, se percevant mutuellement en coévolution, et celui des relations des savoirs entre eux, savoirs se percevant dans leurs permanentes et multiples interactions, tant dans la définition de leur objet que dans le développement de leurs méthodes.

Cette méditation sur la reconfiguration du « système des sciences » ne s'explicitait sans doute pas initialement en ces termes. La revendication de l'unité de la science ne pouvait guère s'exprimer en terme de système, tant que ce terme ne serait pas lui-même restauré ou réhabilité dans la communication scientifique. Pour que l'expression « système des sciences » réapparaisse, en 1967, dans l'*Encyclopédie de la Pléiade* animée par J. Piaget pour désigner dans sa complexité une « classification » des disciplines que les modèles linéaires ou hiérarchiques traditionnels ne parvenaient plus à exprimer, il faudra que l'expression « science des systèmes » apparaisse à partir de 1962 et d'abord fort timidement dans quelques textes des pionniers

(L. von Bertalanffy, GST, 1968, p. 89). Ceux-ci préféreront longtemps parler de théorie du ou des systèmes, de système (en) général, ou même plus maladroitement « d'approche système » (la traduction française de l'expression anglaise « General System Theory » introduite par L. von Bertalanffy en 1950 et titre de son ouvrage le plus connu, suscite des controverses : de bons arguments justifiant « Théorie du système général » autant que « Théorie générale du ou des systèmes ». On se référera ici, selon l'usage anglo-saxon, au sigle GST lorsqu'il faudra la désigner spécifiquement). Il faudra attendre la fin des années 1970 pour que la science des systèmes s'institutionnalise progressivement comme une (nouvelle ?) discipline enseignable. Elle n'a peut-être pas encore assuré sa propre légitimité épistémologique, mais le pourra-t-elle jamais si elle assume le caractère récuratif de sa constitution : le système des sciences légitime une science des systèmes qui à son tour le légitime et le transforme ?

En tentant, comme le firent les pionniers des années 1950, « d'ajouter une nouvelle discipline » (« a new field in science » réclamait L. von Bertalanffy dès 1947, GST, 1968, p. 253) sans remettre en question la classification hiérarchique des disciplines léguée par A. Comte, on ne suscitait pas les questionnements épistémologiques dont le concept de système « outil de l'entendement » (« permettre à l'esprit humain de saisir les phénomènes ») était porteur. Et l'on suscitait de prévisibles conflits avec les nombreuses disciplines qui s'étaient approprié le mot système pour désigner rapidement « un ensemble fermé doté d'une application » ; la logique mathématique avait ses systèmes formels, l'algèbre ses systèmes d'équation, la physique ses systèmes mécaniques, les sciences naturelles sa systématique, etc. Le biologiste américain P.A. Weiss percevra en 1971 l'ambiguïté de cette désignation (*L'Archipel scientifique*, trad. fr., 1974, p. 98), au moment où la théorie analytique des ensembles devint l'instrument quasi universellement enseigné de la modélisation mathématique des phénomènes présumés réductibles à des ensembles fermés d'éléments irréductibles, et doté de quelque application fonctionnelle déterminée. Si la théorie des ensembles fait l'affaire, il n'est nul besoin de la rebaptiser théorie des systèmes. Mais si l'on veut « saisir le phénomène » autrement que de façon analytique, alors il importe de développer une théorie de la modélisation par les systèmes qui ne soit pas « ensembliste ». « Un système n'est pas un ensemble [...] et il est davantage qu'un ensemble complexe. » Cette confusion réduisant implicitement la notion de système à la notion d'ensemble sera soulignée peu après par Y. Barel dans *Le Paradoxe et le système* (1959) et incitera E. Morin (1977) comme P. Weiss (1974) à parler plus volontiers d'organisation que de système pour exprimer le mode d'entendement interactif et non réducteur *a priori* que peuvent permettre la représentation et l'interprétation des phénomènes par l'esprit humain comme et par un système. Mais la prégnance du mot système dans les cultures et les vocabulaires (son origine grecque, *sustema*, agencement ou

assemblage, lui vaut d'être passé pratiquement sous la même forme dans toutes les langues européennes) et sans doute le manque d'attention épistémologique des pionniers qui le restauraient dans la culture scientifique vers 1950, retarderont longtemps la formation et l'acceptation du paradigme original dont il est porteur. « La théorie générale des systèmes [...] a omis de creuser son propre fondement, de réfléchir le concept de système. Aussi, le travail préliminaire reste encore à faire » pourra écrire E. Morin introduisant *La Méthode* en 1977 (p. 101). Depuis cette date ce travail se fait, associant au concept de système les concepts conjoints de complexité et d'organisation. Mais on ne peut présenter ce mûrissement en cours sans rappeler la genèse (ou la renaissance) du concept de système dans les cultures scientifiques vers 1950.

L'aspiration à « l'unité de la science » que l'on trouve à l'origine s'entendait aisément à cette époque : le clivage entre les deux paradigmes scientifiques alors dominants et toujours rivaux, celui de la mécanique rationnelle et celui de la mécanique statistique était d'autant plus difficilement accepté qu'il ne permettait plus de rendre compte des évolutions des sciences biologiques (alors tiraillées entre des thèses mécanistes et vitalistes) et des sciences physiques classiques hésitantes devant la naissante mécanique quantique, comme de celles des sciences de l'homme et de la société, qui voulaient sortir du statut de sciences au rabais (ou « non exactes ») dans lesquelles les académies les enfermaient, et des sciences de l'ingénierie qui aspiraient à se libérer de l'image de sciences auxiliaires, sciences d'application des nobles sciences physiques par laquelle on les incitait à se définir. C'est autour du concept de système que cette quête de l'unité et de l'équité interdisciplinaire allait aisément pouvoir s'exprimer et recueillir une audience suffisante, principalement en Amérique du Nord, dans les premières années suivant la Deuxième Guerre mondiale. On est surpris, cinquante ans après, par l'insistance que ces pionniers attachaient au caractère effectivement interdisciplinaire de leurs initiatives, à une époque où l'on n'osait guère prononcer ce mot incongru !

La formation du paradigme cybernétique

La première formation interdisciplinaire effective et rayonnante que l'on rencontre dans cette étonnante histoire est suscitée par des chercheurs réputés en sciences de l'ingénierie et en neurobiologie : l'association de N. Wiener, mathématicien célèbre, professeur au MIT (l'institution nord-américaine alors la plus réputée dans les sciences de l'ingénierie), d'A. Rosenblueth, neurologue mexicain éminent, et de J. Bigelow, jeune et brillant ingénieur électronicien (avant que la discipline ne soit baptisée électronique !), dans la période 1942-1946, auteurs de la conception d'un système automatique de défense antiaérienne, va susciter une réflexion originale sur les processus de modélisation intentionnelle de processus perçus complexes (qu'ils soient naturels ou artificiels), réflexion dont l'histoire

garde trace par deux textes tenus pour fondateurs : leur article épistémologique « Comportement, intention et téléologie », publié dans la revue *Philosophy of Science* (1943, p. 18, 24) et l'ouvrage de synthèse publié par N. Wiener en 1948 : *Cybernetics (science de la communication et de la commande dans les systèmes naturels [l'animal] et dans les systèmes artificiels)* ; ouvrage par lequel il établissait les deux « outils modélisateurs » essentiels que la cybernétique allait donner à la systémique en se développant : la notion de boîte noire ou de système fonctionnel et téléologique, et la notion de *feed-back* informationnel par laquelle pourra être exprimée la causalité circulaire. Dans ces mêmes années, N. Wiener s'était rapproché d'un neurophysiologiste réputé, W. Mc Culloch (ami d'A. Rosenblueth), qui lui-même travaillait avec un jeune logicien J. Pitt, avec lequel il publiait alors un article de biophysique mathématiques proposant les bases de ce qui allait devenir la théorie des réseaux neuronaux (« A Logical Calculus on the Ideas Immanent in Nervous Activity », *BMB*, 1943, p. 115, 133, repris dans *Embodiment of Mind*, 1965). Dans ces mêmes années, un autre jeune ingénieur du MIT, C. Shannon, développait une théorie mathématique de la communication dont le directeur de la Fondation Rockefeller perçut aussitôt l'originalité et la portée épistémologique (C. Shannon & W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, 1948) et la proximité avec la problématique que développait la naissante cybernétique ; problématique que découvrait un psychiatre anglais, R. Ashby, dont « L'Introduction à la cybernétique », publiée en 1956, allait beaucoup contribuer à l'audience internationale de la discipline.

Ce « bouillon de culture interdisciplinaire » (qui concernera même un instant la réticente science économique, avec l'œuvre d'O. Lange : *Introduction to Economic Cybernetic*, 1965) ne fut pas longtemps restreint au « mariage des sciences de l'ingénierie et de la neurologie » (lettre de Wiener à Rosenblueth, 1945, rapportée par J.-P. Dupuy, 1994) : les échanges de N. Wiener avec le mathématicien J. von Neumann (qui développait alors « La Théorie des jeux » avec l'économiste O. Morgenstern, 1944, et qui s'attachait à développer un des premiers ordinateurs) et ceux de W. Mc Culloch avec les anthropologues G. Bateson et M. Mead, allaient rapidement ouvrir le champ de ces recherches à presque toutes les disciplines : les dix *Conférences Macy* qui se réunirent de 1946 à 1953, sous le label de « La Causalité circulaire et des mécanismes de *feed back* dans les systèmes biologiques et sociaux », puis sous celui de « La Cybernétique » (à partir de 1949, le titre initial devenant sous-titre), ont acquis aujourd'hui le caractère d'un « mythe fondateur » d'une possible... et difficile interdisciplinarité d'une légitime restauration dans nos cultures de l'unité de la science : psychologues, linguistes, anthropologues, sociologues pouvaient utilement échanger et coproduire avec des biologistes, neurologistes, mathématiciens, ingénieurs... en s'intéressant à la représentation et à la compréhension de la communication et la

commande téléologique dans les systèmes. Quels qu'ils soient : un langage cybernétique pouvait se former, permettant l'échange effectif de savoirs et d'expériences, tant entre les disciplines qu'entre les sciences et la société. L'œuvre du physicien autrichien H. von Foerster – devenu, à partir de son arrivée en Amérique en 1949, le secrétaire de ces Conférences Macy –, que nous connaissons aujourd'hui comme celle d'un bio-informaticien et surtout d'un épistémologue très novateur (*Observing Systems*, qui recueille ses principaux articles, paraîtra en 1981), en témoigne : il la présentera plus souvent comme une contribution à la cybernétique de deuxième ordre (la cybernétique de la cybernétique, ou l'étude des systèmes exerçant récursivement sur eux-mêmes leur propre activité, engendrant ainsi leur propre processus d'autonomisation) que comme une contribution explicite à la Systémique, laquelle, il est vrai, n'affirmera son statut épistémologique propre qu'à partir de 1977-1980 mais, ce faisant, il reprendra le flambeau d'une réflexion sur la spécificité épistémologique de la cybernétique, « *scienza nuova* » se construisant sur un projet plutôt que sur un objet de connaissance ; réflexion qui fera de lui le chef de file de l'école nord-américaine des épistémologies constructivistes (L. Segal, *Heinz Von Foerster et le constructivisme*, 1986, trad. 1990) que J. Piaget avait restaurée en Europe à partir de 1967 (« Logique et connaissance scientifique », *Encyclopédie de la Pléiade*). Cette réactivation d'une réflexion sur les fondements sera d'autant bienvenue qu'horis l'article fondateur de N. Wiener, A. Rosenblueth et J. Bigelow de 1943 et un article rédigé par W. Mc Culloch peu avant sa disparition (« Introduction historique aux postulats fondant une épistémologie expérimentale », 1964, publié dans *Embodiments of Mind*, 1965, p. 359-372), la discussion par la cybernétique, science des systèmes pilotés de sa propre légitimité épistémologique sera souvent légère. Comme la plupart des sciences de l'ingénierie et des sciences biologiques de sa génération (1945-1975), elle s'abritera implicitement, notoriété de ses fondateurs aidant, sous l'aile tutélaire des épistémologies positivistes alors parfaitement institutionnalisées. Il lui suffisait, leur semblait-il, de tirer argument pragmatique de l'efficacité de sa méthode modélisatrice, que présentaient *Cybernetic Modeling* de G. Klir et P. Valach en 1966 puis *Theory of Hierarchical Multilevel Systems* de M. Mesarovic (*et al.*, 1970), souvent et volontiers cités. G. Bateson prendra conscience de la transformation des référentiels épistémologiques légitimant la scientificité de ces nouvelles disciplines, mais il ne l'explicitera qu'à partir de 1966 : « Je crois qu'avec la cybernétique, les hommes ont mordu au fruit défendu comme ils ne l'ont jamais fait depuis deux mille ans » (*Steps to an Ecology of Mind*, 1966-1972, rappelée par J.P. Dupuy, 1994, p. 66). Et lorsque peu après, J. Piaget demandera à S. Papert une étude sur « L'épistémologie de la cybernétique » pour son *Encyclopédie de la Pléiade* (1967), celui-ci préférera convenir que la discipline manquait encore par trop de maturité : ce « véritable écheveau de courants

d'origines diverses » lui semblait pénalisé en quelque sorte par « l'audace même de son projet » (p. 823).

La formation du paradigme de la GSR

Une autre formation interdisciplinaire, celle de la GSR, se développera presque en parallèle avec celle de la cybernétique, animée davantage initialement par des chercheurs en biologie et en sciences de l'homme et de la société, à peu près dans les mêmes années, mais en affichant plus explicitement son projet épistémologique fondateur et son intention de ne pas se restreindre à la modélisation des seuls systèmes contrôlés : son père fondateur reconnu par la tradition est le biologiste autrichien L. von Bertalanffy qui n'émigra en Amérique du Nord qu'en 1949, ce qui explique sans doute le léger retard chronologique que l'on attribue à la General System Theory (GST) par rapport à la cybernétique. Les historiens scrupuleux font remarquer que les textes principaux de L. von Bertalanffy introduisant une théorie des systèmes ouverts puis des systèmes généraux (pour tenter de libérer la biologie théorique des modèles fermés que lui livraient les paradigmes de la mécanique rationnelle et statistique) furent publiés en allemand entre 1930 et 1950. (Une traduction française des *Problèmes de la vie* qu'il avait publié en allemand en 1948, présentant en conclusion la « Théorie des systèmes généraux », sera éditée en 1960, Paris, Gallimard.) Ils observent aussi qu'un scientifique nord-américain réputé, P. Weiss, riche de sa « double expérience de biologiste et d'ingénieur », aurait bien des titres légitimes à être tenu pour un père fondateur d'une théorie des systèmes organisés qui a beaucoup contribué à l'audience de la systémique dans les communautés scientifiques (son œuvre ne sera aisément accessible en français qu'à partir de l'édition, en 1974, de *L'Archipel scientifique, études sur les fondements et les perspectives de la science*). Mais c'est sans doute la constitution aux États-Unis d'Amérique de la Société pour la recherche sur les systèmes généraux (SGSR) en 1954 par L. von Bertalanffy entouré de quelques chercheurs éminents, en particulier l'économiste K. Boulding, qui va contribuer à populariser la GSR. La SGSR se constitue au moment où, pour de multiples raisons contingentes, les Conférences Macy s'achèvent : elles ne se redévelopperont, dans un autre contexte, à l'initiative d'H. von Foerster, qu'en 1959, sur le thème des systèmes auto-organisés (Yovit & Cameron éd., *Self Organizing Systems*, 1959). La communauté General Systems, comme elle s'appelait elle-même, va davantage intéresser les chercheurs en sciences de l'homme et de la société, heureux de trouver dans les formulations de la GST un langage permettant la communication au sein de leur discipline, que les chercheurs en biologie, longtemps réticents devant les présentations plus physiologiques qu'anatomiques (... voire moléculaires !) de leur discipline : J. Monod, dans *Le Hasard et la nécessité, essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne* (1970), expédiera en une ligne la « vague théorie générale des

systèmes de L. von Bertalanffy » (p. 94), affectant ainsi d'ignorer le chapitre sur « Le Hasard et la loi » que publiait dix ans auparavant la traduction française des *Problèmes de la vie, essai sur la pensée biologique moderne* du même L. von Bertalanffy.

Il est vrai que celui-ci, en présentant la General System Theory comme « la base d'une ontologie mathématique exacte, base également des homologues logiques entre les concepts généraux des différentes sciences » (*Problèmes de la vie*, p. 248), affichait un programme à tout le moins fort immodeste, qui allait conduire nombre de ses exégètes et disciples à transformer une systémique encore embryonnaire en un syncrétisme fort peu scientifique, voire en une idéologie systémiste que d'autres proposeront de substituer à d'autres idéologies contemporaines fort partisans, voire doctrinaires (E. Laszlo, *Le systémisme, vision nouvelle du monde*, 1972-1981). Les analogies que suggèrent les représentations des systèmes vivants et des autres systèmes, naturels ou artificiels, sont souvent fécondes et intelligibles lorsqu'elles sont fonctionnelles ou génétiques (physiologiques), mais elles s'avèrent illusoire et fallacieuses lorsqu'elles prétendent s'exprimer en termes morphologiques ou organiques (anatomiques). En ne mettant pas assez en garde ses lecteurs sur cette difficulté, et en proposant d'intégrer à peu près tous les discours méthodologiques au sein de La Théorie du système général – ensembles, graphes, réseaux, automates, information, files d'attente, etc. (GST, 1968, p. 17-24) – au nom d'une légitime aspiration à « l'unité de la science » qu'il exprime avec chaleur et enthousiasme, L. von Bertalanffy révélait la légèreté épistémologique d'une discipline qui ne parvenait pas mieux que la cybernétique à assurer ses propres fondements. Faute d'entendre l'appel à « cette critique épistémologique interne... instrument... de l'organisation intérieure des fondements », que proposait J. Piaget (*Encyclopédie de la Pléiade*, 1967, p. 51), les tenants de la GST compromettaient son propre développement. Il reste que l'expérience modélisatrice acquise dans bien des domaines sous les auspices de la théorie des systèmes généraux, que ce soit en psychiatrie, en sociologie, en sciences politiques, en sciences de l'éducation, en sciences de l'ingénierie et en sciences de gestion, constituera une sorte de terreau au sein duquel les réflexions épistémologiques pourront à nouveau germer (G. Klir éd., *Trends in General Systems Theory*, 1972). Le gros recueil *Unity Through Diversity* colligé à la mémoire de L. von Bertalanffy peu après sa disparition en 1972 (W. Gray & N. Rizzo éd., 1973) en fournit une sorte d'échantillon significatif, échantillon que l'on doit compléter par l'ouvrage du biologiste théoricien français, introducteur de l'œuvre de P. Weiss dans nos cultures : *Système, structure, fonction, évolution*, de P. Delattre (1971), propose une tentative aussi avancée que possible pour « formaliser » dans l'appareil de la mathématique ensembliste la théorie des systèmes et le programme de recherches interdisciplinaires (titre de la collection lancée par P. Delattre) qu'elle supportait.

Les multiples origines monodisciplinaires de la notion de système

Si la cybernétique privilégiant la modélisation des systèmes pilotés et la théorie du système général privilégiant la modélisation des systèmes organisés se sont développées entre 1945 et 1970 sur un projet explicitement interdisciplinaire, revendiquant leur contribution à l'unité de la science, d'autres expériences modélisatrices vont se développer dans la même période en appelant aussi aux ressources méthodologiques du concept de système mais sans ambition interdisciplinaire. Certaines s'avèreront même fort monodisciplinaires, mais l'expérience de l'instrumentation systémique qu'elles acquerront dans leurs pratiques spécifiques s'avèrera souvent suffisamment portable pour être aisément assimilée par une science des systèmes organisés (ou complexes) qui trouvera progressivement son assise épistémologique à partir des années 1975-1980.

Certaines de ces expériences de la modélisation systémique monodisciplinaire méritent ici une mention particulière ne serait-ce que par le nombre et la qualité des travaux qu'elles ont contribué (et contribuent encore) à susciter au sein ou aux marges de la systémique.

La sociologie et la science politique. – Elles s'approprèrent très tôt le concept de système, sous des formes qui allaient bientôt reprendre le structuralisme fonctionnaliste puis le structuralisme. L'œuvre de T. Parson, mettant la notion d'action au centre de toute étude des organisations sociales, va dès 1951 proposer une interprétation des « systèmes sociaux » (*The Social System*, 1951) par une théorie de l'action (*Toward a General Theory of Action*, 1951) qui va rayonner tant dans le domaine des sciences sociales que dans celui de la systémique naissante : il suffit d'évoquer les contributions de March et Simon (*Organizations*, 1958) ou de Crozier et Friedberg (*L'Acteur et le système*, 1977) parmi beaucoup d'autres (A. Wilden, *System and Structure*, 1980) pour témoigner. *Le Concept de système politique*, de J.-L. Vuillierme, publié en 1989, constituera une synthèse magistrale de cette fécondation mutuelle, rendue possible par la maturation de la systémique après 1980, maturation activée ici par les réflexions sur les théories de l'autopoïèse que développera le sociologue et juriste allemand, N. Luhman (1986).

Les sciences de gestion. – Elles se constitueront en discipline autonome à partir de 1950, à partir de l'expérience modélisatrice de la recherche opérationnelle qui s'était constituée pragmatiquement sur une base interdisciplinaire pendant la Deuxième Guerre mondiale, et de celle issue des théories des processus de décision (H.A. Simon, *Administrative Behavior, a Study of the Decision Making Process*, 1947) et des jeux (J. von Neuman & O. Morgenstern, *Theory of Games*, 1945).

Elles se développeront entre 1950 et 1970 en coévolution avec la cybernétique et la General Systems Theory. (L'article de l'économiste K. Boulding qui donnera une large audience à la GSR apparaît en 1955 dans la revue *Management Science* : « gsr, the Skeleton of Science ».) Les auteurs du premier manuel de recherche opérationnelle publié en 1952, R. Ackoff et C. Churchman, deviendront au début des années 1970 les promoteurs des départements académiques de Sciences des Systèmes, et ils seront souvent tenus pour les avocats d'une « Révolution Systémique » (R. Ackoff, *The Systems Revolution*, 1974). Leurs travaux seront bientôt rejoints par ceux de Stafford Beer en Grande-Bretagne (*Platform for Change*, 1975) ou de J. Mèlès en France (*La Gestion par les systèmes*, 1968) ; les uns et les autres proposeront d'intégrer à ces divers courants de la systémique ceux de la Dynamique des systèmes développée par J.W. Forrester, qui proposait de combiner les exercices de modélisation cybernétique classique et des exercices de simulation informatique alors fort originaux (*Industrial Dynamics*, 1961). Souvent présentée sous le nom de « L'Approche système » dans les années 1970 (titre de l'ouvrage de C. Churchman, *The Systems Approach*, 1968), cette conception des « systèmes de management » (*Management Systems* de P. Schoderbeck, 1964) suscitera une importante floraison d'ouvrages visant à la populariser, dans toutes les cultures et dans toutes les langues : on cite fréquemment le Blauberger et alii en russe (traduction anglaise, 1977) ou en français, *Le Macroscopie, vers une vision globale* de J. de Rosnay (1976), qui connaîtra une large diffusion. La demande de méthodologies opératoires suscitée par l'apparition des systèmes d'information et de décision informatisés dans toutes les organisations contribuait sans doute beaucoup à la recherche d'un langage commun permettant d'associer ingénierie informatique et ingénierie organisationnelle. Mais les bases épistémologiques de la systémique qui se développait ainsi pragmatiquement allaient bientôt s'avérer trop légères. La révolution annoncée devenait, au fil des années 1970, une maturation difficile : le concept même d'« analyse de système » – oxymoron qui restaurait la modélisation analytique en la dissimulant sous l'emballage systémique – que les sciences de gestion allaient privilégier pour se différencier de la cybernétique, devenait révélateur de cette légèreté épistémologique que peut produire une discipline incapable de procéder au « nettoyage de sa propre situation verbale » (P. Valéry) (B. Walliser, *Systèmes et modèles, introduction critique à l'analyse de système*, 1977).

La psychologie et la psychiatrie. – Elles allaient apporter à la formation de la systémique dans les années 1960-1980 une contribution originale et féconde, qui eut, parmi ses mérites, celui d'un questionnement épistémologique permanent (qui se poursuit heureusement aujourd'hui). La contribution de J. Piaget au développement de la psychologie génétique depuis 1930 est trop connue pour qu'on la

présente ici. Il fut sans doute le premier à l'inscrire dans la conjonction des paradigmes structuraliste et cybernétique (*Le Structuralisme* qu'il publie en 1968 en témoignage) et à susciter une intense réflexion sur la légitimation épistémologique des pratiques modélisatrices de la psychologie du développement (*L'Épistémologie génétique* paraît en 1970, peu après *L'Encyclopédie de la Pléiade : Logique et connaissance scientifique*, 1967). En revanche la contribution de G. Bateson et de l'École de Palo-Alto à laquelle on associe son nom fut longtemps moins visible avant 1980. G. Bateson meurt la même année que J. Piaget. En proposant au psychologue de consacrer son attention aux représentations complexes de l'interaction et de la communication du « patient désigné » avec son contexte (couple, famille...), il va contribuer à l'émergence d'une psychologie plus communicationnelle (ou systémique) qu'analytique : la théorie des paradoxes de la communication (théorie du *double bind*) est sans doute l'argument le plus cité de sa contribution aux développements de nouvelles formes de la psychothérapie (que l'on appellera familiale ou systémique), qui vont à leur tour permettre d'accumuler un riche terreau expérimental, ou clinique, terreau au sein duquel vont germer des réflexions épistémiques qui débordent le champ disciplinaire de la psychiatrie. *Le Dictionnaire des thérapies familiales* édité par J. Miermont (1987), et traduit depuis en anglais, rassemble une large part de ces matériaux et de ces réflexions : les apports de la psychothérapie à la systémique en formation s'y manifestent dans leur permanente interaction. *L'Homme autonome, éco-anthropologie de la communication et de la cognition* de J. Miermont en proposera une synthèse à jour en 1995 des principaux développements récents de cette coévolution épistémique des sciences de l'homme et des sciences des systèmes.

Il nous faut sans doute attacher à l'examen des contributions mutuelles de la psychologie et de la systémique celles engendrées par le développement plus récent des sciences de l'éducation se dégageant progressivement des matrices structuralistes ou praxéologiques dans lesquelles elles s'étaient reformées. L'œuvre de G. Lerbet, inspirée à la fois par la pensée de J. Piaget et par celle de K. Rogers, caractérise cette évolution originale des *Nouvelles Sciences de l'éducation* (titre de son ouvrage publié en 1995).

Les sciences de la computation et de la cognition artificielle (Informatique et intelligence artificielle). – Elles se sont développées dès l'origine de façon si enchevêtrée avec la cybernétique que l'on a quelque difficulté à les présenter de façon distincte. C'est sans doute la priorité apparente que « l'informatique pratiquée » a attachée très tôt à l'algorithmique numérique, et que « l'intelligence artificielle enseignée » a attachée à la logique mathématique, qui ont incité à différencier en pratique les deux domaines. Le paradoxe d'une science informatique, qui abuse du vocable de sys-

tème sans s'interroger sur sa signification et sa portée, ni celle de la théorie des systèmes, a été souvent dénoncé pour mettre en valeur l'inattention fréquente de la discipline à ses propres fondements épistémologiques. Mais cette relative indépendance apparente ne doit pas masquer une « consanguinité » épistémologique dont rendent compte les contributions d'A. Newell et de H.A. Simon en particulier. En reconnaissant dans la naissante systémique sa capacité modélisatrice ou symbolisante (*l'inventio* de la rhétorique) et sa capacité à saisir les modes de raisonnement dialectique ou récursif par l'exercice des heuristiques investigatrices (*heuristic search*), ils pourront développer les fondements d'une intelligence artificielle qui soit autre chose qu'une théorie des automates programmables en restaurant le caractère téléologique de l'intelligence. Leur démarche les conduira à une discussion critique du caractère, par trop superficiel, de la cybernétique et de la théorie des systèmes dans la période 1945-1975, et aux premières formulations d'une épistémologie d'une science de la computation et d'une science de la cognition qui deviendra une des premières contributions à l'épistémologie alors en formation de la science des systèmes (H.A. Simon, *The Sciences of the Artificial*, 1969-1996, traduit sous le titre *Science des systèmes, sciences de l'artificiel* ; et la Conférence Turing 1975 de A. Newell et H.A. Simon, *Computer Science as an Inquiry : Symbol and Search*). La science de la cognition qui émergera à partir de 1972 (A. Newell & H.A. Simon, *Human Problem Solving*, 1972) va ainsi se constituer, devenant une des composantes principales de la formation de la systémique contemporaine à partir de 1980 (E. Andreewsky éd., *Systémique et cognition*, 1991).

L'écologie, les géosciences, les sciences de l'aménagement... constituent un autre creuset important de la formation de la science des systèmes contemporaine. Il semble difficile de différencier ce qui fut emprunté et ce qui fut apporté de ces disciplines encore en formation à la systémique. Il est certain que cette dernière y trouva un terrain exceptionnel d'expériences modélisatrices très diverses, expériences qui confirmaient la généralité et la portabilité des concepts qu'elle dégageait (*feedback* informationnel, variété requise, coévolution, autorégulation, durabilité et équilibration, auto-éco-réorganisation, symbolisation et finalisation endogène, autopoïèse, etc.). Mais le rapport de ces jeunes disciplines avec la systémique semble aussi enchevêtré que le rapport de cette dernière avec la vieille science économique : « Elles ne peuvent pas s'en passer, mais elles ne veulent pas en convenir. » Peut-être faut-il pourtant mentionner pour son caractère exemplaire, la récente apparition de la géophysique candidate aussi légitime que la géophysique à l'étude des géo-systèmes : les moqueries académiques qui accueillent l'hypothèse Gaïa de J. Lovelock en 1980, s'atténuent quinze ans après alors que la géologue forme le programme d'inspiration fort systémique de la géophysologie (P. Westbroek, *Life as a Geological Force*, 1991).

Le paradigme des systèmes complexes

Si l'on en juge par le nombre d'ouvrages et d'articles traitant de la science des systèmes en des termes relativement neufs, au moment où les paradigmes jumeaux de la cybernétique et de la GST semblent devoir s'essouffler (ou se reproduire sans se transformer, on évoque souvent les actes d'un célèbre colloque organisé en 1969 par A. Koestler : « Beyond Reductionism, New Perspectives in the Life Sciences », pour illustrer ce handicap d'une systémique se réduisant à un antiréductionnisme sans lui proposer encore d'alternative épistémique), on peut sans doute considérer la période charnière dans cette évolution épistémique : à partir de 1980, on peut légitimement parler d'une science des systèmes ou systémique correctement argumentable en termes épistémologiques, et suffisamment expérimentée en termes pratiques ou cliniques pour être enseignable : prototype des « nouvelles sciences fondamentales de l'ingénierie » se définissant sur un projet de conception téléologique et non plus d'abord sur un programme d'application automatisable, pour les uns ; et prototype des « futures sciences de la complexité » se construisant sur des projets de connaissance active et non plus d'abord sur un objet de connaissance présumé indépendant de l'observateur. Les textes que l'on tient aujourd'hui pour les textes de référence paraissent pratiquement tous dans ces années et seront pour la plupart fréquemment réédités ensuite : les deux premiers tomes de *La Méthode* d'E. Morin (1977 et 1980), *La Nouvelle Alliance* d'I. Prigogine et d'I. Stengers (1979), *Entre le Cristal et la fumée* de H. Atlan (1979), *Principle of Biological Autonomy* de F. Varela (1979), *Gödel, Escher, Bach, an Eternal Golden Braid* de D. Hofstadter (1979), *Observing Systems* de H. von Foerster (1980), *Les Systèmes du destin* de J. Lesourne (1976), *Le Paradoxe et le système* de Y. Barel (1979), *Le Social et le vivant* de J. Fontanet (1977), *L'Économique et le vivant* de R. Passet (1979), *Symbole et société* de C. Roig (1977), *La Théorie du système général, théorie de la modélisation* de J.-L. Le Moigne (1977), *Ordre et désordre, enquête sur un nouveau paradigme* de J.-P. Dupuy (1982), et *La Notion de système dans les sciences contemporaines*, ouvrage collectif édité par J. Lesourne (1981).

Cette systémique de deuxième génération (sous sa forme substantive, le mot systémique n'apparaît qu'après 1975 pour désigner la science des systèmes) assume entièrement l'héritage et le capital d'expérience modélisatrice que lui lèguent les divers affluents de la première génération (affluents que récapitulait alors un recueil d'une soixantaine d'articles « historiques » colligés par W. Buckley en 1968, *Modern System Research*). Mais elle prend l'initiative d'une progressive construction des fondements épistémiques, dont l'absence ou la légèreté devenaient alors manifestes, en assumant la difficulté paradigmatique de son entreprise : si « les systèmes ne sont pas dans la nature, mais dans l'esprit des hommes », la science des

systèmes doit trouver en elle-même sa propre permanente fondation : elle ne dispose plus d'un « méta-niveau, connaissable ou inviolable », sur lequel elle puisse construire et légitimer en toute certitude les énoncés qu'elle construit, et elle doit assumer le caractère temporel et récursif, ou la dynamique autoréférentielle de sa propre production : « Toute connaissance acquise sur la connaissance devient un moyen de connaissance éclairant la connaissance qui a permis de l'acquérir » (E. Morin, *La Méthode*, t. III, 1986, p. 232). Exercice épistémologique qui aurait été difficile si l'expérience de la modélisation systémique, que forgeaient alors les sciences de la cognition et de l'intelligence (la neurophysiologie et l'immunologie (théories de l'autopoïèse), comme les théories de l'information en biologie ou en thermo-dynamique (théorie de l'auto-organisation), n'avaient pas apporté, dans ces années critiques, un appareil conceptuel original que des chercheurs issus de pratiquement toutes les disciplines surent s'approprier (le Colloque de Cerisy, *L'auto-organisation, de la physique au politique*, P. Dumouchel & J.-P. Dupuy éd., 1983, en témoignage). Il s'agissait de passer d'une modélisation des systèmes organisés, présumée indépendante du modélisateur, à une modélisation des systèmes à la fois organisant et s'organisant, auto-organisation entendue dans son caractère à la fois (inséparablement) dynamique (irréversible) et récursif, fonctionnel et morphogénétique (« En fonctionnant le système se transforme ; en se transformant il fonctionne... »). Auto-organisation qui se forme par l'ouverture et l'activité du système modélisé dans les contextes avec lesquels il coévolve, qu'il transforme et qui le transforme : Auto-Éco-Ré-organisation, inséparablement dira E. Morin (*La Méthode*, t. II, 1980). Cet entendement du système s'organisant impliquera la progressive reconnaissance du caractère potentiellement téléologique de l'interprétation de son comportement : entre le hasard statistique et la nécessité mécanique, reconnaître l'occurrence des processus endogènes de finalisation rendant intelligible la lecture des dialectiques fins-moyens-fins... par lesquels bien des comportements et des transformations perçus complexes pourront être entendus. Processus de finalisation qui pour être opératoires impliqueront des formes d'adaptation « intelligente ». Intelligence qui s'exprimera par la capacité du système à se construire des représentations de sa propre activité, à « s'informer », en produisant des systèmes de symboles computables qu'il pourra soumettre à des délibérations tâtonnantes afin d'élaborer téléologiquement ses décisions de comportement. Scénario modélisateur aux multiples variantes possibles, du schéma énergétique optimisateur simple et présumé naturel (« Le principe de moindre action ») à celui du schéma informationnel aux multiples dimensions au sein duquel s'exercent les tâtonnements d'une rationalité délibérante.

Le modélisateur passe alors d'une attitude d'analyste à une attitude de concepteur, attentif plus au processus (la modélisation) qu'au résultat (le modèle). L'appareil de ces pratiques modélisatrices s'agence pas à pas

en une construction théorique qui devient celle de la systémique, théorie des méthodes de modélisation intentionnelle de phénomènes perçus complexes. Théorie qui suscite en retour la construction de son référentiel épistémologique : le développement depuis 1967 (J. Piaget et H. von Foerster) des épistémologies constructivistes se formant sur cette critique interne semble ainsi catalysé par une progressive reconstruction pragmatique de la science des systèmes que ne compromet plus une conception trop figée et trop exclusive du système des sciences. Science de la modélisation systémique qui se sait maintenant héritière de la science de l'argumentation rhétorique et dialectique, forgée par les penseurs et les stratèges de la Grèce antique : ne reconnaît-on pas les questions de l'*Inventio* dans la présentation contemporaine de la forme canonique du système en général : quelles fonctions et quelles transformations, dans quels contextes, pour quels projets, séparément, irréversiblement et récursivement ?

Questions qui furent alors, et qui sont à nouveau, à l'origine d'une réflexion épistémologique sur l'articulation des « faire » et des savoirs humains médiatée par les représentations symboliques que construit « l'esprit humain cherchant à saisir les phénomènes... pour en rendre raison, et pour les préparer et les faire naître ». N'est-ce pas dans cet esprit que G. Bachelard nous invitait à reconnaître *Le Nouvel Esprit scientifique* (1934) : « Il ne s'agit pas de recenser des richesses, mais d'actualiser une méthode de connaissance » (p. 148). La modélisation systémique rend praticable aujourd'hui ce « retournement de la perspective épistémologique » (p. 153).

► ANDREWSKY E. et al., *Systémique et cognition*, Paris, Dunod « AFCET-Système », 1991. — ATLAN H., *L'Organisation biologique et la théorie de l'information*, Paris, Hermann, 1972. — BAREL Y., *Le Paradoxe et le système. Essai sur le fantasme social* (1979), *Le Paradoxe et le système. Essai sur le fantasme social. Nouvelle édition augmentée*, Grenoble, Presses Univ., 1989. — BAREL Y. et al., *Système et paradoxe, autour de la pensée d'Yves Barel*, Paris, Le Seuil, 1993. — BATESON G., texte américain colligé par R.E. Donaldson (1991), trad. fr. J.J. Wittezaele, *Une Unité sacrée — quelques pas de plus vers une écologie de l'esprit*, Paris, Le Seuil, 1996. — BEER S., *Platform for Change*, New York, J. Wiley & Sons, 1975. — BERTALANFFY L. VON, *Théorie générale des systèmes*, trad. de l'américain, Paris, Dunod, 1968-1973 (texte allemand, 1948; trad. fr. M. Deutsch, *Les problèmes de la vie. Essai sur la pensée biologique moderne*, Paris, Gallimard, 1961). — BOGDANOV A., *Essays in Tektology* (1913-1920), trad. angl. G. Gorelik, Seaside (Cal.), Intersystems Publ., 1980. — BOLDING K., *The Image*, Ann Arbor, Univ. of Michigan Press, 1956. — BUCKLEY W. éd., *Modern Systems Research for the Behavioral Scientist*, Chicago, Aldine Publ. Cy, 1968. — CELLERIER G., PAPERT S. & VOYAT G., *Cybernétique et épistémologie*, Paris, PUF, 1968. — CHURCHMAN C.W., *The Design of Inquiring Systems*, New York, Basic Book Publ., 1971. — CONDILLAC E., *Traité des systèmes (1749-1798)*, Paris, Fayard « Corpus des œuvres de philosophie », 1991. — CROZIER M. & FRIEDBERG E., *L'Acteur et le système*, Paris, Le Seuil, 1977. — DELATTRE P., *Système, structure, fonction, évolution*, Paris, Maloine, 1971, 2^e éd., 1985. — DUMONCHEL P. & DUPUY J.-P. éd., *L'auto-organisation. De la physique au politique*, Paris, Le Seuil, 1983.

— FOERSTER H. VON, *Observing Systems, with an Introduction by F.J. Varela*, Seaside (Cal.), Intersystems Publ., 1^{re} éd., 1981; 2^e éd., 1984; *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition*, Berlin, Springer-Verlag, 2003. — FONTANET J., *Le social et le vivant*, Paris, Plon, 1977. — FORRESTER J.W., texte américain (1965), trad. fr. P.S. Baron, *Principes des systèmes*, Lyon, Presses Univ., 1980. — GRAY W. & RIZZO N. éd., *Unity through Diversity — a Festschrift for L. Von Bertalanffy*, New York, Gordon & Breach, 2 t., 1973. — HOFSTADTER D.R., *Gödel, Escher, Bach, an Eternal Golden Braid*, New York, Basic Book, 1979 (trad. fr., Paris, InterÉditions, 1985). — JACOB F., *Le Jeu des possibles*, Paris, Fayard, 1981. — KANT E., *Critique de la faculté de juger* (1793), trad. inédite A. Renault, Paris, Aubier, 1995. — KATSENELIMBOIGEN A., *Some New Trends in Systems Theory*, Salinas (Cal.), Intersystems Publ. « The Systems Inquiry Series », 1984. — KLIR G.J., *Facets of Systems Science*, New York, Plenum Press, 1991. — KLIR J. & VALACH M., *Cybernetic Modeling*, Londres, Cliffe Books Ltd, 1966. — KOESTLER A. & SMYTHIES J., *Beyond Reductionism*, Londres, Hutchinson Publ. Ltd, 1969. — LARGEAULT J., *Systèmes de la nature*, Paris, Vrin, 1985. — LASZLO E., *Le Systémisme, vision nouvelle du monde*, Paris, Pergamon Press, 1981. — LE MOIGNE J.-L., *La Théorie du système général, théorie de la modélisation*, Paris, PUF, 2^e éd. augm., 1977, 4^e éd. complétée, 1994; *La modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod (1991, 4^e éd. 1999); *Les épistémologies constructivistes*, Paris, Éd. PUF, « Que sais-je? », 1995, 2^e éd. 1999; *Le Constructivisme; tome I: Des Fondements; tome II: Des Épistémologies*, Paris, ESF, 1994-1995; *Le constructivisme. Tome I: Les Enracinements* (2001); *Tome II: Épistémologie de l'interdisciplinarité* (2002); *Tome III: Modéliser pour comprendre* (2004), Paris, Éd. L'Harmattan; « Sur la Capacité de la raison à discerner la rationalité substantive et la rationalité procédurale », in PASSERON J.C. & GÉRARD-VARET L.A. éd., *Calculer et raisonner, les usages du principe de rationalité dans les sciences sociales*, Paris, Éd. EHESS, 1993, chap. 2. — LERBET G., *Système, personne et pédagogie. Une Nouvelle voie pour l'éducation*, Paris, ESF, 2^e éd. augm., 1993. — LESOURNE J. éd., *La Notion de système dans les sciences contemporaines*, Aix-en-Provence, Librairie de l'Université, 2 vol., 1981. — LICHTNEROWICZ A., PERROUX F. & GADOFFRE G. éd., *L'Idée de régulation dans les sciences*, Paris, Maloine Doim « Recherches Interdisciplinaires », 1977. — MATTESICH R., « Instrumental Reasoning and Systems Methodology », Dordrecht (Holland), D. Reidel Publ. Cy, 1978. — MATURANA H. & VARELA F., *Autopoiesis and Cognition: the Realization of the Living*, Boston, D. Reidel, 1980. — MC CULLOCH W.S., *Embodiments of Mind*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1965, 2^e éd. 1988. — MÉLÈSE J., *Approches systémiques des organisations*, Paris, Hommes et Techniques, 1979. — MESAROVIC M.D., MACKO D. & TAKARA Y., *Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems*, New York, Academic Press, 1970. — MIERMONT J., *L'Homme autonome, éco-anthropologie de la communication*, Paris, Hermès « Systèmes Complexes », 1995. — MORIN E., *Le Paradigme perdu: la nature humaine*, Paris, Le Seuil, 1973; *La Méthode*, tomes I à V, Paris, Le Seuil, 1977 à 2001. — MÜGUR-SCHÄCHTER M., « Les leçons de la mécanique quantique. Vers une Épistémologie formelle », *Le Débat*, mars-avril 1997, n° 94, p. 169-192. — ORILLARD M. & LE MOIGNE J.-L. éd., *Systémique et complexité*, numéro spécial de la *Revue Internationale de Systémique*, 1990, vol. 4, n° 2. — PIAGET J., *Logique et connaissance scientifique*, Paris, Gallimard « Encyclopédie de la Pléiade », 1967. — ROBINSON-VALÉRY J. éd., *Fonctions de l'esprit: treize savants redécouvrent Paul Valéry*, Paris, Hermann, 1983. — ROSNAY J. DE, *Le Macroscopie, vers une vision globale*, Paris, Le Seuil « Point », 1975. — SCHODERBEK P., *Management Systems*, New York, J. Wiley & Sons, 1967. — SEGAL L., textes anglais et

allemands (1986), trad. fr. A.L. Hacker, *Le Rêve de la réalité Heinz Von Foerster et le constructivisme*, Paris, Le Seuil, 1990. — SIMON H.A., *Administrative Behavior, a Study of the Decision-Making Process in Administrative Organization*, New York, Mac Millan Publ. Cy « The Free Press », 1945-1947, 4^e éd. augm., 1996; *The sciences of the artificial*, Cambridge, Mass., The MIT Press, 1969, 3^e éd. 1996, trad. fr., *Les sciences de l'artificiel*, Paris, Éd. Gallimard, Folio-Essais, 2004; *Reason in Human Affairs*, Californie, Stanford Univ. Press, 1983. — TASSY P. éd., *L'Ordre et la diversité du vivant. Quel statut scientifique pour les classifications biologiques ?* Paris, Fayard « Fondation Diderot », 1986. — THOM R., *Stabilité structurelle et morphogénèse, essai d'une théorie générale des modèles*, Paris, W.A. Benjamin et Reading (USA), Diffusion Ediscience, 1972. — TINLAND F. éd., *Systèmes naturels et systèmes artificiels*, Seyssel, Champvallon « Milieux », 1991. — TRAPPL R., HORN W. & KLIR G.J., *Basic and Applied General Systems Research: A Bibliography 1977-1984*, New York, Hemisphere Publ. Corp., 1985. — VALÉRY P., *Cahiers 1894-1914*, éd. intégrale annotée sous la dir. de N. Celeyrette-Pietri & J. Robinson-Valéry, Paris, Gallimard, vol. I, 1987; vol. II, 1988; vol. III, 1990; vol. IV, 1992. — VAN GIGCH J.P., *Applied General Systems Theory*, New York, Harper & Row, Publ., 1974. — VARELA F.J., *Principles of Biological Autonomy*, New

York, North Holland Publ. Cy, 1979. — VULLIERME J.L., *Le Concept de système politique*, Paris, PUF, 1989. — WEINBERG G.M., *An Introduction to General Systems Thinking*, New York, J. Wiley & Sons, 1975. — WEISS P.A., *L'Archipel scientifique*, trad. fr., Paris, Maloine, 1990. — WESTBROEK P., *Life as a Geological Force. Dynamics of the Earth*, New York, W.W. Norton Cy, 1991, Norton Paperback 1992, trad. fr., *Vive la terre*, Paris, Éd. Seuil, 1998. — WIENER N., ROSENBLUETH A. & BIGELOW J., « Behavior, Purpose and Telology », *Philosophy of Science*, 1943, vol. n° 10 (trad. fr., in *Études Philosophiques*, 16^e année, CNRS-PUF, 1959); *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Paris, Librairie Hermann & Cie, 1948, éd. suiv. complétées, MIT Press, Cambridge (Mass.). — WILDEN A., *Systems and Structure*, Londres, Tavistock Publ. Ltd, 1972. — YOVITS M. & CAMERON S. éd., *Self Organizing Systems*, New York, Pergamon Press, 1960. — ZADEH L.A. & POLAK E., *System Theory*, New York, Mc Graw Hill Book Cy, 1969. — ZELENY M. éd., *Autopoiesis, a Theory of Living Organization*, New York, North Holland Publ. Cy, 1981.

Jean-Louis LE MOIGNE

→ Cognition et sciences cognitives; Cognitivisme; Computational; Paradigme; Réseau; Sciences cognitives; Téléologie.

T - U

TARSKI Alfred, 1901-1983

Logicien polonais qui acheva à Berkeley une brillante carrière, commencée à Varsovie. Tarski fit une remarquable synthèse entre différentes traditions : la logique algébrique de Boole (1815-1864) et Schröder (1841-1902), l'analyse logique de Gottlob Frege (1848-1925), la métamathématique de Hilbert (1862-1943) et la théorie des catégories de signification ainsi que le « formalisme intuitif » de Lesniewski (1886-1939). Ses travaux les plus connus portent sur la définition du concept de conséquence logique et du concept de vérité et sur la décidabilité de la géométrie et de l'algèbre élémentaires. À côté d'autres résultats importants en théorie des ensembles, en théorie des grands cardinaux, en logique infinitaire, son œuvre maîtresse est la création de la théorie des modèles, qui a mis en avant le point de vue sémantique en caractérisant un ensemble d'énoncés, par exemple un système d'axiomes, par la classe des modèles où tous ces énoncés sont vrais. Dans cette perspective, Tarski réussit à mathématiser l'analyse conceptuelle des logiciens antérieurs de manière à pouvoir, en retour, appliquer la logique pour résoudre des problèmes mathématiques. La sémantique formelle de Tarski imprima ainsi à la logique mathématique, créée par Boole et Frege et qui tendait à être confinée, par Russell en particulier, au traitement des questions de fondements des mathématiques, un tournant heuristique. La preuve de la fécondité mathématique de la logique n'est aujourd'hui plus à faire.

• *The Journal of Symbolic Logic*, vol 51, 1986, vol. 53, 1988.

► *Introduction à la logique*, trad. fr., Paris, Gauthier-Villars/Louvain, E. Nauwelaerts, 1960, 3^e éd. rev., 1971. – *Logique, sémantique, métamathématique, 1923-1944*, Paris, A. Colin, 2 vol., 1972, 1974.

Hourya SINACEUR

→ Ensemble ; Frege ; Vérité.

TAXINOMIE

La nature n'exhibe pas l'ensemble des casiers où les taxinomistes viendraient minutieusement placer les occupants adéquats. Comme l'écrit Stephen Jay Gould,

« Les classifications ne sont pas [...] de simples procédures de rangement dans un monde objectivement divisé en catégories évidentes. [...], et la chronique des revirements taxinomiques opérés au cours de l'histoire nous donne l'idée la plus juste des révolutions conceptuelles intervenues dans la pensée humaine » (*L'éventail du vivant*, 1997).

Proposer un ordre à l'intérieur duquel se rangeront les êtres réels, minéraux, végétaux et animaux, tel est l'objet de la taxinomie. Travail de structuration et de répartition dont les esquisses proviennent de la philosophie et de la science des Grecs, mais qui s'enracine dans la pensée mythique, dans son effort pour donner sens à l'action humaine en lui proposant, à titre de repères, des récits de la genèse du monde et des tableaux de la disposition des êtres. Cosmogonies et cosmologies inscrivait dans un cadre harmonieux la destinée humaine. Les tableaux figurant l'ordre de la nature vivante relaieront la pensée mythique dans cette fonction, alors même que la volonté de faire œuvre scientifique s'affirmera. Les problèmes méthodologiques posés par l'édification d'une classification raisonnée des êtres réels ne sont jamais dépourvus d'enjeux théoriques, mais aussi économiques et métaphysiques.

Pour l'illustre botaniste Augustin Pyramus de Candolle, auteur d'un *Essai sur les propriétés médicales des plantes, comparées avec leurs formes extérieures et leur classification naturelle* (1804), l'identité de position de deux plantes dans une classification doit révéler des analogies profondes, et donc une éventuelle action thérapeutique commune. Ainsi, alors même que l'exigence d'une classification naturelle est acquise, les qualités et les usages des plantes sont toujours recherchés. Les applications industrielles ou pharmaceutiques tireront parti de ces proximités. Il deviendra possible de substituer une substance équivalente à une autre en cas de pénurie. La classification des plantes selon leurs usages les plus communs présente cependant l'inconvénient d'être conventionnelle. La distribution des végétaux en alimentaires, fourragers et médicinaux, par exemple, n'exclut pas qu'une même plante figure dans plusieurs groupes. De Théophraste, disciple d'Aristote, auteur d'une *Histoire des plantes* (310 av. J.-C.), à Jonston (1661), en passant par les classifications de Discorde (50), Lobel (1570), de l'Écluse (1576), Daléchamps (1587), Lauremberg (1626), la

dimension utilitariste ne se démentira pas, alors même que l'intérêt pour l'étude morphologique progresse.

Les recherches taxinomiques, précisément parce qu'elles obéissent à d'autres motifs qu'économiques, retiennent d'autres critères que les usages éventuels, et accorderont la priorité à l'examen de la morphologie des parties – fruits, feuilles, graines, étamines, cotylédons –, qui devient d'autant plus fine que les observateurs disposent de microscopes. Tournefort (1694), Magnol (1689), et surtout Linné (1637) et Michel Adanson (1763), illustrent cette période, celle de l'épanouissement des systèmes, « chaque classificateur instaurant par ses propres choix une hiérarchie des caractères » (Tort, 1996). Parallèlement, et en réaction contre le relativisme qu'inspire la juxtaposition de systèmes fondés sur des critères arbitraires, les naturalistes s'attachent à la mise au point d'une méthode naturelle de classification. Cette préoccupation devient explicite dans les œuvres de Michel Adanson et d'Antoine-Laurent de Jussieu, qui dénoncent les systèmes antérieurs, rendus artificiels par le choix de critères initiaux partiels. Adanson estime ainsi que la classification naturelle repose sur la prise en considération de la totalité des parties. Par divers biais méthodologiques, la volonté d'écarter les critères superficiels ou anthropomorphiques s'affermirait, et donne corps à l'exigence de scientificité. Lorsqu'elle s'attache à l'essentiel et à l'immuable, la taxinomie peut en effet contribuer à l'essor de la biologie, pour autant, assure François Dagognet, « qu'un vivant ne saurait se comprendre à partir de lui-même, mais seulement à partir des comparaisons essentielles avec les autres » (Dagognet).

Mais cet intérêt théorique demeure indissociable d'enjeux métaphysiques, puisque l'espèce humaine, convaincue de posséder des facultés exceptionnelles, entend légitimer son existence par une préférence cosmique prévisible, et n'est guère disposée à admettre qu'elle n'est que l'une des espèces appartenant à un petit groupe de mammifères. La profession de foi fixiste de Linné, assurant qu'« Il y a autant d'espèces différentes qu'il y a de formes différentes créées à l'origine par la puissance infinie », constitue, parmi beaucoup d'autres, une déclaration d'allégeance au récit biblique de la Création du monde, des animaux et de l'homme par Dieu.

Ces enjeux économiques et métaphysiques ne s'effacent pas brutalement. Ils persistent au contraire, sous des formes diverses, tout au long de l'histoire des taxinomies, et constituent l'arrière-plan des débats méthodologiques.

On définit traditionnellement la classification par le groupement d'objets à l'intérieur de classes, fondé sur leur détention en commun d'attributs. Toutefois la classification ne porte pas seulement sur les divers organismes, mais aussi sur les objets artificiels ou idéaux, comme les techniques ou les livres. Limitée aux êtres réels, minéraux, plantes et animaux, la taxinomie, en particulier lorsqu'elle concerne les êtres vivants, doit respecter des règles adaptées à ses objets. Les opérations logiques mobilisées, déduction et

division logique, sont connues depuis Aristote. Le naturaliste suédois Carl von Linné a formulé dans son *Systema naturae*, en 1735, les bases d'une classification des êtres vivants à partir desquelles les classifications ultérieures se développeront, compte tenu des progrès réalisés dans la connaissance des mondes animal et végétal. Le système linnéen ordonne des catégories de regroupement selon une hiérarchie descendante, de la catégorie la plus vaste, le Règne, à la plus précisément définie, l'Espèce. Les espèces de la nature sont ainsi rangées selon une hiérarchie de catégories, Espèce, Genre, Famille, Ordre, Classe, Phylum, Règne, que l'on appelle la hiérarchie linéenne, la procédure utilisée pour classer des animaux consistant à combiner des espèces « apparentées » en groupes zoologiques appelés taxons.

Sans doute parce qu'elle possède une existence concrète, l'Espèce est une catégorie réputée non arbitraire. Une espèce biologique se définit aujourd'hui comme « un groupe de populations naturelles interfécondes qui est reproductivement isolé d'autres groupes de même nature » (Mayr). Cette définition ne convient pas aux organismes qui se reproduisent asexuellement et rencontre des difficultés liées aux espèces isolées qui commencent à évoluer vers une espèce nouvelle. Elle témoigne ainsi du fait que, dans l'effort pour décrire et expliquer la variété des formes vivantes, le concept d'espèce constitue la cheville ouvrière.

À l'époque de Linné, deux questions centrales, toujours actuelles, gouvernent l'établissement de la taxinomie : « D'une part, comment déterminer les propriétés susceptibles de correspondre aux similarités les plus significatives, c'est-à-dire aptes à révéler l'ordre naturel en son fondement réel ? D'autre part, comment s'élever à des considérations causales sur la genèse de ces propriétés représentatives de la spécificité des divers types d'organismes ? » (Duchesneau, 1997).

La notion prétransformiste d'espèce autorisait une réponse à la première interrogation en termes de critères morphologiques qui différaient d'un naturaliste à l'autre. Certaines taxinomies étaient anthropomorphiques, comme celle proposée par Giambattista Porta (*Phytognomica*, 1588), qui répartissait les plantes selon leur ressemblance avec les astres ou les organes du corps humain. Cependant une prévalence est reconnue progressivement aux organes de la génération. La botanique linnéenne rend explicite cette tendance. Quant à la question de la causalité déterminant l'appartenance spécifique, elle donne lieu à un large éventail de réponses qui s'inscrivent dans deux traditions de recherche. Selon la première, illustrée par Buffon dans son *Histoire naturelle des animaux*, les définitions d'espèces n'ont qu'une valeur indicative de similarités empiriques. Fondée sur l'interfécondation et la reproduction, la notion d'espèce ne représente aucune essence réelle. Elle exprime une découpe conventionnelle dans la continuité des productions naturelles. L'autre tradition de recherche professe une relation d'expression entre le niveau des caractéristiques des membres d'une espèce et un fondement substantiel

propre à l'espèce concernée. Elle est à l'œuvre par exemple chez Cuvier, soutenant le principe de corrélation fonctionnelle des organes. Dans cette perspective, les similarités empiriques reflètent les causalités sous-jacentes, et la notion d'espèce possède un statut de réalité par lequel elle échappe à la convention et donne un fondement objectif à l'édifice hiérarchisé de la systématique. La plupart des taxinomistes de la première moitié du XIX^e s. partageront cet idéal d'une systématique susceptible de dégager les lois biologiques des espèces. L'avènement de l'évolutionnisme darwinien allait remettre radicalement en cause ces deux traditions en donnant des assises inédites à la classification biologique.

Darwin consacre un chapitre entier, le treizième de *L'Origine des espèces*, à la question de la classification biologique, qu'il renouvelle à la lumière de sa théorie de la modification des espèces par sélection naturelle des petites variations. « Toutes les règles, écrit-il, toutes les difficultés, tous les moyens de classification qui précèdent, s'expliquent, à moins que je ne me trompe étrangement, en admettant que le système naturel a pour base la descendance avec modification, et que les caractères regardés par les naturalistes comme indiquant des affinités réelles entre deux ou plusieurs espèces sont ceux qu'elles doivent par hérédité à un parent commun. Toute classification vraie est donc généalogique ; la communauté de descendance est le lien caché que les naturalistes ont, sans en avoir conscience, toujours recherché [...] » (*L'Origine des espèces*, chap. XIII).

Darwin, le premier, a vu clairement que le groupement des organismes est le résultat de l'ascendance commune des membres de chaque groupe. Pour être « naturelle », une classification doit donc être généalogique, elle doit refléter l'ascendance. Ce dépassement incontestable de la préoccupation taxinomique classique inaugure un domaine de recherche inédit, étroitement lié aux efforts pour dénouer le paradoxe de l'usage darwinien du terme d'espèce.

Pour Darwin, les variations ne se réduisent pas à des modulations à l'intérieur du cadre rigide des espèces identifiées comme « types naturels ». La sélection naturelle des petites variations est en effet à l'origine de nouvelles espèces à partir des espèces existantes. Mais cette relativisation darwinienne des frontières interspécifiques ou intervariétales s'accompagne d'un usage du terme d'« espèce » chargé de connotations essentialistes et fixistes qui vont à contrecourant du programme transformiste dont il entendait jeter les bases théoriques. John Beatty a tenté de dénouer ce paradoxe en faisant valoir que la stratégie de Darwin tendait à contester les positions des naturalistes de son époque sur leur propre terrain, en minant les définitions proposées de l'espèce et en dévoilant leur incapacité à rendre compte de la réalité spécifique suivant l'expérience de la dynamique évolutive. On voit mal en effet comment un cadre conceptuel fondé sur les postulats de l'immutabilité des espèces et de la permanence inaltérable d'une ressemblance essentielle entre

représentants de l'espèce pourrait s'accommoder de l'évolution des organismes. Il resterait cependant à élaborer les définitions de substitution qui permettraient d'intégrer le concept d'espèce au nouveau contexte théorique. Comme le souligne François Duchesneau (*Philosophie de la biologie*, 1997), le propos de Darwin n'est pas de récuser la notion d'espèce, mais de la repenser. L'objectif initial de Darwin est d'assimiler le statut de l'espèce à celui de la variété. Les variétés sont en effet considérées comme intraspécifiques lorsque les gradations intermédiaires coexistent dans notre expérience, mais se transforment en distinctions d'espèces lorsque ces points de repère nous font défaut. Le scepticisme sur l'essence des espèces et la nécessité de rejeter la catégorie classificatoire d'espèce retenue par les naturalistes fixistes répond à cet objectif. Mais l'absence de distinction non ambiguë des espèces et des variétés ne signifie pas l'abandon de tout effort théorique pour cerner les mécanismes sous-jacents à la spéciation par variation divergente et pour marquer des paliers évolutifs. Reste que Darwin n'est pas parvenu à établir un mécanisme de la spéciation, ni à déterminer les modalités de production de nouvelles espèces à partir d'espèces existantes, de sorte que le renouvellement du concept d'espèce qu'il appelait de ses vœux demeure dans son œuvre partiellement programmatique.

Dans sa nouveauté radicale comme dans ses limites, le cadre darwinien délimite les tentatives contemporaines pour assurer à la catégorie d'espèce son rôle charnière dans une taxinomie qui vise à atteindre des référents réels. La théorie synthétique de l'évolution, et son noyau théorique issu de la génétique mendélienne, permettent de soutenir l'hypothèse d'une structure génétique sous-tendant les causalités évolutives. C'est à ce stade que se situent les principaux clivages contemporains. Ils opposent et relient, sous forme de polémiques vives et très techniques, les tenants du « phénécticisme » de Sneath et Sokal, ceux du « cladisme » de Willi Henning et ceux de la classification évolutionniste classique, comme Simpson et Mayr. Les premiers tentent de construire un programme de taxinomie numérique. Ils font abstraction de tout modèle théorique, partent de caractères observables présumés indépendants et comparent des groupes d'individus d'extension croissante. Les deuxièmes établissent leur classification à partir des points de bifurcation qui se trouvent sur les arbres phylogénétiques. Les derniers insistent sur le fait qu'une classification devrait refléter non seulement la descendance commune, mais aussi la similarité. Les stratégies taxinomiques donnent lieu à des débats compliqués. Ernst Mayr les rapporte à une difficulté initiale : pour rassembler les organismes en groupes zoologiques, deux critères sont requis, la similitude, notamment structurelle, et la généalogie. Or ces deux critères sont fréquemment en conflit l'un avec l'autre, et « les appliquer provoque alors la controverse » (Mayr). Histoire et structure... thème connu, sur lequel les taxinomistes brodent la fine dentelle de leurs méthodologies contrastées.

► BEATTY J., « Speaking of species : Darwin's strategy », in ERESHEFSKY M. éd., *The Units of Evolution. Essays on the Nature of Species*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1992. — DAGOGNET F., *Le catalogue de la vie*, Paris, PUF, 1970. — DUCHESNEAU F., *Philosophie de la biologie*, Paris, PUF, 1997. — FOUCAULT M., *Les mots et les choses. Une archéologie des sciences humaines*, Paris, Gallimard, 1966. — GOULD S.J., *L'éventail du vivant*, Paris, Le Seuil, 1997. — HENNING W., *Phylogenetic Systematics*, trad. Davis D.D. & Zangerl R., Urbana (Ill.), Univ. of Illinois Press, 1965. — LINNÉ, *Systema naturae, sive regna tria naturae, systematice proposita, per classes, ordines, genera et species*, 1735. — MAYR E., *Systematics and the Origin of Species* (1942), New York, Columbia Univ. Press, 1982. — « Classification II. — Systématique zoologique », *Dictionnaire du darwinisme et de l'évolution*, in TORT P. dir., Paris, PUF, 1996. — PELLEGRIN P., *La classification des animaux chez Aristote. Statut de la biologie et unité de l'aristotélisme*, Paris, Les Belles Lettres, 1982. — SOKAL P.R. & SNEATH P.H.A., *Principles of Numerical Taxonomy*, San Francisco, W.H. Freeman & Co, 1963.

Jean Paul THOMAS

→ Buffon ; Classification [BOTANIQUE] ; Darwinisme ; Espèce ; Évolutionnisme ; Vivant (Théorie du).

TECHNIQUE

La technique n'a jamais été ignorée par la philosophie, même s'il a fallu attendre le XIX^e, voire le XX^e s., pour qu'elle devienne l'objet d'une réflexion nourrie. Il était en effet impossible à la philosophie antique ou moderne de traiter de sujets comme l'action, la nature ou la science sans aborder le statut de la technique. Par ailleurs, aussi bien la réalité des techniques que la désignation du mot « technique » et le sens de la technique ont connu depuis les Grecs de profonds changements. Trois grandes époques se détachent : l'âge de la supériorité de la nature sur l'art, qui correspond grosso modo à la philosophie antique et plus largement à la domination de la compréhension aristotélicienne de la nature ; celui où s'affirme au contraire, avec la philosophie moderne, la supériorité de la technique sur la nature ; enfin, la période contemporaine caractérisée par l'estompement de la frontière séparant nature et technique. C'est en traitant de cette dernière période que nous déterminerons ce qu'il convient d'entendre aujourd'hui par « technique ». Nous évoquerons ensuite quelques-unes des questions suscitées par l'essor contemporain des techniques : l'autonomie de la technique vis-à-vis des modalités politiques et sociales de contrôle, la résorption de la science par la technique, les problèmes d'éthique médicale soulevés par l'essor du génie génétique, les effets des techniques de l'information et de la communication sur le travail et enfin les perspectives ouvertes par les techniques de l'image.

Les trois âges de la technique

philosophie antique ou la supériorité de la nature
— Les Grecs n'ont pas seulement inventé la

philosophie et la science, ils ont également créé les premiers instruments scientifiques comme l'armillaire ou le quadrant et excellé dans les domaines de l'architecture, de la construction navale ou de l'ingénierie militaire. Ils ont également été les premiers à fonder, avec l'école d'Alexandrie, une institution destinée au savoir scientifique et technique. Toutefois, en dépit de perfectionnements et d'inventions nombreuses, les techniques grecques ont fini par former un système bloqué. Ce blocage peut être attribué à la séparation entre science et technique. Or, la philosophie d'Aristote, qui a dominé la science antique, confère à cet état de choses sa justification ; en outre, nombreux furent les mécaniciens grecs pétris d'aristotélisme. Ces raisons suffisent à faire de l'aristotélisme la conception dominante de la technique dans l'Antiquité, même si elle ne fut pas la seule comme l'atteste par exemple le plaidoyer de Lucrèce pour l'ingéniosité et la créativité techniques.

L'art [la technique], « d'une manière générale, écrit Aristote, ou bien exécute ce que la nature est impuissante à effectuer, ou bien l'imité » (*Physique*, II, 8). Hors de tout contexte, cette phrase pourrait laisser entendre qu'il existe une supériorité de l'art sur la nature. Il n'en est rien. L'activité technique est, pour Aristote, redevable à la nature. Elle est toujours bornée par la nature, qu'elle se contente d'imiter un produit naturel, ou qu'elle imite la force productive de la nature. En « exécutant ce que la nature est impuissante à effectuer », l'homme ne fait jamais que déployer sa nature de producteur, en réalisant des possibles naturels, dans le cadre exclusif du monde sublunaire. L'homme et la technique ne s'élèvent pas au-dessus de la nature : ils lui sont totalement immanents. L'art n'aboutit pas à une surmature qui viendrait compléter et parachever, et encore moins dépasser la nature, mais bien plutôt à un détournement temporaire des êtres naturels. Les produits de l'art leur sont congénitalement inférieurs. Certes, à l'instar de la nature, l'art informe la matière. Relativement à la présence de la cause finale dans la nature, qui renvoie quant à elle à la cause formelle, Aristote n'hésite pas à affirmer que « si une maison était chose engendrée par la nature, elle serait produite de la façon dont l'art en réalité la produit » ; il en irait de même en sens inverse : « Si les choses naturelles n'étaient pas produites par la nature seulement, mais aussi par l'art, elles seraient produites par l'art de la même manière qu'elles le sont par la nature » (*Physique*, II, 8). Toutefois, alors que la relation entre forme et matière ou substrat relève d'un principe interne lorsqu'il s'agit des substances naturelles, il en va tout autrement avec les réalités artificielles. Les produits de l'art ne possèdent pas en eux-mêmes leur principe de fabrication : c'est nous qui imposons du dehors au bois comme matériau la forme-lit. D'où le caractère éphémère et superficiel d'une telle association. Comme le fait encore remarquer Aristote, le lit ne naît pas du lit, comme l'homme naît de l'homme ; si on plante un lit, il bourgeonnera et produira un arbre, car seule la substance bois, l'information naturelle de la matière par la

forme-bois, possède à titre essentiel « un principe et une cause de mouvement » (*Physique*, II, 1). Voués à une existence précaire, incapables de s'auto-reproduire, les produits de l'art ne sont guère que des sous-produits de la nature. Ils ne sauraient donc faire l'objet d'aucune exaltation.

Par ailleurs, « principe et cause de mouvement et de repos pour la chose en quoi elle réside immédiatement, par essence et non par accident », la nature renvoie à la nécessité (à ce qui ne peut pas ne pas être ou être autre qu'il n'est), alors que l'action humaine, qu'il s'agisse du faire ou du fabriquer, relève de la contingence (de ce qui peut ne pas être ou être autre qu'il n'est). En d'autres termes, l'action technique commence là où cesse le règne du nécessaire. C'est pourquoi la technique ne saurait en droit occuper la moindre place au sein du cosmos céleste, de part en part nécessaire. Il n'est en effet de technique, pour Aristote, qu'au sein du monde sublunaire, terrestre, dans la mesure même où il n'est pas saturé par la nécessité : les phénomènes qui s'y produisent peuvent, en dehors de la nature, avoir également pour cause le hasard et l'action humaine. La technique n'a d'autre domaine que celui ménagé par la contingence. Elle ne saurait se confondre avec la science dont l'objet est la nécessité même de la nature. Il y a bien sur ce point une séparation radicale entre science et technique. La science est une chose noble qui nous élève vers les lois nécessaires du cosmos divin ; la technique nous renvoie en revanche aux routines des artisans.

La philosophie moderne ou la supériorité de la technique sur la nature. — Il en va tout autrement aux yeux des Modernes. L'avènement des physique et métaphysique modernes bouleverse la compréhension des rôle et fonction de l'activité technique au sein de la nature. Depuis longtemps déjà, l'affirmation biblique d'une création de l'homme à l'image et à la ressemblance d'un Dieu étranger et transcendant à la nature corrode l'idée d'une pure et simple immanence de l'activité technique à la nature. Mais cette conception judéo-chrétienne s'enrichit alors d'un autre apport : celui du géomètre divin, tel que Platon se l'est figuré dans le *Timée*. Dès lors le Dieu Créateur revêt l'aspect d'un géomètre divin, architecte originaire, à la ressemblance duquel notre propre entendement a été créé. Au seuil de la modernité, les comportements ont également profondément changé vis-à-vis de la nature. Celle-ci fait déjà l'objet d'une exploitation systématique des énergies éolienne et hydraulique et des ressources du sol comme en témoigne le degré de déforestation ; les machines ont, pour la première fois, fait leur entrée dans la vie quotidienne (les horloges) et dans les ateliers (les machines textiles) : elles instaillent l'idée d'une possible maîtrise des forces naturelles.

Si « on entend comprendre intensive », écrit Galilée, pour autant que ce terme implique intensité, c'est-à-dire perfection, dans la compréhension d'une proposition, je dis que l'intellect humain en comprend

parfaitement certaines et en a une certitude aussi absolue que la nature elle-même peut en avoir ; c'est le cas des sciences mathématiques pures, c'est-à-dire de la géométrie et de l'arithmétique : en ces sciences l'intellect divin peut bien connaître infiniment plus de propositions que l'intellect humain, puisqu'il les connaît toutes, mais à mon sens la connaissance qu'a l'intellect humain du petit nombre de celles qu'il comprend parvient à égaler en certitude objective la connaissance divine, puisqu'elle arrive à en comprendre la nécessité et qu'au-dessus de cela il n'y a rien de plus assuré » (*Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, 1632, Paris, Le Seuil, 1992). Cette affirmation d'une identité au moins partielle entre les entendements humain et divin, soutenue aussi bien par Kepler, Galilée, que par Newton, sera développée par Spinoza, Malebranche, Leibniz et pour finir, quoique d'une autre manière, par Hegel. Par ailleurs, Galilée a révolutionné la science des machines : il a rendu possible, grâce au calcul et en dépassant le sens commun, l'évaluation rigoureuse de leurs performances.

Pour autant qu'elles prennent désormais appui sur la constitution mathématique du monde, la technique et ses œuvres ne peuvent plus être appréhendées d'une façon péjorative. L'art comme la nature relèvent en effet d'un même entendement géométrique. Les produits de la nature comme ceux de l'art apparaissent en position seconde eu égard à leur soubassement intelligible commun. Il en résulte au moins trois conséquences.

La première est une sorte de dévalorisation en retour de la nature. « Si l'un des plus célèbres architectes, écrit par exemple Galilée, avait eu à distribuer sur la grande route du ciel la multitude des étoiles fixes, je crois qu'il les aurait rangées en beaux ensembles carrés, hexagonaux et octogonaux, insérant les plus grands dans les moyens et les plus petits, se servant des rapports qu'il connaissait, et estimant ainsi avoir obtenu de belles proportions ; Dieu, au contraire, comme s'il les avait jetées à la main au hasard, nous donne l'impression de les avoir éparpillées sans règle, sans symétrie, sans élégance » (*A Gallanzone Gallanzone*, 16 juillet 1611). Le Descartes du *Traité de la lumière* déclare quant à lui qu'il convient de ne désigner par le mot « Nature » que la seule Matière (*Le Monde ou Traité de la Lumière*, 1633, A.T., t. XI). Un peu plus près de nous encore, en manière de vulgarisation, Fontenelle convie, dans ses *Entretiens sur la pluralité des mondes*, son interlocutrice à ne voir dans le « grand spectacle » de la « nature » qu'une scène « d'opéra » où tout fonctionne par « machines », « roues et contrepoids » (*Entretiens sur la pluralité des mondes*, 1686, La Tour d'Aiguës, L'Aube, 1990-1994). La seconde conséquence découle de cette dépréciation de la nature : c'est l'exaltation de la puissance technicienne et l'invitation à rectifier le cours naturel des choses. Mentionnons simplement quelques morceaux d'anthologies : celui où Bacon déclare attendre de la science nouvelle quelques pouvoirs inédits tels ceux de « prolonger la vie, [...] de guérir

des maladies réputées incurables, [...] d'augmenter et d'élever le cérébral, [...] de fabriquer de nouvelles espèces, etc.» (*La Nouvelle Atlantide*, 1627, Paris, Payot, 1983); celui où Descartes nourrit l'espoir de découvrir « quelque moyen, qui rende communément les hommes plus sages et plus habiles qu'ils n'ont été jusqu'ici », grâce à la révolution que ne saurait manquer d'introduire dans la « Médecine » la nouvelle physique (*Discours de la méthode*, 1637, A.T., t. VI); une espérance relayée par Condorcet qui attendra également de l'amélioration de « l'organisation naturelle » de l'homme le « perfectionnement réel des facultés intellectuelles, morales et physiques » (*Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain*, 1795, Paris, Garnier-Flammarion).

Enfin, la position en surplomb dont jouit l'homme, à l'instar du Créateur, édulcore la différence entre nature et artifice. « Je ne reconnais aucune différence, écrit Descartes, entre les machines que font les artisans et les divers corps que la nature seule compose, sinon que les effets des machines ne dépendent que de l'agencement de certains tuyaux, ou ressorts, ou autres instruments, qui, devant avoir quelque proportion avec les mains de ceux qui les font, sont toujours si grands que leurs figures et mouvements se peuvent voir, au lieu que les tuyaux ou ressorts qui causent les effets des corps naturels sont ordinairement trop petits pour être aperçus de nos sens. Et il est certain que toutes les règles des mécaniques appartiennent à la physique, en sorte que toutes les choses qui sont artificielles, sont avec cela naturelles » (*Principes de la philosophie*, 1644, A.T., t. IX). La différence entre artifice et nature n'affecte plus, comme c'était le cas pour Aristote, le principe constitutif des êtres, mais relève d'une simple question de proportion de leurs composants respectifs. La technique divine dépasse toutefois la technique humaine, bornée par la taille de nos mains. « Chaque corps organique d'un vivant, écrit Leibniz dans la *Monadologie* (§ 64), est une espèce de machine divine, ou d'automate naturel, qui surpasse infiniment tous les automates artificiels. Parce qu'une machine faite par l'art de l'homme, n'est pas machine dans chacune de ses parties. Par exemple : la dent d'une roue de laiton a des parties ou fragments qui ne nous sont plus quelque chose d'artificiel et n'ont plus rien, qui marque de la machine par rapport à l'usage, ou la roue était destinée. Mais les machines de la nature, c'est-à-dire les corps vivants sont encore machines dans leurs moindres parties, jusqu'à l'infini. C'est ce qui fait la différence entre la Nature et l'Art, c'est-à-dire, entre l'art divin et le nôtre » (*La Monadologie*, 1714, Paris, Delagrave, 1975). Il y a bien pour Leibniz une différence entre artifice et nature, mais elle traverse le domaine même de l'artifice. En ce sens, il s'agit plutôt d'une forme paradoxale d'identité. Il n'existe plus que des machines, de deux sortes : celles finies de l'art humain, et celles infinies de l'art divin. Descartes et Leibniz renouent avec l'idée d'une infériorité de l'art, mais d'une tout autre façon qu'Aristote : au nom de l'insuffisance mécanique de l'art humain.

Qu'est-ce que la technique aujourd'hui ? — Il n'est plus possible de désigner par le mot « technique », à l'instar des Anciens, une réalité aussi hétéroclite que les divers savoir-faire. Il n'est guère possible non plus de suivre les Modernes et de confier l'usage de ce mot à la désignation des machines. Le développement des biotechnologies nous conduit en effet à appeler « techniques » deux types d'objets : non seulement ceux que nous fabriquons, mais également les objets naturels que nous modifions. Par ailleurs, le sens même de la technique a changé : la frontière entre artifice et nature devient poreuse. Premièrement, les techniques cherchent moins aujourd'hui à dominer qu'à simuler la nature, voire à se fondre en elle. Tel pourrait être le cas de la fusion nucléaire. Les réactions de fusion, à la différence des réactions de fission, ne produisent pas de déchets radioactifs de longue durée; elles constitueraient le moteur le plus proche de la nature que l'on puisse imaginer, fonctionnant à compter d'un certain état de régulation sans adjonction d'énergie, comme une étoile. Considérons un autre exemple. Le virus T4 injecte son acide nucléique et donc les gènes dont il est porteur dans la bactérie *Escherichia coli*. Il détourne à son profit le métabolisme de cette bactérie, la contraignant à synthétiser des milliers de capsules virales qui la feront exploser. Elle libérera d'autres virus qui infecteront à leur tour d'autres bactéries. Or, le génie génétique ne procède pas autrement. La modification du programme génétique de certaines bactéries, par exemple, les contraint à produire des protéines qu'elles ne synthétisent pas naturellement. Deuxièmement, les deux ensembles constitués par les objets fabriqués et les êtres naturels modifiés tendent à se rapprocher. D'un côté, comme l'a montré Gilbert Simondon, les machines tendent à se rapprocher du mode d'existence des objets naturels. Simondon montre par exemple comment l'évolution qui court de la machine à vapeur au réacteur, conduit à une intégration croissante des éléments et des fonctions. Le moteur s'approche ainsi de plus en plus de la cohérence interne propre aux organismes vivants. Alors que dans la machine à vapeur la combustion avait lieu hors du piston, dans une chaudière annexe, elle s'est déplacée à l'intérieur du cylindre avec le premier moteur à explosion, le moteur Lenoir. L'échauffement du mélange carburé dans le cylindre au moment de la compression, essentiel pour le moteur à combustion interne, est devenu essentiel dans le moteur Diesel, etc. De l'autre côté, le génie génétique rapproche l'univers vivant de celui des outils et des machines. Divers outils moléculaires ont été mis au point pour l'étude de l'ADN : par exemple des enzymes sont utilisés pour découper l'ADN, et d'autres le sont pour en recombinaison les morceaux. Les micro-organismes — bactéries, levures, champignons, micro-algues, etc. — font désormais fonction de machines destinées à la production industrielle de molécules diverses. On utilise par exemple des bactéries reprogrammées pour fabriquer à grande échelle des protéines rares qu'elles ne synthétisent pas naturellement. Il existe également de véritables biomachines, c'est-à-dire des protéines aptes à produire un travail mécanique.

Certains agencements de protéines, par exemple, se contractent sous l'effet d'une hausse de la température ambiante, transformant ainsi, comme un moteur, de la chaleur en travail; d'autres transformeront de l'énergie électrique ou de la lumière en travail mécanique. Enfin, il existe une catégorie mixte d'artefacts, ressortissant à la fois aux objets techniques et aux êtres vivants. On peut lutter contre les symptômes de la maladie de Parkinson en recourant à un stimulateur cérébral qui inhibe électriquement les centres nerveux à l'origine des tremblements; ou bien utiliser des composants biologiques pour les ordinateurs, etc. Troisièmement, on peut discerner dans l'émancipation des machines vis-à-vis de la main une modalité originale du dépassement de la frontière opposant artifice et nature. Les premières machines, telles la catapulte ou l'arbalète, visaient à amplifier la puissance du geste. Le machinisme industriel a permis une première émancipation de la main et du corps en combinant le mouvement d'une façon adéquate. L'automatisation des autres capacités du corps, y compris celle des aptitudes cérébrales avec l'ordinateur et le microprocesseur, est venue compléter cette tendance : tel est le cas avec la mise au point de capteurs divers, avec celle de nez artificiels ou de rétines de synthèse. Mais c'est toutefois le franchissement de la ligne de démarcation qui devait, selon Descartes, à jamais séparer la nature des arts, qui parachève ce mouvement d'émancipation. Avec la gravure par photolithographie de circuits électroniques sur des puces de silicium, à l'échelle du micron au moins, et plus encore avec les nanotechnologies en gestation, à l'échelle du nanomètre, la technique se libère de toute espèce de proportion à la main humaine, pour rejoindre les dimensions moléculaires, voire atomiques de la matière. Quatrièmement, *homo faber* est certes une espèce unique, mais il relève néanmoins du genre *animal faber* : l'outil nous apparaît désormais comme un fait zoologique. Cinquièmement, les techniques ne sont pas simplement des moyens à notre disposition, elles ont fini par former une seconde nature, également contraignante. Le problème n'est plus celui de l'infériorité ou de la supériorité de la technique sur la nature, mais celui de leur osmose. Nous entrons dans un troisième âge de la technique.

Considérons donc que se détache sur le fond des produits de l'action humaine l'ensemble plus restreint des produits de l'action technique de l'homme. Elle engendre deux types d'objets qui, selon la vieille détermination aristotélicienne, n'ont pas en eux-mêmes leur principe de fabrication ou de modification : les objets techniques que nous fabriquons, et les objets naturels que nous modifions. Au sein des objets techniques, on peut encore souligner l'originalité des objets fabriqués en vue d'en fabriquer d'autres, les machines, et celle des objets naturels modifiés également à des fins productives.

Interrogations actuelles

L'autonomie de la technique. — Admettre que les techniques ne se réduisent pas à de purs moyens au service de nos désirs semble aller de soi : elles contribuent

en effet à modeler les sociétés et offrent leurs propres résistances. Affirmer qu'elles ne peuvent être considérées comme des moyens au service de nos fins et échappent à toute espèce de contrôle social et politique est en revanche problématique. Telle est pourtant la thèse soutenue par Heidegger et J. Ellul, et à leur suite par beaucoup d'autres. Le raisonnement d'Ellul est celui d'un moraliste, doublé d'un sociologue. L'extension des réseaux de techniques diverses a fini par forger un immense système constitué de sous-systèmes interdépendants, par exemple ceux des transports ferroviaires et de la production d'électricité, qui détermine de lui-même sa croissance. Les techniques contemporaines constituent en outre des machines à divertir, au sens pascalien du terme, d'une puissance inégalée : elles menacent la possibilité même d'une spiritualité personnelle. L'approche de Heidegger est tout autre. Les machines n'importent guère par elles-mêmes, elles ne sont que la conséquence de la relation moderne au monde, qui nous enjoint de ne voir dans la nature qu'un ensemble de forces maîtrisables par le calcul, qu'un stock d'énergies, fussent-elles humaines, à exploiter. Or, personne n'a décidé de ce mode d'apparition des choses, il s'est imposé tel le destin. Récemment, G. Hottis a voulu voir dans l'essor technicien la poursuite, par delà l'humanité parlante, du procès naturel de la créativité cosmique et biologique. Tous ces raisonnements nient l'humanité de la technique : elle relèverait, comme procès social, de l'automatisme des processus naturels. Comme l'ont montré quelques historiens ou sociologues, cette thèse n'est guère compatible avec l'examen des choix techniques.

La technoscience en question. — Science et technique apparaissent aux Anciens comme séparées; bien que plus complexe, l'effectivité de leurs relations n'a pas contredit cette séparation de principe : la science grecque n'a impulsé aucun essor technique. Les Modernes ont en revanche revendiqué l'utilité de la science; la physique moderne s'intéressait de façon privilégiée aux machines; l'usage du calcul, l'exigence d'un travail précis pour la confection des instruments scientifiques, la mise à profit de lois physiques quantifiées ont bouleversé le monde des techniques. La science nouvelle a d'emblée permis d'améliorer d'anciennes techniques et d'en inventer de nouvelles : Galilée et Huygens ont révolutionné les performances des horloges, la presse hydraulique a été inventée; l'amélioration apportée par Watt à la machine à vapeur doit beaucoup à l'utilisation de la recherche en cours, à savoir les travaux de Black sur la chaleur. Il faudra toutefois attendre le dernier quart du XIX^e s. pour voir apparaître les premiers laboratoires industriels et, partant, une exploitation organisée du savoir scientifique. Quant aux grandes inventions techniques du XX^e s., comme l'ordinateur ou l'utilisation de l'énergie nucléaire, elles procèdent directement d'un savoir hautement sophistiqué. Est-ce à dire qu'il n'y a plus de science qu'en vue de l'industrie et du marché? D'aucuns répondent par l'affirmative et soutiennent

que la connaissance a perdu ses vertus spéculative et émancipatrice au profit d'une course insensée et menaçante à la puissance pour la puissance. La technique, muette et purement efficace, aurait absorbé la science. La réalité est cependant plus complexe. D'un côté, les objets techniques qui alimentent le marché sont loin d'être des théorèmes réifiés : ils recourent de façon originale à des connaissances hétérogènes et incorporent toutes sortes de significations sociales ; de l'autre, les théories scientifiques ne sauraient se réduire ni à leurs retombées techniques, quand elles existent, ni à de pures manipulations formelles : la démarche scientifique reste discursive et interrogative.

Le génie génétique et l'humanité. – Le génie génétique est en passe de transformer notre rapport au vivant, y compris en nous-mêmes. C'est ce dernier point qui suscite les inquiétudes les plus vives. Nombreux sont ceux qui redoutent la possibilité d'une production à la commande des enfants, et au-delà la manipulation de notre humanité même. Or, de telles craintes sont excessives ; il est possible de l'affirmer sans préjuger de la réalité des problèmes moraux posés par telle ou telle technique biomédicale. La condition à une telle manipulation, à savoir la détermination génétique de nos comportements, ne peut être satisfaite. Nos comportements sont en effet sous-tendus par la multitude indéfinie de nos circuits synaptiques. Or, on ne voit pas comment nos 100 000 gènes pourraient commander le schéma de câblage de nos 10^{14} synapses. Chaque gène devrait alors pouvoir diriger un milliard de connexions entre les neurones, ce qui est exorbitant. À défaut d'ailleurs du caractère épigénétique de la structuration fine du cerveau, la diversité des cultures n'aurait jamais vu le jour.

La métamorphose du travail. – Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont en passe de changer radicalement le travail. Elles ont suscité une dématérialisation et une intellectualisation du travail ouvrier. L'usinage par commandes numériques ou les robots ont remplacé la dextérité et le savoir-faire des ouvriers qualifiés, etc. Les interventions directes ont reflué vers l'amont ou vers l'aval d'un procès de fabrication qui tend vers l'automatisation complète. L'interface entre le travail humain et les machines ne concerne plus la matière ou l'énergie, mais l'information. À l'intellectualisation du travail ouvrier répond la mécanisation du travail intellectuel, comme en témoignent par exemple les Systèmes experts ou la Conception assistée par ordinateur d'objets industriels. Cette évolution qualitative s'accompagne d'une évolution quantitative : la réduction du volume de travail disponible dans l'industrie. D'où toutes sortes d'interrogations. Quel est l'avenir du travail ? Les TIC contribuent-elles à la montée des inégalités ? Sur quels critères fixer les salaires ? Etc.

L'avènement d'un cybermonde. – Quels seront les effets de la réalité virtuelle, c'est-à-dire de la possibilité

d'évoluer, grâce aux techniques de numérisation de l'information, dans un monde de synthèse avec des sensations analogues aux sensations habituelles ? Le télétravail s'en trouvera-t-il renforcé ? La constitution d'une communauté d'internautes bousculera-t-elle les frontières ? Ces techniques permettront-elles de pallier les carences de la démocratie représentative ? La réalité virtuelle engendrera-t-elle une forme inédite d'autisme ? Voici quelques-unes des interrogations suscitées par l'essor contemporain des techniques.

► BOURG D., *L'Homme artificiel. Le sens de la technique*, Paris, Gallimard, 1996. – CARDWELL D., *The Fontana History of Technology*, Londres, Harper Collins Publ., 1994. – DAUMAS M., *Histoire des techniques*, Paris, PUF « Quadrige », 5 vol., 1996. – ELLUL J., *La Technique ou l'enjeu du siècle*, Paris, A. Colin, 1954. – GILLE B., *Histoire des techniques*, Paris, Gallimard, 1978. – GÖRZ A., *Misères du présent. Richesse du possible*, Paris, Galilée, 1997. – HEIDEGGER M., *Vorträge und Aufsätze*, Pfullingen, Verlag Günther Neske, 1954. – HOTTIS G., *Le Signe et la technique. La philosophie à l'épreuve de la technique*, Paris, Aubier, 1984. – LECOURT D., *Contre la peur. De la science à l'éthique, une aventure infinie*, Paris, Hachette, 1990. – SIMONDON G., *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, 1958-1989. – VIRILIO P., *Cybermonde, la politique du pire*, Paris, Textuel, 1996.

Dominique BOURG

→ Automate ; Empirionisme ; Heidegger et la question de la technique ; Nature ; Reproductibilité ; Travail ; Vitalisme et mécanisme.

TECTONIQUE DES PLAQUES

La théorie de la tectonique des plaques a vu le jour à la fin des années 1960. Reprenant les conceptions mobilistes de Wegener, elle les développe et leur fournit une assise théorique solide en s'appuyant sur l'hypothèse alors toute récente de l'expansion des fonds océaniques. Universellement adoptée aujourd'hui, elle constitue le nouveau paradigme des sciences de la Terre. Elle offre un modèle cinématique remarquable des mouvements horizontaux à grande échelle à la surface du globe. Elle fournit un cadre interprétatif cohérent à l'ensemble des phénomènes et des structures géologiques : la formation des montagnes, la répartition et la cause des tremblements de terre et du volcanisme. Enfin, elle met en évidence les échanges d'énergie et de matière entre l'intérieur et l'extérieur de la planète.

L'hypothèse de l'expansion des fonds océaniques

Wegener présente initialement son hypothèse des translations continentales en janvier 1912, mais malgré les arguments regroupés et faute d'un mécanisme explicatif satisfaisant, il ne réussit pas à faire reconnaître son point de vue. Ses arguments, comme ceux de ses successeurs, reposent, il est vrai, uniquement sur l'observation des continents : les fonds océaniques, qui représentent les deux tiers de la surface terrestre et dont

la connaissance est cruciale pour appréhender la Terre dans son ensemble, restent largement inexplorés. La situation évolue au lendemain de la Seconde Guerre mondiale grâce au développement de l'océanographie et des techniques de reconnaissance sous-marine (échosondeur, écoute sismique, détection magnétique...) et c'est la découverte progressive des fonds marins qui va permettre aux idées mobilistes de s'implanter.

Une des premières surprises résultant de l'exploration des fonds marins est la révélation d'une topographie très caractéristique. S'élevant au milieu des plaines abyssales, les dorsales médio-océaniques tissent à la surface du globe un réseau de près de 65 000 km de chaînes montagneuses, hautes de 3 000 m, larges de 200 km, parfois éventrées par un fossé central, ou « rift ». Les dorsales se signalent non seulement par leur topographie singulière mais aussi par un flux de chaleur élevé ainsi qu'une activité volcanique et sismique. Les fosses océaniques, qui sont les régions les plus profondes des océans (4 à 5 km au-dessous des plaines abyssales), sont également caractérisées par une activité sismique intense. Ces fosses bordent le Pacifique mais sont absentes autour de l'Atlantique. L'exploration du plancher océanique est à l'origine d'autres trouvailles déconcertantes. La croûte océanique, de faible épaisseur (5-10 km), est composée de roches basaltiques relativement denses alors que la croûte continentale, de plus grande épaisseur (30-40 km), est constituée de roches granitiques plus légères. La faible épaisseur des séries sédimentaires trouvées sur les fonds océaniques pose également problème : que sont devenus les sédiments entassés depuis l'origine du globe ? Les océans ont donc une importance considérable, non pas à cause de leur étendue, mais parce qu'ils sont géologiquement très différents des continents.

Hess, en 1960 (son article ne paraît cependant qu'en 1962), tente de regrouper cet ensemble de découvertes en une unique hypothèse. Avec une grande analogie avec le modèle de Holmes présenté trente ans auparavant, il affirme que le manteau terrestre est affecté de larges mouvements de convection et que les dorsales mettent en évidence les courants ascendants et les fosses océaniques les courants descendants. La croûte océanique est continuellement créée au niveau des dorsales. Elle est ensuite entraînée à la surface des cellules de convection, s'éloigne de part et d'autre des dorsales et finit par atteindre les fosses où elle disparaît dans le manteau. La croûte océanique est donc continuellement recyclée et c'est ce qui explique son jeune âge et la faible épaisseur des sédiments qu'elle porte. Les continents, au contraire, à cause de leur relative légèreté, ne peuvent pas retourner dans le manteau. Ils sont condamnés à dériver à la surface de la Terre et sont les « mémoires insubmersibles » du globe. Hess précise que les continents se déplacent non pas en fondant les fonds océaniques comme le supposait Wegener, mais en étant passivement transportés sur une sorte de tapis roulant. En 1961, Dietz reprend

les visions de Hess et introduit l'expression « expansion des fonds océaniques » (« sea floor spreading » en anglais).

L'hypothèse de l'expansion des fonds océaniques, qualifiée par Hess lui-même de géopoeisic, reçoit un statut plus rigoureux grâce aux études géomagnétiques. Le champ magnétique terrestre correspond sensiblement à celui que créerait un énorme aimant dipolaire placé au centre de la Terre. Les mesures magnétiques réalisées au cours des explorations marines montrent cependant des déviations significatives, appelées anomalies magnétiques, par rapport au champ dipolaire. Ces déviations sont attribuées à l'aimantation propre des roches du fond marin. Elles montrent des structures très particulières en formant des bandes d'anomalies positives qui alternent avec des bandes d'anomalies négatives. Ces alignements sont parallèles aux dorsales et disposés symétriquement de part et d'autre de l'axe. L'explication de ce phénomène est donnée indépendamment par Morley et par Vine et Matthews en 1963. Le champ magnétique terrestre possède une orientation qui s'inverse au cours des âges, l'orientation actuelle définissant une orientation « normale ». La croûte océanique, lorsqu'elle est créée au niveau des dorsales, acquiert une aimantation propre en se refroidissant. Elle s'écarte ensuite symétriquement de part et d'autre des dorsales lorsque du nouveau matériau, qui s'aimante à son tour, est injecté au centre. Si l'aimantation survient avec un champ magnétique à orientation normale, l'anomalie induite est positive (l'aimantation fossile des roches s'ajoute au champ ambiant actuel). Si, au contraire, l'aimantation survient avec un champ à orientation inverse, l'anomalie induite est négative (l'aimantation fossile se retranche au champ ambiant). Les linéations magnétiques alternées se comprennent donc par la combinaison de la divergence de la croûte océanique et des inversions du champ magnétique.

Cette théorie élégante ne convainc pas immédiatement les scientifiques, mais d'autres études viennent progressivement la confirmer. Ainsi Vine et Wilson montrent en 1966 que l'explication de Morley et de Vine et Matthews n'est pas seulement qualitative mais également quantitative. On peut en effet la relier à l'échelle chronologique des inversions du champ magnétique terrestre, qui vient d'être établie. En associant chaque linéation magnétique aux inversions correspondantes et en supposant que le taux d'ouverture de chaque océan est constant, Vine et Wilson vérifient que la largeur de chaque linéation est bien proportionnelle à la durée entre les deux inversions. L'association des linéations aux inversions correspondantes permet également de dater la croûte océanique. Cette datation sera confirmée en 1968 par les forages dans le sol marin, qui montrent que les sédiments au contact de la croûte et dont l'âge est supposé à peine antérieur à celui de la croûte sont d'autant plus vieux qu'ils sont plus éloignés des dorsales. Vine et Wilson notent encore qu'en déterminant la distance entre deux linéations symétriques par

rapport à la dorsale, on peut calculer le taux d'ouverture des océans.

Une observation surprenante à propos des linéations magnétiques fait état de discontinuités, de décalages horizontaux de plusieurs centaines de kilomètres au niveau de zones de fractures. Wilson remarque en 1965 que ces décalages se retrouvent pour l'axe de la dorsale, et il les interprète en introduisant le concept de faille transformante. Les failles transformantes permettent de relier des segments de dorsales ou de fosses entre eux, ou même de joindre une dorsale à une fosse. Elles présentent toujours une partie active (entre les segments de dorsales ou de fosses, où les deux morceaux de croûte de part et d'autre de la faille se déplacent en sens opposé) et une partie passive (où les deux morceaux de croûte se déplacent dans le même sens mais en présentant un décalage horizontal). La sismologie amène une preuve éclatante de ce concept de faille transformante mais aussi de l'ouverture des océans. L'analyse des ondes émises par un tremblement de terre permet en effet de déterminer si celui-ci provient d'un mécanisme d'étretement (faille normale), de fermeture (faille inverse) ou de glissement (décrochement). Sykes montre en 1966 que les séismes sur les parties actives des failles transformantes correspondent bien à des cisaillements et que ceux sur les dorsales traduisent bien un phénomène d'ouverture. Ces différentes contributions provoquent la conversion massive, au cours de l'année 1966, des géophysiciens à l'hypothèse du « sea floor spreading » et permettent de déboucher sur l'énonciation de la théorie de la tectonique des plaques.

La formulation de la théorie de la tectonique des plaques

La théorie de la tectonique des plaques naît du mariage d'une hypothèse, celle de l'expansion des fonds océaniques, et d'une observation, la localisation de l'activité tectonique du globe. Dès la fin du XIX^e s., on avait remarqué que les chaînes de montagnes et les volcans se répartissaient suivant des bandes relativement étroites. Ainsi deux systèmes montagneux dominent : l'un autour de l'océan Pacifique avec les Cordillères américaines et les guirlandes d'îles asiatiques, et l'autre qui va des Alpes à l'Himalaya en passant par le Caucase et les montagnes de l'Iran. La carte de la répartition des séismes établie par Gutenberg et Richter en 1954 renforce cette idée en montrant que les séismes sont confinés dans des régions précises qui correspondent aux dorsales, aux failles transformantes, aux fosses et aux chaînes montagneuses. À l'exception des fosses, où les tremblements de terre existent jusqu'à 700 km de profondeur, les séismes sont également restreints à la partie superficielle du globe, à une profondeur inférieure à 100 km. Cette partie superficielle constitue la lithosphère, couche au comportement rigide qui surmonte l'asthénosphère, couche au comportement ductile. La lithosphère se distingue donc de l'asthénosphère, non pas par sa composition chimique mais par son comportement mécanique. Elle

comprend la croûte et la partie supérieure du manteau. Les tremblements de terre qui surviennent sous les fosses à une grande profondeur, ne peuvent se comprendre que par l'existence d'un matériau rigide enfoncé dans le manteau. Wadati, en 1930, avait déjà remarqué que les foyers de ces tremblements de terre avaient une répartition géométrique précise en fonction de la profondeur : ils se localisaient suivant un plan incliné. Benioff, en 1955, a poursuivi ces recherches de Wadati et le plan de répartition des séismes sous les fosses est aujourd'hui connu sous le nom de zone de Wadati-Benioff. En 1967, Oliver et Isacks interprètent cette zone comme la trace de la lithosphère océanique qui retourne dans le manteau. Ces lieux de disparition de la lithosphère océanique (on dira plus tard « zones de subduction ») étaient nécessaires dans la logique du « sea floor spreading » si on ne voulait pas supposer l'expansion de la Terre. La sismologie a désormais démontré leur existence.

En 1967, Morgan synthétise ces différentes approches en développant la première hypothèse « plaquiste ». Il suppose que la lithosphère est découpée en une série de « blocs » parfaitement rigides qui se déplacent les uns par rapport aux autres sur l'asthénosphère. Il montre que le mouvement d'un bloc à la surface de la Terre peut être décrit par une simple rotation entre sa position initiale et sa position finale. Cette rotation est définie par un axe qui passe par le centre de la Terre (axe eulérien de rotation) et par une vitesse angulaire. Une propriété essentielle est que les failles transformantes apparaissent comme des petits cercles centrés sur l'axe eulérien et qu'elles permettent donc de déterminer sa position. Au cours de la même année et indépendamment, Mc Kenzie et Parker développent des idées analogues en introduisant le terme de « plaque » pour ces blocs rigides et, l'année suivante, Le Pichon en fait une première application. Il divise la surface du globe en six plaques lithosphériques dont il détermine les frontières à partir de l'activité tectonique et il calcule les pôles de rotation de leur mouvement relatif depuis 120 millions d'années. Il montre ainsi que les mouvements des fonds océaniques, déterminés à partir des linéations magnétiques, peuvent se modéliser en termes géométriques simples. Par la suite, ces mêmes procédés permettront par simple « fermeture » des océans de reconstruire les positions successives des continents depuis 200 millions d'années, date où comme l'avait supposé Wegener ils formaient un unique supercontinent nommé Pangée qui s'est ensuite disloqué. En 1968 encore, Isacks, Oliver et Sykes parlent de « nouvelle tectonique globale » et vérifient que cette nouvelle tectonique est parfaitement appuyée par les phénomènes sismiques. En 1968 toujours, Vine et Hess introduisent l'expression « tectonique des plaques ».

La théorie de la tectonique des plaques a donc été formulée très rapidement, dans les années 1967-1968. Elle repose sur les principes suivants : 1) La lithosphère, qui est la couche externe rigide du globe, est divisée en plaques (on en compte aujourd'hui une

quinzaine à comparer aux six de Le Pichon). Les plaques sont soit purement océaniques, soit océaniques et continentales. 2) Les frontières de plaques sont de trois types. Les frontières divergentes (dorsales océaniques ou zones d'accrétion) où les plaques océaniques sont créées. Les frontières coulissantes (failles transformantes) où deux plaques glissent l'une par rapport à l'autre. Et les frontières convergentes qui regroupent les zones de subduction où les plaques océaniques retournent dans le manteau et les zones de collision où deux plaques continentales s'affrontent. 3) Les plaques se déplacent rigidement, sans se déformer et leur mouvement est décrit par des règles simples de géométrie sur la sphère. 4) L'activité tectonique est confinée aux frontières de plaques. On peut remarquer que ces règles de la tectonique des plaques ne contiennent aucune proposition sur le moteur des mouvements. Cependant, à la fin des années 1960, il ne fait pas de doute pour les chercheurs que les mouvements des plaques en surface sont couplés avec des mouvements internes affectant l'ensemble du manteau, et il est devenu implicite que le moteur du déplacement des plaques est une forme de convection thermique même si les modalités de celle-ci restent encore à établir.

Si la tectonique des plaques s'inscrit indiscutablement dans la lignée des idées mobilistes du XX^e s. et si elle montre de grandes similitudes avec le schéma prophétique de Holmes, il faut toutefois noter les différences avec les idées initiales de Wegener. Pour Wegener, la couche de *sima* affleurant au niveau des océans était entièrement statique, et les continents, blocs indépendants de *sial*, dérivèrent à sa surface sous l'impulsion de forces inconnues. Pour la tectonique des plaques, ce sont des plaques lithosphériques d'une centaine de kilomètres d'épaisseur et où les continents sont enchâssés passivement qui se déplacent les uns par rapport aux autres, mues par les courants de convection mantelliques. Ces déplacements ne correspondent plus à des corps qui se meuvent dans un milieu en repos mais consistent en la création et en la destruction de lithosphère océanique. C'est donc par la dynamique océanique que les continents dérivent. Les plaques, contrairement aux continents de Wegener, forment également un système global où le mouvement de chacune est en interdépendance avec le mouvement de toutes les autres.

La tectonique des plaques et la géologie

La théorie de la tectonique des plaques est très rapidement acceptée par la communauté des géophysiciens car elle leur permet d'interpréter l'ensemble de leurs nouvelles observations. Elle se heurte en revanche à une forte opposition de la part des géologues qui la considèrent avant tout comme une théorie des océans et qui ne reconnaissent pas immédiatement sa fécondité pour comprendre la tectonique continentale. Il est vrai que l'application de la tectonique des plaques à la géologie continentale pose un certain nombre de problèmes et met en évidence les limites de

la nouvelle théorie. Celle-ci a été définie à partir de l'activité tectonique actuelle et sa pertinence pour le passé géologique est beaucoup plus délicate puisque les séismes ne peuvent plus être utilisés et qu'il est bien plus difficile de déterminer la géométrie des plaques et leur mouvement relatif. Les séismes se localisent également sur des bandes qui ne sont pas d'épaisseur négligeable surtout à la frontière entre deux continents et on ne sait pas clairement s'ils délimitent plusieurs frontières entre des petites plaques ou une zone de déformation diffuse. Les plaques n'apparaissent pas non plus parfaitement rigides. En Asie, on observe par exemple des séismes intra-plaques très puissants et des montagnes jeunes en dehors de toute frontière de plaque.

Malgré ces difficultés sérieuses, toutes les oppositions au mobilisme seront progressivement dépassées tant la tectonique des plaques se révélera également un outil fabuleux pour donner sens aux structures géologiques du globe. Dewey et Bird, dans les années 1969-1970, sont les premiers à chercher à définir les caractéristiques de chaque formation géologique et à tenter de les expliquer dans le cadre de la nouvelle tectonique. Suess, à la fin du XIX^e s., avait déjà mis en évidence les différences fondamentales entre les côtes atlantiques et indiennes et les côtes pacifiques. Dewey et Bird expliquent que les côtes atlantiques et indiennes sont des marges continentales passives correspondant à des océans en train de s'ouvrir. La mer Rouge et le golfe d'Aden constituent de leur côté l'illustration d'un jeune océan en expansion. Au contraire, les côtes pacifiques sont des marges actives où la lithosphère océanique subducte sous une autre plaque. Ils remarquent l'existence de deux possibilités principales : soit la subduction à lieu à la limite océan-continent et cela aboutit au type « cordillère » comme pour la côte ouest de l'Amérique du Nord et du Sud ; soit la subduction survient sous une guirlande d'îles séparée du continent par un bassin océanique plus ou moins développé et cela aboutit au type « arc insulaire » comme pour la côte est de l'Asie. Dans les deux cas, les subductions sont associées à une activité sismique intense et à un volcanisme andésitique important. Dewey et Bird affirment encore qu'il existe deux grands styles de chaînes montagneuses, l'un lié aux phénomènes de subduction que l'on vient de voir et l'autre lié aux phénomènes de collision. Les collisions peuvent concerner un continent et un arc insulaire (chaîne de Nouvelle-Guinée) ou d'une manière plus spectaculaire deux continents (les Alpes entre l'Europe et l'Afrique, les montagnes d'Iran entre l'Asie et l'Arabie, l'Himalaya entre l'Asie et l'Inde).

Ce n'est pas tout. Dewey et Bird font une autre remarque extrêmement importante. Si les chaînes actuelles sont le résultat du mouvement des plaques depuis l'éclatement de la Pangée il n'y a aucune raison pour que les chaînes plus anciennes ne se soient pas formées de la même façon. Ils soutiennent ainsi qu'avant la Pangée existait un proto-océan Atlantique qui, en se refermant, a donné naissance à la chaîne calédonienne du Nord-Ouest de l'Europe et aux

Appalaches du Nord-Est de l'Amérique. Les montagnes anciennes seraient donc les témoins d'anciens océans aujourd'hui disparus et indiqueraient une tectonique des plaques antérieures à 200 millions d'années. Comme Wilson l'avait déjà affirmé en 1966, la Pangée ne constituerait qu'un stade intermédiaire dans le mouvement des plaques, et les continents subiraient des ouvertures et des fermetures répétées. Cette conception sera confirmée par la suite par le paléomagnétisme qui, grâce à l'aimantation des roches, permet de déterminer d'une manière approximative le mouvement des continents depuis 500 millions d'années. On considère aujourd'hui que la tectonique des plaques existe au moins depuis deux milliards d'années.

Les travaux de Dewey et de Bird sont essentiels car ils ouvrent une nouvelle perspective pour la géologie et donnent sa pleine mesure à la théorie de la tectonique des plaques. Leur classification des formations géologiques est bien sûr très schématique, leur tectonique continentale rudimentaire, mais ils montrent que la tectonique des plaques peut être un cadre unificateur, un schéma général extrêmement fécond dans lequel les investigations géologiques peuvent être reprises, les faits observés réinterprétés, l'histoire du globe et des continents redécouverte. Ils bouleversent l'approche traditionnelle en montrant qu'il est possible de s'intéresser aux relations causales, aux processus à l'origine des phénomènes, et donc de comprendre ce qui avant était limité à la simple description. Stimulée par ce côté beaucoup plus attrayant, une nouvelle géologie va se développer, riche, vivante, florissante. Il s'agira, en association avec les études chimiques, thermiques et dynamiques, de définir et de comprendre la genèse et l'évolution des différentes structures géologiques de la surface du globe, tant océaniques que continentales.

La tectonique des plaques et la Terre

La tectonique des plaques est née comme une théorie cinématique des mouvements à grande échelle à la surface du globe et apparaît en ce sens comme l'aboutissement des idées mobilistes émises au cours du XX^e s. Les étapes principales de ces idées sont les suivantes : Wegener en 1912, Holmes en 1928, Hess en 1960, Morley, Vine et Matthews en 1963, Vine et Wilson en 1966, et Morgan, McKenzie et Le Pichon en 1967-1968. Mais la richesse de la tectonique des plaques dépasse largement celle d'une simple théorie cinématique. Elle met d'abord en évidence les échanges de matière entre l'intérieur et l'extérieur du globe et la nécessité de l'existence de courants de matière dans le manteau. Et surtout, elle définit un cadre dans lequel les formations géologiques de la surface du globe prennent enfin sens et où les différents phénomènes viennent s'intégrer lumineusement (à l'exception du volcanisme dit de point chaud). Elle permet ainsi une compréhension entièrement renouvelée de la surface du globe en lui redonnant son unité et en révélant une Terre en plein dynamisme, en pleine

évolution. La tectonique des plaques n'est cependant pleinement fructueuse que lorsqu'elle intègre l'ensemble des sciences de la Terre. Elle mérite alors son nom de tectonique globale, non seulement parce qu'elle concerne toute la surface de la planète mais aussi parce qu'elle est le lieu où les différentes disciplines de la Terre peuvent se rencontrer et parce qu'elle permet aux géophysiciens et aux géologues de se rapprocher. Par ces différents aspects, la tectonique des plaques constitue un renversement radical, une reconstruction fondamentale des convictions sur la Terre. Elle représente ainsi une véritable révolution et définit le nouveau paradigme des sciences de la Terre.

Ce bouleversement conceptuel, enfin, a bénéficié de l'impulsion due à une deuxième révolution, pratiquement simultanée, plus diffuse mais également très importante, qui est celle de la planétologie comparée. Les voyages lunaires et les photographies martiennes de la fin des années 1960 et du début des années 1970 montrent des planètes géologiquement très différentes. Cette comparaison d'une planète à l'autre accentue la nécessité d'une approche globale et permet de découvrir ce qui est particulier à la Terre. Ainsi la tectonique des plaques apparaît comme un phénomène extra-ordinaire qui ne se manifeste pas sur les autres corps du système solaire. Une condition nécessaire semble liée à l'état thermique de la planète, qui est lui dépendant de la taille du corps (plus une planète est petite, plus elle s'est refroidie depuis la formation du système solaire). Il faut en effet une certaine température interne pour permettre les mouvements de convection et le volcanisme. Cette condition n'est cependant pas suffisante puisque Vénus, qui a approximativement la même taille que la Terre, ne semble pas posséder de tectonique des plaques. Doit-on en déduire que la température en surface est elle aussi déterminante pour la constitution de plaques rigides (Vénus a en effet une température de surface bien plus élevée que celle de la Terre) ? Quoi qu'il en soit, la tectonique des plaques nécessite des conditions très précises, et si elle est particulière à la Terre, elle pourra aussi ne concerner qu'une période de son histoire...

- ALLEGRE C., *L'écume de la Terre*, Paris, Fayard, 1983.
- DEWEY J.F. & BIRD J., « Mountain belts and the new global tectonics », *J. Geophys. Res.*, 75, 1970, p. 2625-2647.
- DIETZ R.S., « Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor », *Nature*, Londres, 190, 1961, p. 854-857.
- HALLAM A., *Une révolution dans les sciences de la Terre*, Paris, Le Seuil, 1976.
- HESS H.H., « History of ocean basins », in ENGEL A.E.J. et al. éd., *Petrologic studies : a volume in honor of A.F. Buddington*, Boulder, Geological Society of America, 1962, p. 599-620.
- ISACKS B., OLIVER J. & SYKES L.R., « Seismology and the new global tectonics », *J. Geophys. Res.*, 73, 1968, p. 5855-5899.
- LE GRAND H.E., *Drifting continents and shifting theories*, Cambridge, Univ. Press, 1988.
- LE PICHON X., « Sea floor spreading and continental drift », *J. Geophys. Res.*, 73, 1968, p. 3661-3697.
- LE PICHON X., FRANCHETEAU J. & BONNIN J., *Plate tectonics*, Amsterdam/Londres/New York, Elsevier, 1973.
- MCKENZIE D.P. & PARKER R.L., « The north Pacific : an example of tectonics on a sphere », *Nature*, Londres, 216, 1967,

- p. 1276-1279. — MORGAN W.J., « Rises, trenches, great faults and crustal blocks », *J. Geophys. Res.*, 73, 1968, p. 1959-1982.
- UYEDA S., *The new view of the Earth* (1971), rééd., San Francisco, Freeman & Co., 1978.
- VINE F.J. & MATTHEWS D.H., « Magnetic anomalies over oceanic ridges », *Nature*, Londres, 199, 1963, p. 947-949.
- WILSON J.T., « A new class of faults and their bearing on continental drift », *Nature*, Londres, 207, 1965, p. 343-347.

Vincent DEPARIS

→ Courant de convection ; Dérive des continents ; Expansion terrestre ; Orogenèse ; Wegener.

TEILHARD DE CHARDIN Pierre, 1881-1955

Géologue et paléontologue français, théologien et membre de la Compagnie de Jésus. L'entrée officielle de Teilhard de Chardin dans la carrière scientifique se fit un jour de juillet 1912 où il vint frapper à la porte du directeur du laboratoire de paléontologie au Muséum national d'histoire naturelle, Marcellin Boule (1861-1942). Boule avait acquis une grande renommée entre 1888 et l'année 1908, où il a donné la description de l'homme néandertalien de La Chapelle-aux-Saints. Continuateur d'Albert Gaudry (1827-1908), enthousiaste lecteur de Darwin, introducteur de la théorie de l'évolution en paléontologie, admirateur de Cuvier, Boule se fonda sur les découvertes de nombreuses formes intermédiaires pour lever l'objection fixiste de celui-ci. On voit bien que les principes de Boule domineront la pratique paléontologique de Teilhard.

Teilhard arpenta la planète de la Chine à l'Amérique en passant par l'Afrique de 1923 à 1955. Il participa à la découverte du Sinanthrope et à la « Croisière jaune ». Dans sa période de formation religieuse, il fera part, à son directeur de conscience, du conflit qu'il ressentait entre sa vocation sacerdotale et sa carrière scientifique. Le même attrait subsiste et suscite un conflit, paradoxalement pascalien, entre la science et la religion. Mais, alors que Pascal assume l'alternative permanente et tragique, Teilhard cherche à surmonter le conflit qui demeure dans son esprit. Raison pour laquelle il pensera l'évolution non pas comme une théorie des vivants mais comme « conscience d'une dérive profonde, ontologique, totale de l'univers autour de soi » (*Œuvres*, t. 13, p. 33). Elle sera chargée d'une mission beaucoup plus haute qu'une loi de succession ou de filiation des espèces. Teilhard proteste contre tout abaissement de la matière (« ma divine Matière », *Œuvres*, t. 13, p. 34) au profit d'un Esprit désincarné qui n'est « plus qu'une ombre ». À ses yeux, l'évolution lève la contradiction entre deux formes d'être qui étaient présentées comme étrangères l'une à l'autre. L'évolution fut donc pour lui au départ non une théorie mais une vision. Cette vision, pour « illuminative » qu'elle soit, est cependant liée à sa pratique géologique (« [...] quand les forêts du Sussex se chargeaient, eût-on dit, de toute la vie "fossile" que je poursuivais alors, de falaises en carrières, dans les argiles wealdiennes », t. 13, p. 34). Le monde lui paraît

se mettre en marche, sous son regard qui concentre dans l'instant les ères millénaires, de la matière informe jusqu'au surgissement de la réflexion dans la matière infiniment complexe du cerveau humain. Il voit cette matière se « spiritualiser » par « centration » de plus en plus complexe des atomes, puis des molécules, puis des cellules et des formes vivantes jusqu'à l'homme. La science, la philosophie nouvelle qu'il entrevoit, l'atmosphère religieuse et poétique qu'il enveloppe, tous ces éléments participeront d'une intuition globale dans ses premières œuvres. Il faudra à Teilhard quarante ans pour vérifier au niveau scientifique, développer au niveau qu'il appelle « phénoménologique », méditer et vivre au niveau de sa croyance la découverte de sa jeunesse. L'évolution a dénoué les incompatibles et Pierre Teilhard de Chardin a transposé la religion des pierres et du métal en une Odyssée de la transformation progressive de la matière où l'esprit va, pour lui, opérer jusqu'à révéler la « puissance spirituelle » de cette matière. Elle sera la création divine qui, sous nos yeux, se continue. Lorsqu'il part en Chine, il a déjà fait un très grand voyage qui l'a conduit à ce que les croyants considèrent comme une illumination mystique, où d'autres voient une « entreprise béante et hallucinée » tirant de sa science des « conclusions aventurées »... (Louis Althusser, *Philosophie et philosophie spontanée des savants*, 1967, rééd., Paris, Maspero, 1974, p. 84).

En 1941 son ouvrage *Le phénomène humain* est envoyé à Rome. La réponse est donnée en 1944 : inopportun ! En 1947, il reçoit de son supérieur général l'ordre de mettre fin à la circulation des textes. Il se soumet sans infléchir ce qu'il pense puis entreprend une nouvelle révision du *Phénomène*. Après révision, le recteur de l'Institut catholique de Toulouse présente son œuvre sous le titre *La pensée chrétienne face à l'évolution*. Il affirme que Teilhard était parvenu à une synthèse « qui n'a rien qui puisse mettre en péril le dogme chrétien ». Tout le monde croit à la fin de ses difficultés lorsqu'il est appelé à Rome. Nouvelle révision du *Phénomène*. C'est alors qu'arrive à Paris l'interdiction d'accepter une chaire au Collège de France et de faire des conférences publiques. Teilhard de Chardin se met à rédiger un ouvrage extrêmement dépeuplé, *Le groupe zoologique humain*, dénommé plus tard *La place de l'homme dans la nature*. La publication en sera interdite et la Compagnie de Jésus lui ordonnera de quitter Paris.

L'encyclique *Humani generis* de 1950 réprovoque les témérités en matière philosophique et théologique et vise, entre autres, Teilhard de Chardin. Mais c'est le premier document pontifical qui autorise « les savants catholiques à admettre la probabilité de la création du premier homme à partir d'une matière préexistante et vivante c'est-à-dire à professer un évolutionnisme spiritueliste ». Cet évolutionnisme spiritueliste, idéologie qui ne peut que freiner la progression de la rigueur, diront de nombreux penseurs, fut pourtant le prix d'un combat, et permit aux scientifiques croyants de prendre un nouvel élan.

De son vivant Teilhard de Chardin a publié près de 200 textes scientifiques (thèses, mémoires, articles, contributions à des colloques). Son œuvre est tout entière posthume. Elle est rassemblée in *Œuvres*, Paris, Le Seuil, 13 vol. – *Le phénomène humain* (1955), *L'apparition de l'homme* (1956), *La vision du passé* (1957), *Le milieu divin. Essai de vie intérieure* (1957), *L'avenir de l'homme* (1959), *L'énergie humaine* (1962), *L'activation de l'énergie* (1963), *La place de l'homme dans la nature* (1963), *Comment je crois* (1969), *Les directions de l'avenir* (1972), *Écrits du temps de guerre, 1916-1919* (1965), *Le cœur de la matière* (1976). – De ses correspondances signalons *Lettres de voyages*, Paris, Grasset, 1965 ; *Genèse d'une pensée*, Paris, Grasset, 1961 ; *Lettres d'Égypte*, Paris, Aubier, 1963 ; *Accomplir l'homme*, Paris, Grasset, 1968.

► BARTHÉLEMY-MADAULE M., *Bergson et Teilhard de Chardin*, Paris, Le Seuil, 1963 ; *La personne et le drame humain chez Teilhard de Chardin*, Paris, Le Seuil, 1967. – LEROY P. & BARJON L., *La carrière scientifique de Teilhard de Chardin*, Monaco, Le Rocher, 1964. – OINCE R. D., *Un prophète en procès*, Paris, Aubier, 2 vol., 1970. – SPEAIGHT R., *La vie de Teilhard de Chardin*, Paris, Le Seuil, 1970.

Madeleine BARTHÉLEMY-MADAULE

→ Espèce ; Évolutionnisme ; Fossile.

TÉLÉOLOGIE

BIOLOGIE

Philosophie générale

Le terme a été formé à l'aide de deux mots grecs, *télos*, la fin, et *logos*, le discours. Ce terme est attribué en général à Christian Wolff, dans sa *Philosophia rationalis sive logica* (§ 85). Il désigne de façon générale la prise en considération du but tenu pour déterminant dans la séquence des événements et l'agencement global des phénomènes, ou encore l'étude systématique de la finalité dans les êtres ou plus généralement dans la nature. La téléologie a souvent été dénoncée comme une représentation anthropomorphe inspirée par l'analyse de l'activité humaine. Elle a suscité d'incessants débats sur sa complémentarité avec le mécanisme dans l'explication et la compréhension des phénomènes, en particulier en biologie.

La description aristotélicienne des causes incluait celle de cause finale, ou projection d'un but à atteindre (*télos*) dans l'avenir et s'appliquait aussi bien au développement de l'œuf qu'au devenir du monde tout entier. Notion tirée de l'analyse de l'activité artistique et esthétique, elle a été d'abord synonyme de représentation consciente et rationnelle, caractéristique d'une intelligence et comme telle attribuée à la divinité créatrice. Elle a pu ensuite être appliquée à des objets suggérant par l'agencement des parties la recherche d'un effet, et finalement à l'ensemble des phénomènes, en particulier des phénomènes vivants, sur l'argument que la référence à la finalité permettait de mieux comprendre, sinon de mieux connaître, les mécanismes qui concouraient à la convergence des parties vers un

but, et témoignaient de l'harmonie dans le fonctionnement de la nature.

Bacon et Descartes ont voulu rejeter ce qu'ils considéraient comme un abus de langage. C'est Emmanuel Kant qui, à égale distance du finalisme de Leibniz (le monde est le meilleur des systèmes possibles) et de l'agnosticisme de Descartes (fondant une physique et une physiologie sur le mécanisme en excluant la considération de fins dans la matière), a admis une « téléologie de la nature », c'est-à-dire l'idée d'une totalité ordonnée à des fins. Mais il s'agit pour lui d'une idée régulatrice et non constitutive, liée à la faculté de juger et non à l'entendement, ce qui exclut de lui faire correspondre une expérience dans les formes habituelles de l'espace et du temps et de fonder sur elle des lois universelles. Une idée régulatrice correspond à une source d'inspiration et de compréhension, elle n'autorise pas l'énoncé de lois régissant les phénomènes et encore moins l'universalisation de ces lois. En d'autres termes, et pour reprendre un exemple kantien dans la *Critique de la faculté de juger*, dire que la nature a créé nos yeux pour voir est dépasser ce qu'il nous est autorisé d'affirmer. En revanche, il est évident que la structure des yeux a quelque chose à voir avec la vision, et ce serait folie de se passer dans les sciences naturelles de ce rapport manifeste des phénomènes avec une fin extérieure, qui facilite leur intelligibilité.

Usages de la téléologie

Au XIX^e s., le mode d'explication téléologique est fréquemment invoqué en biologie : de nombreux mécanismes physiologiques semblent subordonnés à l'atteinte d'un but, comme le maintien du milieu intérieur chez Claude Bernard ou l'homéostasie pour Cannon.

En dépit des difficultés logiques à les fonder en raison, beaucoup de biologistes soutiennent aujourd'hui que les jugements téléologiques expriment quelque chose d'important qui serait perdu si on essayait d'éliminer du langage toute référence à la finalité (Mayr, 1982). Des philosophes comme Nagel ou Hull reconnaissent également une certaine légitimité aux jugements téléologiques, mais ne sont pas d'accord sur le sens de ce dernier terme, ni sur les relations précises entre téléologie et causalité. Par exemple David Hull considère que Darwin a débarrassé la biologie de la téléologie en proposant le mécanisme de la sélection naturelle ; d'autres philosophes considèrent au contraire qu'il a réintroduit la poursuite des fins dans le monde vivant en dotant la nature d'une volonté de sélectionner. Commodité de langage ou procédé heuristique ? Le débat reste ouvert.

Pour se débarrasser des connotations théologiques, les biologistes contemporains ont introduit de nouveaux concepts et de nouveaux mots, en tirant parti du développement de la cybernétique et de l'apparition de nouveaux automates simulant de façon plus satisfaisante les performances des organismes naturels. C'est désormais la machine et non plus l'organisme qui est le

modèle dominant, et l'influence des théories de l'information (notion de programme, de code...) est décisive. Ce nouveau langage téléologique présenterait les avantages épistémologiques de la téléologie sans ses inconvénients métaphysiques. Jacques Monod a proposé de substituer au terme de téléologie celui de téléonomie, emprunté à A. Roe et C.G. Simpson (*Behaviour and Evolution*, 1965). Il renvoyait dos à dos tous les partisans de la finalité, qu'elle soit l'expression d'une fin transcendante (divine) ou immanente au cours de l'histoire (matérialisme dialectique). Le nouveau terme avait l'avantage de remplacer la référence au discours par l'évocation de la loi, ce qui visait à inclure la téléologie dans le champ scientifique. Monod se faisait le champion de ce concept nouveau dans *Le hasard et la nécessité* (1970), au moment où la biologie moléculaire permettait d'envisager un nouveau niveau de description des phénomènes. Monod était persuadé que l'essor de la biologie moléculaire apporterait à la biologie l'unité conceptuelle qui selon lui faisait défaut. La biologie moléculaire était bien le « Huitième jour de la Création », selon le titre de Horace Freeman Judson (*The Eighth Day of Creation*, 1979), assimilant la découverte du code génétique à la révélation d'un chapitre additionnel de la Genèse.

L'ouvrage eut un énorme succès parce qu'il mettait à la disposition du public les récents acquis de la biologie moléculaire et en particulier de la génétique, tout en s'efforçant d'en tirer les conséquences épistémologiques, philosophiques et même morales et politiques. L'apport de la biologie moléculaire imposait en effet le réexamen de l'hypothèse darwinienne sur la sélection naturelle, sur la base des mécanismes moléculaires perçus comme jouant un rôle dans la régulation, comme les modifications structurales de certaines protéines en fonction du milieu (allostérie) ou le rôle des acides nucléiques dans la formation des protéines et la régulation de cette dernière.

Pour bien montrer que l'introduction des considérations téléonomiques n'impliquait aucun retour à la finalité, Monod donnait l'exemple de l'« induction gratuite » : il s'agit du déclenchement d'une activité enzymatique par une molécule qui ne saurait être substrat, donc ne présente aucun « intérêt » à la réaction. Il reprenait ce terme de gratuité dans un autre contexte, celui des interactions structurales entre les composantes d'une macromolécule, appelées allostérie. L'hémoglobine qui modifie sa structure selon qu'elle a fixé ou non l'oxygène sous une forme donnée est un exemple d'allostérie, importante dans les phénomènes de respiration cellulaire. Pour Monod, le rôle des protéines allostériques était d'établir un couplage entre des voies métaboliques chimiquement indépendantes. Ces interactions étaient gratuites, parce que faisant intervenir des énergies très faibles, elles étaient réversibles, mais surtout parce qu'elles n'avaient rien à voir avec la structure, la réactivité, et l'affinité des corps entre lesquels la protéine établissait une réaction. L'allostérie était un phénomène structural « dicté en toute liberté par l'ADN » (*Le hasard et la nécessité*, p. 20).

L'ADN était bien le nouveau dieu, l'ADONAI évoqué par certains, en attendant le jeu de mots de l'immunologiste Melvin Cohn, sur GOD, le générateur de la diversité (*generator of diversity*), à propos de l'origine du répertoire des anticorps.

« Gratuit » renvoie à l'absence de sens et l'impossibilité d'un projet véritable reliant les protéines allostériques aux molécules qui peuvent se fixer sur elles. On frôlait l'absurde, thème philosophique de l'après-guerre : « Quel idéal proposer aux hommes d'aujourd'hui qui soit au-dessus et au-delà d'eux-mêmes, sinon la reconquête par la connaissance du néant qu'ils ont eux-mêmes découvert » (Monod, *Leçon au Collège de France*, 1967, p. 31).

Monod, pour caractériser l'être vivant, associait la téléonomie à l'invariance ou capacité de transmettre sa propre structure, les premières étant incarnées dans les protéines, et la seconde dans les acides nucléiques. Il écrivait peu de temps après l'élucidation du code génétique orientant la séquence des protéines sur la base de triplets (trois paires de bases), de façon relativement rigide et stable d'une espèce à l'autre (suivant le fameux aphorisme que ce qui est bon pour Coli l'est aussi pour l'éléphant). Comme il était à prévoir, le mouvement des idées en biologie moléculaire n'a pas confirmé cette dualité de rôles attribuée aux protéines et aux acides nucléiques, entre lesquels le partage des rôles est loin aujourd'hui d'avoir la belle simplicité imaginée jadis par l'auteur du *Hasard et la nécessité* : la variation s'est introduite dans les gènes, modifiables sous l'effet de multiples mécanismes (conversion interne, recombinaison...), comme dans le cas des gènes des anticorps, admettant l'intégration de matériaux extérieurs d'origine virale par exemple... D'autre part, certaines protéines pourraient jouir de propriétés d'autoreproductibilité les assimilant à des gènes ou à des particules infectieuses : le débat sur le statut de nouvelles entités comme les prions, agents pathogènes des encéphalites avec destruction du tissu nerveux (maladie dite des vaches folles ou encéphalite chronique démyélinisante), est trop loin d'être résolu pour qu'on en tire toutes les conséquences épistémologiques, et biologiques.

Critique de la téléonomie

La critique est venue moins des philosophes que des biologistes. La plus insolite de ces critiques est peut-être venue de celui qui partageait le plus l'émerveillement de Monod pour l'« âge d'or » de la biologie moléculaire, Gunther Stent. Tout en reconnaissant le primat du « postulat d'objectivité » ou l'obligation de ne faire intervenir dans le texte que des constats expérimentaux dûment établis, il admettait que les considérations de finalité ou la téléologie au sens large avaient eu dans le passé un pouvoir heuristique : la projection de la finalité sur les phénomènes nous a permis de prêter aux objets des relations de causalité reflétant notre propre expérience subjective de la causalité. En revanche, il se proclamait partisan du silence que

Pascal prêtait à la nature : « Le silence de ces espaces infinis m'effraie. »

Le biologiste et philosophe Waddington ironisait sur la tentative de donner congé à la finalité et de n'introduire que des arguments rigoureux expérimentaux dans les textes de biologie. Waddington s'appuyait sur l'histoire de la génétique pour démontrer que l'environnement intervient indirectement sur les gènes : en effet, la sélection naturelle joue un rôle considérable en agissant sur les phénotypes qui, confrontés à l'environnement, démontrent leurs qualités adaptatives et concourent ainsi à l'évolution du pool de gènes par leur comportement reproductif. La finalité ainsi comprise exclut la gratuité qui reviendrait à traiter de biologie dans un esprit de dérision.

L'attaque de Waddington porte sur la façon dont Monod prétend se débarrasser de la téléologie en définissant fautivement à la fois hasard et nécessité. Les gènes ne sont pas isolables des organismes dans lesquels ils s'expriment, ils dépendent au cours de leur sélection de cette expression dans des systèmes vivants, et la sélection ne dépend pas purement des gènes, mais du degré de « fitness » ou d'adaptation des organismes à l'environnement.

Le généticien et philosophe américain Théodore Dobzhansky a préféré, plutôt qu'adopter le terme téléonomie, distinguer la téléologie externe, ou but imposé par une activité humaine, de la téléologie interne s'imposant après examen d'une structure biologique. Il n'est pas possible de repérer dans l'évolution une téléologie externe, mais, par contre, il est possible de comprendre les mécanismes de mutation comme fournissant une gamme de phénotypes diversement adaptés au milieu, entre lesquels pourra s'opérer une sélection naturelle. Dobzhansky mettait l'accent sur l'énorme diversité des génotypes. Mutants et recombinants finissent par former un système cybernétique qui manifeste une téléologie interne, autrement dit une certaine harmonie entre une espèce vivante et son environnement. Il minimisait le rôle du hasard, invoqué par Monod pour équilibrer le déterminisme rigoureux qu'il baptisait nécessité, et se refusait à présenter hasard et nécessité comme deux aspects distincts de la nature. Dobzhansky considérait que la sélection naturelle les associe intimement et définitivement en un système d'une créativité unique.

► BARNARD F.M., « Accounting for action : causality and teleology », *History and Theory, Studies in the Philosophy of History*, 20, n° 3, 1981, p. 291-312. — CANGUILHEM G., *A Vital Rationalist*, éd. F. Delaporte, New York, Zone Books, 1978. — CANNON N.B., *The wisdom of the body*, New York, 1932. — LENOIR T., « Kant, Von Bauer und das kausal-historische Denken in der Biologie », *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, 8, n° 2, 1985, p. 99-114. — LWOFF A., *L'ordre biologique*, Paris, R. Laffont, 1969. — MAYR E., « Teleological and teleonomic, a new analysis », *Boston Studies in the Philosophy of Science*, 24, 1972, p. 91-114. — MONOD J., *Le hasard et la nécessité, Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Paris, Le Seuil, 1970. — PETITOT J. dir., *Logos et théorie des catastrophes (à partir de l'œuvre de René Thom)*, Actes du colloque international, Genève, 1988-1989. — PRIGOGINE I. &

STENGERS I., *La nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard, 1979. — ROE A. & SIMPSON G., *Behavior and Evolution*, New Haven, Yale Univ. Press. — ROSENBLUETH, WIENER N. & BIGELOW J., « Behavior, purpose and teleology », *Philosophy of Science*, 1943, X. — RUSE M., « Teleology redux », *Boston Studies in the Philosophy of Science*, 1980, 67 (Scientific philosophy today, Essays in honor of Mario Bunge), p. 299-309. — RUYER R., *La cybernétique et l'origine de l'information*, Paris, Flammarion, 1954. — SERRES M., « Ce qui est écrit dans le code », *Critique*, 28, 1971, p. 579-606. — SHORT T.L., « Teleology in Nature », *American Philosophical Quarterly*, 20, n° 4, 1983, p. 311-320. — STENT G., « An ode to objectivity. Does God play at dice? », *Atlantic Monthly*, 1971. — TOULMIN S., « Teleology in contemporary science and philosophy », *Neue Hefte für Philosophie*, n° 20, 1981, p. 140-152.

Anne Marie MOULIN

→ Évolutionnisme ; Génétique ; Information ; Marx et Darwin ; Monod ; Sélection.

TEMPS

PHYSIQUE

Par quelque bout qu'on le prenne, le temps est aporétique. En dépit de son allure familière, il suscite des impasses et des paradoxes de toute sorte, dont le nombre grandit avec la pénétration du regard. La première difficulté, repérée déjà par saint Augustin, est que le mot temps ne dit pratiquement rien de la chose qu'il est censé exprimer. Ce terme désigne en apparence l'objet d'un savoir et d'une expérience immédiats, mais il se perd dans les brumes dès qu'on veut en saisir le contenu. Bien sûr, on peut toujours tenter de définir le temps : dire qu'il est ce qui passe quand rien ne se passe ; qu'il est ce qui fait que tout se fait ou se défait ; qu'il est l'ordre des choses qui se succèdent ; qu'il est le devenir en train de devenir ; ou, plus plaisamment, qu'il est le moyen le plus commode qu'a trouvé la nature pour que tout ne se passe pas d'un seul coup. Mais toutes ces expressions présupposent ou contiennent déjà l'idée du temps. Elles n'en constituent donc pas de véritables définitions, mais sont plutôt des métaphores, impuissantes à rendre compte de la véritable intégrité du temps. Le temps est en quelque sorte innommable. Mais comment parler de ce que les mots ne saisissent pas ?

Une deuxième difficulté vient de ce que nous ne pouvons pas nous mettre en retrait par rapport au temps, comme nous ferions pour un objet ordinaire. Nous pouvons le mesurer, mais pas l'observer en le mettant à distance, car il nous affecte sans cesse. Nous sommes inexorablement dans le temps. Une troisième difficulté vient de ce que le temps n'est une « matière » à aucun de nos cinq sens. Il n'est pas perceptible en tant que phénomène brut. Les expériences des spéléonautes, ces hommes (et ces femmes) qui ont vécu plusieurs mois dans des grottes ou des bunkers, coupés de tous les cycles temporels externes et donc livrés à leurs seuls rythmes biologiques, ont bien établi

l'impossibilité de palper l'épaisseur du temps lorsque tous les repères extérieurs ont disparu.

Enfin, il y a le paradoxe, et même le prodige, de la réalité du temps. Puisque le passé n'est plus, que l'avenir n'est pas encore, puisque le présent lui-même a déjà fini d'être dès qu'il est sur le point de commencer, comment pourrait-on concevoir un être du temps ? De fait, le temps est toujours disparaissant, comme si son mode d'être était précisément de... ne pas être. « Il ne se montre que nié », écrit Marcel Conche (1992). Pourtant, penser que le temps n'est rien serait du même coup nier la globalité de notre expérience humaine. Nous voilà donc conduits dans une impasse, redoublable : pas plus que nous ne pouvons concevoir l'existence du temps, pas plus n'en pouvons-nous concevoir l'inexistence. Le temps ne serait-il qu'un frisson ontologique ?

Il y a au moins deux sortes de temps : le temps physique, celui des horloges, et le temps subjectif, celui de la conscience. Le premier est censé ne pas dépendre de nous, il est réputé uniforme et nous savons le chronométrer. Le second, le temps que l'on mesure de l'intérieur de soi, dépend évidemment de nous et ne s'écoule pas uniformément : sa fluidité est même si variable que la notion de durée éprouvée n'a qu'une consistance très relative. Il n'y a vraisemblablement pas deux personnes qui, dans un temps donné, comptent un nombre égal d'instant. Notre estimation des durées varie notablement avec l'âge, et surtout avec la signification et l'intensité des événements qui se produisent.

L'irréductibilité de ces deux sortes de temps semble insurmontable. Les tentatives pour dériver le temps du « monde » du temps de « l'âme » ou celui-ci de celui-là paraissent indéfiniment condamnées à l'échec. Cette aporie apparaît déjà autour de la structure du présent, fracturée entre deux modalités : l'instant ponctuel, réduit à une coupure entre un avant et un après illimités, et le présent vivant, gros d'un passé immédiat et d'un futur imminent. Aucune de nos sensations n'indique l'alchimie par laquelle une succession d'instantanés parvient à s'épaissir en durée.

Les scientifiques de toute discipline sont confrontés au temps, notamment les physiciens. Il peut sembler curieux d'associer le temps et la physique. Celle-ci cherche en effet, sans se l'avouer toujours, à éliminer le temps. Le temps est associé au variable, à l'instable, à l'éphémère, tandis que la physique, elle, est à la recherche de rapports qui soient soustraits au changement. Lors même qu'elle s'applique à des processus qui ont une histoire ou une évolution, c'est pour y discerner soit des substances et des formes, soit des lois et des règles indépendantes du temps. Dans son désir d'accéder à un point de vue quasi divin sur la nature, la physique prétend à l'immuable et à l'invariant. Mais dans sa pratique, elle se heurte au temps. Reprenons la métaphore classique comparant le temps à un fleuve qui coule. Elle évoque les notions d'écoulement, de durée, d'irréversibilité. Ces symboles font partie du questionnement des physiciens. Est-il question d'écoulement ? Les physiciens se demandent si l'écoulement

du temps est élastique ou non. La physique classique, sur ce point, ne répond pas comme la relativité. Est-il question de durée ? Les cosmologistes, quant à eux, aimeraient savoir si le temps a, telle une corde, des extrémités : y a-t-il un début et une fin du temps ? Enfin, à l'instar du fleuve, le temps a un cours : il s'écoule inexorablement du passé vers l'avenir. Mais qu'en est-il des phénomènes qui se déroulent dans le temps ? Leur sens peut-il ou non s'inverser ? C'est la question de la réversibilité — ou de l'irréversibilité — des lois physiques.

Le temps s'incarne en physique sous la forme d'un nombre réel, le paramètre *t*. Il n'a donc qu'une dimension (un seul nombre suffit à déterminer une date) et on peut fixer sa direction d'écoulement (il est orientable). Une telle figuration du temps postule implicitement qu'il n'y a qu'un temps à la fois et que ce temps est continu. Elle s'appuie sur notre expérience intérieure la plus sûre, qui nous présente parfois des événements qui se chevauchent, mais jamais de lacunes : il ne cesse jamais d'y avoir du temps qui passe. Contrairement à celle de l'espace, la topologie du temps est très pauvre. Elle n'offre que deux variantes, la ligne ou le cercle, c'est-à-dire le temps linéaire, qui va de l'avant, ou le temps cyclique, qui fait des boucles. Ce dernier, favorisé par le caractère magique du cercle, a prévalu dans de nombreux mythes mais il a été délaissé par la physique parce qu'il ne respecte pas le principe de causalité. Ce principe, indiquant qu'une cause ne peut qu'être antérieure à ses effets, impose au temps d'avoir une structure ordonnée de façon à ce qu'on puisse toujours dire si un point se situe avant ou après un autre point. Les événements peuvent alors être ordonnés selon un enchaînement irréversible, de sorte qu'on ne peut rétroagir dans le passé pour modifier une séquence d'événements qui ont déjà eu lieu. Parce qu'il brouille les notions de cause et d'effet, un temps cyclique n'offrirait pas de telles garanties.

On trouve le paramètre représentant le temps dans toutes les équations de la physique. Cette omniprésence n'est-elle pas incongrue dans la mesure où la physique, comme nous l'avons dit, tend à nier le temps en faisant appel à des « idéaux immobiles » ? Pour répondre à cette question, il faudrait examiner comment le concept d'histoire, qui suppose que le monde se modifie au cours du temps, est lié à celui de loi, qui évoque au contraire l'immuabilité. Le monde doit-il être vu comme un système ou comme une histoire ? La physique d'aujourd'hui demeure écartelée entre deux piliers de la pensée grecque : d'un côté Parménide, le philosophe de l'Être et de l'immobilité fondamentale ; de l'autre, Héraclite, le philosophe du devenir et de la mouvance. Ce vieux débat n'a cessé d'opposer, au travers des âges, deux camps : d'un côté celui qui comprend Newton et Einstein, partisans d'une éradication du temps en physique ; de l'autre, celui qui compte des physiciens persuadés que l'irréversibilité est en fait présente à toutes les échelles de la physique, mais qu'on a eu tort de l'oublier. La physique a-t-elle

voation à décrire l'immuable ou bien doit-elle être la législation des métamorphoses ?

On peut aussi se demander si cette omniprésence du temps est la marque d'une universalité ou bien si elle reflète une juxtaposition de statuts particuliers. Tous ces temps qui apparaissent dans les équations sont-ils identiques ou bien distincts ? Le temps de la thermodynamique est-il le même que celui de la mécanique ou de la cosmologie ? Examinons ces questions à la lumière du problème de l'irréversibilité.

Le temps subjectif a manifestement une structure dissymétrique. Le passé nous semble écrit, figé. Nous pouvons certes nous souvenir de lui mais nous ne pouvons plus le sentir passer. Quant au futur, si tendue que soit notre volonté, il nous paraît incertain, sans attache solide avec le réel, *a priori* multiple. Dans la vie courante, passé et futur ne sont pas équivalents.

Qu'en est-il de la réversibilité des phénomènes physiques ? Font-ils eux aussi la distinction entre le passé et l'avenir ? Les développements modernes de la physique ont compliqué à la fois cette question et les réponses qu'on lui donne. Il faut dire que le statut du temps n'a cessé de changer. À ses débuts, la physique a élaboré un concept de temps censé représenter (avec l'espace) le cadre naturel dans lequel les phénomènes se produisent. Plus tard, les nécessités mêmes de la physique amèneront, notamment avec la théorie de la relativité et la cosmologie, à un renversement de point de vue, en faisant voir que le temps et l'espace ne sont pas le contenant ou la forme des phénomènes, mais que ce sont au contraire les phénomènes physiques eux-mêmes qui les définissent et les déterminent.

C'est avec Galilée qu'est apparu pour la première fois le temps comme grandeur physique fondamentale. Il étudiait la chute des corps par l'utilisation très astucieuse de plans inclinés. Il réalisa que si le temps, plutôt que par exemple l'espace parcouru, était choisi comme le paramètre fondamental, alors la chute des corps obéissait à une loi simple : la vitesse acquise est simplement proportionnelle à la durée de la chute. La dynamique moderne était née.

Newton, le premier, donna dans ses *Principia* une définition du temps de la mécanique : le temps s'écoule uniformément, il est universel et absolu. Cette conception sous-tend, avec une efficacité remarquable, les principes de sa mécanique. Le mouvement des corps dans l'espace est décrit en donnant leurs positions à des instants successifs. Dans les calculs de trajectoires, le temps apparaît comme un paramètre externe de la dynamique, dont Newton a postulé qu'il s'écoule du passé vers le futur, selon un cours invariable. Mais, curieusement, les équations de Newton sont telles qu'on peut explorer avec les mêmes méthodes mathématiques le passé et l'avenir. En effet, lorsqu'on inverse le sens du temps, la loi fondamentale de la dynamique reste invariante. À toute évolution du passé vers l'avenir, elle associe l'existence d'une évolution symétrique de l'avenir vers le passé. Autrement dit, tout ce que la nature fait, elle pourrait le défaire selon le même processus. Les phénomènes newtoniens, dans

les cas idéaux où il n'y a pas de frottement, sont donc réversibles. Le temps de Newton ne crée pas, il ne détruit pas non plus. Il ne fait que battre la mesure et baliser les trajectoires. Il coule identiquement à lui-même, imperturbablement. C'est un temps indifférent, sans qualité, sans accident, qui rend équivalents entre eux tous les instants. Plus tard, prenant acte de cette dissociation newtonienne entre le cadre spatio-temporel des événements et les événements eux-mêmes, Emmanuel Kant fera du temps et de l'espace les formes *a priori* de la sensibilité, celles qui conditionnent justement la possibilité de la connaissance des phénomènes.

La réversibilité des lois newtoniennes a été ressentie comme un scandale par plusieurs savants du XIX^e s., notamment Ludwig Boltzmann, Willard Gibbs, Ernst Zermelo, Joseph Loschmidt, et plus récemment Ilya Prigogine. La grande majorité des événements dont nous sommes témoins ne sont-ils pas irréversibles ? En général, lorsqu'un film est projeté à l'envers (ce qui revient à inverser le cours du temps), nous nous en rendons compte immédiatement, et cela nous fait presque toujours rire.

Mais comment rendre compte de cette irréversibilité par les lois physiques ? Au début du XIX^e s., Sadi Carnot démontra que la transformation de la chaleur en énergie mécanique était limitée par le sens unique dans lequel s'effectuent les transferts de chaleur (du chaud vers le froid uniquement), comme si la chaleur portait en elle une qualité spéciale en rapport avec l'irréversibilité. Ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, publiées en 1824, contiennent les prémices du deuxième principe de la thermodynamique, énoncé sous sa forme définitive par Rudolph Clausius en 1865. Cette loi postule d'abord l'existence, pour tout système physique, d'une grandeur appelée entropie, fixée par l'état physique du système, et qui représente le degré de désordre présent dans le système. Le deuxième principe indique ensuite que la quantité d'entropie contenue dans un système isolé ne peut que croître lors d'un quelconque événement physique. C'est bien parce que l'entropie totale d'un morceau de sucre et d'une tasse de café non sucré est inférieure à l'entropie d'une tasse de café sucré que le morceau de sucre n'a pas d'autre choix que de se dissoudre dans la tasse. Ce phénomène est irréversible : le sucre en train de fondre au fond de la tasse de café ne reprendra jamais sa forme parallélépipédique ni d'ailleurs sa blancheur. Le deuxième principe semble bien s'accorder avec notre sensation d'une direction bien établie du sens des phénomènes. Du moins à première vue...

Car, comme toujours, il faut regarder les choses de plus près. Parmi les équations de la physique, il y a celles qui sont fondamentales, au sens où elles rendent compte des comportements de base de la matière. On les qualifie de microscopiques, car elles concernent essentiellement les « briques élémentaires » à partir desquelles la matière sous toutes ses formes est censée se construire. Le point important ici est que toutes les

équations microscopiques de la physique sont réversibles : lorsque l'on y fait s'écouler la variable temps dans un certain sens, par exemple vers le futur, les équations décrivent un certain mouvement des particules ; si l'on fait s'écouler la variable temps dans l'autre sens, le mouvement calculé est le même que précédemment, mais décrit en sens inverse. Aucun de ces deux mouvements ne peut être dit plus physique ou moins physique que l'autre. C'est pour cela que l'on dit que les équations microscopiques sont réversibles. Mais à côté de ces équations microscopiques, il y en a d'autres, qui résument un comportement plus global de la matière. Ces équations, dites macroscopiques, décrivent des phénomènes qui se produisent à une échelle proche de la nôtre. Elles sont irréversibles. Par exemple, l'équation de la chaleur établie par Joseph Fourier en 1811 indique que celle-ci ne peut circuler qu'en sens unique, du chaud vers le froid, et non l'inverse.

Si l'on admet qu'un comportement global n'est jamais que l'assemblage d'un grand nombre d'événements élémentaires, alors les équations macroscopiques devraient pouvoir être déduites des équations microscopiques. Pourtant, les unes sont réversibles, les autres non. Par quoi raccorder les deux bouts de la chaîne ? Comment comprendre l'existence même de l'entropie, fonction dissymétrique par rapport au temps de l'état macroscopique du système, alors que l'on sait que l'évolution microscopique du matériau est symétrique ? Voulant approfondir cette question, Ludwig Boltzmann tenta de trouver un lien entre la mécanique newtonienne et le second principe de la thermodynamique. Comme il est impossible d'intégrer rigoureusement les comportements d'un très grand nombre de particules, Boltzmann eut recours aux lois de la statistique, abandonnant le calcul explicite des trajectoires pour celui des probabilités. Il constata en 1872 qu'on pouvait construire une grandeur mathématique appelée *H*, fonction des positions et des vitesses des molécules du gaz, ayant une propriété remarquable : sous l'influence des collisions entre les molécules, elle ne peut que diminuer au cours de l'évolution vers l'équilibre, ou rester constante si le gaz est déjà à l'équilibre (auquel cas tout se passe comme si le temps ne s'écoulait plus). Elle est donc, au signe près, l'analogue de l'entropie. Ainsi, l'agrégation statistique des équations réversibles de la dynamique des particules conduit-elle à une équation macroscopique irréversible. Cela conduisit Boltzmann à interpréter l'irréversibilité comme résultant d'une évolution d'un macro-état peu probable vers un macro-état plus probable. La croissance de l'entropie d'un système isolé exprimerait simplement la tendance moyenne, manifestée par ce système, d'évoluer vers des états de plus en plus probables à l'échelle des molécules, c'est-à-dire vers des états de plus en plus désordonnés. La flèche thermodynamique du temps ne serait autre que celle qui va de l'ordre vers le désordre.

Ainsi l'irréversibilité semble-t-elle surgir – presque miraculeusement – au bout des calculs. Mais ceux-ci

interprètent l'irréversibilité comme n'étant qu'une réalité statistique propre aux systèmes macroscopiques, c'est-à-dire contenant un très grand nombre de degrés de liberté. Au niveau microscopique, les phénomènes restent, eux, réversibles. L'irréversibilité ne serait donc qu'une propriété émergente caractéristique des seuls systèmes complexes. Elle serait de fait, non de principe. De là à dire que le temps lui-même n'est qu'une illusion, il n'y a qu'un pas que d'aucuns ont franchi, et non des moindres. Einstein lui-même a écrit dans sa correspondance privée (lettre écrite le 21 mars 1955 après la mort de son ami Michele Besso à la famille de ce dernier) que « pour nous autres, physiciens convaincus, la distinction entre passé, présent et futur n'est qu'une illusion, même si elle est tenace ». Même si son point de vue sur la question n'a pas toujours été aussi radical (peut-être voulait-il seulement consoler les proches du défunt ?), il reste qu'Einstein espérait bien éliminer la notion d'irréversibilité en ramenant la physique à une pure géométrie, c'est-à-dire à une forme sans histoire (à la fin de sa vie, Einstein semble avoir changé d'avis. En 1949, Kurt Gödel proposa un modèle cosmologique dans lequel il était possible de voyager vers son propre passé. Einstein ne fut pas convaincu, reconnaissant qu'il était incapable de croire que l'on puisse « télégraphier vers son passé » : voir I. Prigogine, 1996).

D'autres physiciens, en revanche, jugent impossible de soutenir que l'irréversibilité procède de notre ignorance des « détails fins » ou de notre subjectivité humaine. Quelque chose d'essentiel, pensent-ils, a dû échapper à la physique. Ilya Prigogine, qui défend ce point de vue, confesse volontiers l'influence cruciale qu'eut sur lui la phrase de Henri Bergson : « Le temps est invention, ou il n'est rien du tout » (*Évolution créatrice*, 1916, PUF, 1970, p. 341) (le mot invention est à prendre ici au sens de nouveauté créatrice, non au sens de chimère). Selon lui, l'irréversibilité macroscopique est l'expression d'un caractère aléatoire du niveau microscopique. Loin d'être une affaire de point de vue, elle serait inhérente à la nature. Il écrit : « La description statistique introduit les processus irréversibles et la croissance de l'entropie, mais cette description ne doit rien à notre ignorance ou à un quelconque trait anthropocentrique. Elle résulte de la nature même des processus dynamiques » (I. Prigogine, 1996, p. 126). Ainsi, au lieu de dire qu'il n'y a pas de flèche du temps, mais que le niveau macroscopique crée l'illusion qu'il y en a une, Prigogine proclame qu'il y a une flèche du temps, mais que le niveau microscopique crée l'illusion qu'il n'y en a pas. À ce sujet, les controverses sont nombreuses. Il reste en particulier à déterminer précisément comment la flèche du temps parviendrait à percer l'harmonieux édifice de la physique classique, si notoirement indifférent au message d'irréversibilité qu'elle porte. Le débat est notablement compliqué par le fait que la physique classique n'est pas seule en course. La physique moderne, c'est aussi la relativité restreinte, la relativité générale, la physique quantique, la cosmologie, bref, de nombreux formalismes qui se

complètement, voire se contredisent. Il nous revient de mettre un peu d'ordre dans ce foisonnement, au moins à propos du temps.

Dans les premières années de ce siècle, Einstein tente de concilier l'électromagnétisme de Maxwell et le principe de relativité, fondateur de la mécanique. Il trouve la solution dans une redéfinition de l'espace et du temps, introduisant le concept d'espace-temps en remplacement des concepts jusqu'alors séparés d'espace et de temps. Si l'on change de référentiel galiléen dans l'espace-temps, le temps se transforme en partie en espace, et l'espace se transforme en partie en temps. Conséquence philosophique : le temps perd son idéalité newtonienne, il cesse d'être extérieur à l'espace et se met à dépendre de la dynamique. Conséquence pratique : les horloges, lorsqu'elles se déplacent en mouvement rapide dans l'espace, ralentissent le rythme de leurs battements. Ce ralentissement des horloges, qui mesure l'élasticité du temps de la relativité, est couramment observé sur les particules élémentaires instables, par exemple sur les muons. Les muons sont des sortes d'électrons lourds produits naturellement en haute atmosphère par le rayonnement cosmique, ou artificiellement lors de collisions entre particules accélérées à haute énergie. Leur durée de vie moyenne t vaut 2,2 microsecondes. Toutefois, la théorie de la relativité implique, et l'expérience établit que l'intervalle de temps mesuré entre la création d'un muon et sa désintégration ne coïncide avec la durée de vie propre t que si ce muon naît et meurt en un même point de l'espace. Autrement dit, cela ne vaut que s'il est immobile. Sinon, sa durée de vie effective (et donc la longueur du trajet qu'il parcourt) dépend de son énergie ou, si l'on préfère, de sa vitesse : plus il va vite et plus il dure longtemps, au point que si sa vitesse est proche de celle de la lumière dans le vide, il a tout loisir de se manifester pendant un temps bien supérieur à t .

La théorie de la relativité oblige à modifier bien d'autres conceptions à propos du temps. Notamment, la notion de simultanéité cesse d'être absolue : des événements qui sont dans le futur pour tel observateur sont dans le passé pour tel autre et dans le présent pour un troisième ; ce qui m'est présent à un certain instant n'existe plus ou pas encore pour quelqu'un d'autre en déplacement par rapport à moi. Le mot maintenant devient ambigu puisqu'il existe autant d'horloges fondamentales qu'il y a d'objets en mouvement uniforme. On ne peut pas les synchroniser. Si l'on ajuste leurs cadrans à un certain moment, les heures indiquées ne coïncident plus quelques instants plus tard. Chaque observateur a l'impression que le temps indiqué par les horloges autres que la sienne propre est dilaté en raison, précisément, du ralentissement des horloges. Mais le principe de causalité est, quant à lui, conservé : si, pour un observateur, un événement A est antérieur à un événement B et tel qu'un signal lumineux a le temps de partir de A pour atteindre B, alors il en est de même pour n'importe quel autre observateur. Passé et futur gardent un caractère absolu. Passant d'un référentiel galiléen à un autre, on peut, selon leur vitesse

relative, modifier le rythme du cours du temps mais on ne l'inverse jamais. Il faudrait pour cela dépasser la vitesse de la lumière, ce que précisément la théorie de la relativité interdit.

Venons-en maintenant à la gravitation et à ce qui semble être aujourd'hui sa bonne théorie, la relativité générale d'Einstein. Si l'on en croit ses principes, la gravitation n'est pas une force s'exerçant entre les différents contenus matériels de l'univers. Elle est plutôt une propriété géométrique de l'univers lui-même. Cette insertion de la gravitation dans l'espace-temps lui-même l'oblige à se déformer, à devenir courbe. Les équations d'Einstein prévoient que la densité de masse et d'énergie conditionne la structure même de l'espace-temps et que c'est cette structure qui, en retour, détermine la dynamique et la trajectoire des objets contenus dans l'univers. Dans un tel contexte, non seulement la vitesse des observateurs, mais aussi la masse influent directement sur la vitesse d'écoulement du temps. Par ce biais, le temps est maintenant soumis aux phénomènes.

La quasi-unanimité des physiciens s'accorde aujourd'hui sur des modèles d'univers particuliers, dits de big bang, au sein desquels règne un temps cosmologique, lié à l'expansion de l'univers. Sans pour autant s'identifier au temps absolu de Newton, ce temps cosmologique partage avec lui la propriété d'être universel : des observateurs qui ne sont soumis à aucune accélération et ne subissent aucun effet gravitationnel mutuel peuvent en effet synchroniser leurs montres, et celles-ci resteront en phase tout au long de l'évolution cosmique. De plus, comme le temps de Newton, ce temps cosmologique s'écoule toujours dans le même sens, et c'est ce qui permet de l'utiliser pour retracer l'histoire de l'univers.

Quant à l'origine du temps cosmologique, à l'instar de celle de l'univers lui-même, elle se perd dans les brumes aurales de l'univers primordial. En effet, admettre le modèle du big bang, pour un physicien, c'est reconnaître l'impossibilité d'extrapoler indéfiniment vers le passé à l'aide des lois de la physique. Une telle extrapolation conduirait infailliblement à une impasse, c'est-à-dire à un état de l'univers dans lequel les lois de la physique telles que nous les connaissons entreraient en conflit les unes avec les autres, à cause de l'incompatibilité des principes de la physique quantique avec ceux de la relativité générale. Cette situation rendant tout calcul vain et toute conjecture chimérique, nous ne savons rien de l'origine de l'univers, rien non plus de l'origine du temps, que le terme origine soit pris ici au sens chronologique ou au sens explicatif.

Venons-en maintenant à la physique quantique, qui fut élaborée dans les premières décennies de ce siècle. La physique classique ne pouvant rendre compte correctement du comportement des atomes, et en particulier des interactions entre matière et lumière, elle fut remplacée par un formalisme révolutionnaire, le formalisme quantique, dont la fécondité concerne aujourd'hui toutes les branches de la physique. Pour décrire l'état d'un système quantique, par exemple une

particule, on utilise un objet mathématique que l'on appelle la fonction d'onde du système. En général, cette dernière est une somme de plusieurs termes distincts, chacun des termes correspondant à une valeur possible d'une propriété physique du système, par exemple de l'énergie. Une des originalités troublantes de la physique quantique vient de ce qu'elle postule que lorsque l'on fait une mesure sur le système, par exemple de son énergie, il se produit une modification brutale de la fonction d'onde : un seul terme de la somme qu'elle contient subsiste, correspondant à la valeur de l'énergie qui a été effectivement mesurée. D'après l'interprétation courante de la mécanique quantique, le choix du terme de la somme qui subsiste après cette réduction est parfaitement aléatoire, la fonction d'onde avant la mesure permettant seulement de calculer la probabilité que telle ou telle valeur soit sélectionnée.

Qu'en est-il alors de la question du temps en physique quantique ? Pour simplifier, nous ne retiendrons de son formalisme que l'équation de Schrödinger, qui est valable tant que les vitesses restent faibles par rapport à celle de la lumière. Elle permet de calculer l'évolution au cours du temps de la fonction d'onde associée à toute particule. Cette équation est parfaitement réversible, et tout aussi parfaitement déterministe. Le temps qu'elle manipule est donc *a priori* newtonien. Mais si une opération de mesure est faite sur le système, un seul des résultats de mesure *a priori* possibles se réalise effectivement. La description mathématique du système est modifiée, de sorte qu'on peut dire que l'acte de mesure implique la production irréversible d'une « marque » sur le système, que l'équation de Schrödinger ne décrit pas. Les mesures faites sur les systèmes interviendraient donc dans la création de l'irréversibilité.

Il n'y a visiblement pas d'universalité du concept de temps, ni d'unité théorique autour de lui. Chacun des systèmes conceptuels de la physique lui donne un statut original et particulier. Pour ce qui est de la question de l'irréversibilité, nous avons vu apparaître des bribes de flèche (thermodynamique, cosmologique, quantique), sans pouvoir mettre le doigt sur la flèche-mère de toutes ces fléchettes, qui vaudrait pour la physique tout entière. Il semble de toute façon que ces deux façons de penser, celle qui se fonde sur l'histoire et le temps, et celle qui se fonde sur l'éternité et l'absence de temps, soient deux composantes contradictoires mais inséparables de notre effort pour comprendre le monde. Nous ne pouvons pas expliquer le changeant sans le ramener au permanent, ni raconter la durée sans imaginer qu'elle monnaie quelque invariance.

Quant aux liens entre le temps du monde et celui de l'âme, ils sont à chercher à la couture de la matière et de la vie. Le temps mathématisé du physicien n'épuise manifestement pas le sens du temps vécu, pas plus que le temps vécu ne donne l'intuition de toutes les facettes du temps physique. À force de schématisation, la physique aurait-elle laissé échapper quelques-unes des propriétés fondamentales du temps ? C'était le point de

vue de Bergson, convaincu que la physique et l'intelligence discursive en général se faisaient une représentation fautive du temps. Plutôt que d'observer le temps qui s'écoule, l'esprit scientifique se préoccuperait de noter des coïncidences ; il substituerait à la durée un schéma simpliste, celui d'un temps à une dimension, homogène, constitué seulement d'instantis qui se succèdent à l'identique. Ce faisant, expliquait Bergson, il oublierait de regarder en face la véritable nature de la durée, qui est invention continue, apprentissage perpétuel, émergence ininterrompue de nouveauté. Les tic-tac répétitifs et essulés constituant le temps monotone des physiciens ne sauraient donc être la pâte du vrai temps, celui de la vie.

En attendant qu'une conclusion éventuelle vienne clore ce débat, qui dit cette conflictualité profonde du temps du monde et du temps de l'âme mieux que la poésie la plus populaire, celle où l'on dit que la vie est brève, les amours éphémères et la mort certaine ?

- BACHELARD G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Stock, 1992.
 — BALIAN R., *From Microphysics to Macrophysics*, Springer-Verlag, vol. 1 et 2, 1991, 1992. — BERGSON H., *Durée et simultanéité* (1922), Paris, PUF « Quadrige », 1992. — BROUILLON P., *Le temps, essai sur l'origine*, Paris, Hatier, 1993. — BROGLIE L. DE, *Physique et microphysique*, Paris, Albin Michel, 1956.
 — COHEN-TANNOUDJI G. & SPIRO M., *Matière-Espace-Temps*, Paris, Gallimard « Poche », 1989. — CONCHE M., *Temps et destin*, Paris, PUF, 1992. — DESANTI J.T., *Réflexions sur le temps*, Paris, Grasset, 1992. — ESPAGNAT B. D', *Le réel voilé*, Paris, Fayard, 1994 (en particulier appendice 3). — GRIMALDI N., *Ontologie du temps*, Paris, PUF, 1993. — GUITTON J., *Justification du temps*, Paris, PUF « Quadrige », 1993. — HAWKING S., *Une brève histoire du temps*, Paris, Flammarion, 1988.
 — KLEIN E., *Les Tactics de Chronos*, Paris, Flammarion, 2003. — KLEIN E. & SPIRO M. cd., *Le temps et sa flèche*, Paris, Flammarion « Champs », 1996. — LEVINAS E., *Le temps et l'autre*, Paris, PUF « Quadrige », 1991. — PIETRE B., *Philosophie et science du temps*, Paris, PUF « Que sais-je ? » (n° 2909), 1994. — PRIGOGINE I., *La Fin des certitudes*, Paris, Odile Jacob, 1996. — PRIGOGINE I. & STENGERS I., *La nouvelle alliance*, Paris, Gallimard, 1979 ; *Entre le temps et l'éternité*, Paris, Fayard, 1988.

Étienne KLEIN

→ Bergsonisme ; Énergie ; Espace-temps ; Infini ; Irréversibilité ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Symétrie.

TERRE GÉOLOGIE

De quoi la Terre est-elle faite ? Quelle est sa structure ? Il s'agit ici d'acquiescer une vision globale de la Terre, et de retracer l'évolution de cette vision de l'Antiquité à nos jours. Des conceptions aristotéliennes à la physique actuelle, on est passé des quatre éléments à l'observation rigoureuse des profondeurs de notre planète. Comment est-on parvenu à lever le voile sur l'intérieur du globe ? Aujourd'hui comme hier, nul moyen d'aller voir sur place, de sonder directement les entrailles de la Terre pour constater ce qu'elles

recèlent. Ce n'est qu'à partir d'indices recueillis en surface que l'on peut se faire une idée sur l'intérieur du globe. Mais comment l'extérieur peut-il révéler l'intérieur ? Comment guider les interprétations ? Nous verrons que si les schémas interprétatifs ont profondément évolué d'Aristote à l'époque contemporaine, les notions et les questions posées se conservent : l'intérieur de la Terre est-il plein ou creux, rempli de canaux ou stratifié, dense ou léger, homogène ou hétérogène, chaud ou froid, fluide ou solide ? Ce sont ces questions et ces couples antagonistes que nous retrouverons dans chaque vision de la Terre.

Des Anciens à Descartes

Les premières étapes des investigations sur la Terre portent sur sa position dans l'espace et sa forme. Au VI^e s. avant J.-C., Anaximandre considère que la Terre est un corps isolé, privé de tout appui, en équilibre au centre d'un Ciel sphérique. Elle constitue un corps qui se tient en lui-même, nettement séparé du reste du Monde. Pythagore (~ 560-480) – ou peut-être Parménide (~ 515-450) – suppose ensuite que la forme de la Terre est similaire à celle du Ciel : sphérique. Dès le V^e s. avant J.-C., la Terre a donc une forme déterminée et une position précise dans l'espace et ces deux caractérisations permettent de l'appréhender comme un corps global. Platon (~ 428-348) peut ainsi donner les premières conceptions des profondeurs en dressant une « géographie infernale ». Il suppose que quatre grands fleuves s'écoulent à l'intérieur de la Terre et qu'ils convergent, après des trajets complexes, vers le Tartare, masse d'eau placée au centre du globe. L'un des fleuves est un fleuve de feu et ses arrivées en surface provoquent les activités volcaniques.

Pour que les notions sur la Terre puissent se développer, il faut cependant qu'elles s'appuient sur une physique et la première physique cohérente et complète est le fait d'Aristote (~ 384-322 avant J.-C.). Aristote introduit une séparation nette entre le monde supralunaire, domaine des astres et de l'éternité, et le monde sublunaire, domaine de la génération et de la corruption. Il élabore également la théorie des lieux et des mouvements naturels. Pour lui, la Terre n'est constituée que de l'élément terre ; elle forme un bloc plein, compact, immobile, sans évolution interne possible. Seules les couches les plus superficielles ont une activité manifestée par les volcans et les tremblements de terre mais ces phénomènes appartiennent aux « météores » et ils ne révèlent rien sur les profondeurs du globe. Pour Aristote encore, le domaine terrestre s'étend jusqu'à l'orbite lunaire ; il est composé de différentes couches sphériques concentriques : autour de la terre vient l'eau, puis l'air et enfin le feu.

Toujours chez les Anciens, un tout autre point de vue est proposé par Lucrèce vers 60 avant J.-C. Lucrèce se rattache à la physique atomiste de Démocrite et à la conception de l'éternité du Monde d'Aristote, il oppose l'idée d'une formation progressive à partir d'un chaos primitif. Le globe est né par la « décantation » d'une

sorte de boue primordiale ; la terre, en vertu de son poids, se rassemblant au centre avec au-dessus la mer, puis l'air et enfin l'éther et ses feux.

Entre l'Antiquité et le XVI^e s., les conceptions sur la Terre globale n'évoluent pas, les doctrines d'Aristote restant la référence. Le seul point discuté porte sur l'existence de la terre ferme. En effet, si le monde sublunaire est constitué de différentes couches concentriques, pourquoi la sphère aqueuse ne recouvre-t-elle pas en entier la sphère terrestre comme cela est le cas pour l'air autour de l'eau et pour le feu autour de l'air ? Une thèse originale est présentée par Buridan (~ 1300-1358). Les sphères de terre et d'eau sont de même rayon, mais légèrement décalées l'une par rapport à l'autre. La terre peut donc dominer la mer sur un hémisphère continental alors que l'autre hémisphère est purement océanique. Cette situation résulte de l'hétérogénéité de la sphère de terre (due à l'action du Soleil qui allège les parties émergées) qui décale son centre géométrique de son centre de gravité. Or c'est le centre de gravité qui coïncide avec le centre du Monde, autour duquel est centrée la sphère d'eau. Cette vision de la Terre ne sera remise en cause que par les voyages de découvertes à la fin du XV^e s. L'observation de terres émergées dans toutes les parties du monde montre que la terre et l'eau forment un corps sphérique unique et que l'eau ne fait que combler les dépressions les plus profondes du relief terrestre.

Pour assister à une modification plus complète des conceptions sur la Terre il faut attendre la révolution copernicienne et galiléenne qui détruit l'ensemble de l'édifice aristotélicien. Ce rejet de la science antique libère le globe des schémas interprétatifs antérieurs et appelle un renouveau complet de sa vision. Ce renouveau est présent dès l'œuvre de Kepler. En 1618, dans l'*Abrégé d'Astronomie Copernicienne*, Kepler n'assimile plus le domaine terrestre au monde sublunaire. Il affirme que la couche d'air ne dépasse pas la cime des plus hautes montagnes et il ne retient plus la couche de feu. Mais l'essentiel est qu'il envisage une création de la Terre. Pour expliquer la forme sphérique de la Terre, il suppose qu'à son origine elle était dans un état fluide (fluidité aqueuse ou ignée) et qu'ainsi elle a pu être « modelée » par la gravité. Les thèses de Galilée, un peu plus tard, traduisent également un nouvel état d'esprit. Dans son *Dialogo*, en 1632, Galilée défend la « noblesse » de la Terre autrefois réservée aux cieux et il s'interroge directement sur son constituant interne. Il rejette l'idée selon laquelle la Terre ne serait formée que de l'élément terre et, en suivant Gilbert qui en 1600 a publié un important traité sur le magnétisme, postule que l'intérieur du globe est de la nature de l'aimant. Ces conceptions de Kepler et de Galilée montrent que dorénavant il est devenu possible de s'intéresser à la fois à l'origine et à l'intérieur de la Terre.

Descartes et Kircher, respectivement en 1644 et 1665, sont les premiers à proposer des visions nouvelles des profondeurs du globe. Descartes donne sa représentation de la structure de la Terre en relatant sa genèse. En imaginant que la Terre est née d'un ancien

soleil, il suppose qu'elle contient en son centre un noyau de matière solaire et, en cherchant à expliquer la formation du relief terrestre, il considère que la partie externe de la Terre consiste en une succession de couches sphériques concentriques de différents éléments qui se sont ensuite effondrées. Kircher pense également que la Terre n'est qu'un astre refroidi. Elle possède selon lui un foyer central relié aux volcans de la surface par des conduits de feu avec des réserves intermédiaires, les « pyrophyllacées ». Il postule encore que la Terre possède des réservoirs d'eau qui alimentent par l'intermédiaire d'un réseau les sources des montagnes et les gouffres marins.

La Terre et la mécanique newtonienne

À la fin du XVII^e s., les théories qui se développent poursuivent la démarche de Descartes mais en incorporant les implications qualitatives de la mécanique newtonienne et en cherchant à donner une explication scientifique des récits bibliques ; elles reçoivent le nom de « théories de la Terre ». Les premières théories de la Terre sont écrites en Angleterre par Burnet (1681), Woodward (1695) et Whiston (1696) ; chacune propose une vision différente de l'intérieur du globe. Pour Burnet la Terre naît d'un chaos fluide et se structure sous l'effet de la gravité : au centre on trouve un noyau de feu, puis une couche de terre, une couche fluide (le réservoir du Déluge) et une nouvelle couche de terre. Pour Woodward la Terre a subi une dissolution complète lors du Déluge puis s'est résédimentée. La Terre est ainsi formée d'une immense sphère aqueuse recouverte de couches de terre déposées dans l'ordre des densités. Pour Whiston la Terre est constituée d'un noyau solide chaud (le noyau d'une ancienne comète), puis d'une couche de fluide pesant et d'une couche de terre en équilibre sur le fluide (Whiston préfigure l'isostasie).

D'autres hypothèses, plus singulières, sont encore avancées à cette époque. Pour expliquer les variations temporelles de la déclinaison magnétique Halley suppose, en 1683, que le champ magnétique terrestre provient d'un noyau aimanté qui tourne plus ou moins librement à l'intérieur de la Terre. Gautier, en 1721, avance la première théorie, pour nous surprenante, d'un globe entièrement creux. La mince croûte externe est maintenue en équilibre par deux forces antagonistes, la gravité et une force centrale produite par la rotation de la Terre. La résultante des deux forces s'annule au milieu de la croûte et s'inverse de chaque côté de telle sorte que les deux faces de la croûte sont symétriques et qu'un monde est également possible sur la face interne avec ses mers et ses montagnes ! L'hypothèse d'une Terre creuse sera reprise par Boullanger en 1753 et par Fûchsel en 1773. Un autre modèle original, dû à Moro en 1740, postule que tous les reliefs ont une origine volcanique et que les soulèvements de la croûte forment des cavités internes, soit remplies de substances ignées enflammées, soit moulées par un globe igné déformable.

À la charnière entre le XVII^e et le XVIII^e s., le nombre d'essais sur l'intérieur de la Terre est donc très important, cependant chacun reste éminemment personnel et aboutit à une vision très particulière du globe. Ce n'est qu'au cours du XVIII^e s. que les recherches sur les profondeurs du globe vont progressivement se canaliser, en particulier dans l'œuvre de Buffon qui s'appuie à la fois sur les implications de la mécanique newtonienne et sur les conceptions sur l'origine du globe. En considérant les mesures de la gravité (faites à l'aide d'un pendule), il affirme que la Terre est pleine, les cavités étant limitées aux couches superficielles. Et surtout, en reprenant une idée de Leibniz émise en 1693, il postule que la Terre a été au tout début de son histoire un globe entièrement en fusion. Leibniz faisait reposer son argumentation sur l'observation de la nature vitrifiée des roches. Buffon ajoute deux indices. Le premier est la figure ellipsoïdale de la Terre qui a été vérifiée par les expéditions géodésiques françaises au Pérou (1735-1744) et en Laponie (1736-1737) et qui montre que la Terre n'a pu prendre sa forme qu'à l'état fluide (le raisonnement est similaire à celui de Kepler mais en tenant compte cette fois de la force centrifuge de rotation qui élève l'équateur et abaisse les pôles). Le deuxième indice est la chaleur propre du globe, reconnue par de Mairan en 1765 à la suite des premières mesures de température dans le fond des mines. Cette chaleur propre est interprétée comme le résidu de la chaleur primitive. Pour Buffon la fusion ne concerne cependant que les premiers temps de l'histoire du globe ; celui-ci s'est ensuite refroidi et consolidé. Le globe est aujourd'hui complètement solide et formé d'une matière vitrifiée qui constitue aussi l'ossature des plus hautes montagnes.

Pour Buffon le globe est également homogène. Cette dernière affirmation est cependant contredite par les études newtoniennes de la Terre qui connaissent un développement considérable dans la deuxième partie du XVIII^e s. Ces études portent sur la figure d'équilibre de la Terre (Clairaut, 1743) et sur le mouvement de précession (mouvement de l'axe de rotation de la Terre par rapport aux étoiles avec une période de 25 800 ans – d'Alembert, Euler, 1749). Ces deux phénomènes dépendent intimement de la répartition interne de la densité et indiquent clairement que la Terre ne peut pas être homogène : sa densité doit croître avec la profondeur. Ce résultat est confirmé par la détermination de la masse de la Terre. Cavendish, en 1798, arrive à une densité moyenne de la Terre de 5,48 g/cm³ (aujourd'hui 5,52 g/cm³) et puisque les roches superficielles ont une densité proche de 2,8 g/cm³, il doit exister en profondeur des roches plus lourdes pouvant compenser ce défaut de masse. Les trois phénomènes (aplatissement, précession, masse) suggèrent donc un accroissement de la densité avec la profondeur mais ne permettent pas de connaître la loi précise de cet accroissement, en particulier de savoir si ce dernier est régulier ou irrégulier. Ainsi, Euler postule en 1749 que la Terre est constituée d'une enveloppe légère et d'un noyau dense dont il estime les dimensions, mais

l'intérieur de la Terre comme on vient de le voir mais également de déterminer la densité des différentes régions. Le premier profil de densité avec la profondeur a été établi par Bullen en 1936, puis a été progressivement raffiné jusqu'au modèle actuel, le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model, Dziewonski & Anderson, 1981). Ce modèle montre à la fois des sauts de densité aux différentes discontinuités et un accroissement continu de la densité à l'intérieur de chaque région dû à l'augmentation de la compression avec la profondeur. Notons qu'aujourd'hui ce modèle PREM sert de point de départ à des études plus précises qui ne décomposent plus la Terre en coquilles sphériques mais cherchent à déterminer les variations latérales de densité. Ces études sont de deux types : la tomographie sismique et l'analyse du champ de gravité. La tomographie consiste en des recoupements multiples de trajets d'ondes sismiques et permet d'établir des cartes d'anomalies des vitesses sismiques à différentes profondeurs qui peuvent être interprétées en cartes d'anomalies de densité et de température. Le but est de cartographier les régions froides et les régions chaudes du manteau et ainsi d'essayer de mettre en évidence la géométrie des courants de convection au sein du manteau. L'autre technique est l'analyse du champ de gravité de la Terre, bien connu aujourd'hui grâce aux trajectoires des satellites. Cette analyse permet également de cartographier les régions denses et légères du manteau et de déterminer la topographie des différentes interfaces. Ces deux techniques montrent que dorénavant nous sommes entrés dans une investigation de la géographie de la Terre à trois dimensions.

Parallèlement à cette détermination de la structure et du profil de densité de la Terre, des recherches ont porté sur la composition chimique des différentes régions de la Terre. Un point important est la découverte, d'abord par les études sur l'équilibre isostatique des continents (dans les années 1900) puis par les études sismologiques (années 1920), de la différence fondamentale de nature entre les continents et les fonds marins. Alors que les continents sont constitués de matériaux légers (roches sialiques), les fonds océaniques sont composés de matériaux plus lourds (roches simatiques). Cette différence de nature est l'une des caractéristiques primordiales de notre planète. L'observation des météorites suggérait que le manteau était constitué de minéraux silicatés formant des roches basiques et ultrabasiqes. C'est cependant le développement à partir des années 1940 des expériences en laboratoire pour reproduire les conditions de température et de pression du manteau qui a pu contraindre les spéculations. Le matériau supposé devait en effet avoir des propriétés physiques (densité, vitesses sismiques) compatibles avec les résultats de la sismologie. À la fin des années 1950, trois roches étaient encore retenues pour le manteau supérieur, la dunite, l'éclogite et la péridotite mais c'est finalement la péridotite qui s'est imposée dans les années 1970. La nature du manteau profond et des discontinuités de 410 et 670 km de profondeur a été plus difficile à établir. Depuis les années

1970, on pense que le manteau est chimiquement homogène (composition des météorites ou légèrement appauvrie) mais que sa composition minéralogique varie. Ainsi les discontinuités de 410 et 670 km ne sont pas liées à des changements de composition chimique comme l'interface croûte-manteau ou noyau-manteau mais à des changements de phase minéralogique, les atomes formant des assemblages plus denses et plus compacts à cause de l'augmentation de la pression. La composition précise de la couche D'' est encore aujourd'hui peu claire.

C'est la nature du noyau qui a suscité le plus de controverses. L'observation des météorites indiquait une composition en fer-nickel mais d'autres hypothèses ont été avancées. Ritter, en 1878, en reprenant une idée de Benjamin Franklin (1793), postulait que le noyau était constitué de gaz dans un état supercritique et l'idée a été soutenue par Arrhenius en 1900. De la même manière, Kuhn et Rittmann affirmaient en 1940 que la Terre contenait un noyau d'hydrogène. Une autre position, celle d'un noyau constitué de silicates en phase métallique, était défendue par Ramsey en 1948-1949. Ces différentes théories, qui restaient marginales, ont été définitivement réfutées par les expériences de laboratoire de hautes pressions dans les années 1950 qui montraient que le noyau devait être principalement constitué de fer. Ces expériences prouvaient également qu'un noyau de fer pur aurait une densité trop forte. Outre le nickel, le noyau devait contenir des éléments légers (de l'ordre de 10 % en masse). Il n'y a pas encore aujourd'hui accord sur la nature de l'élément léger prédominant, les deux candidats principaux étant le soufre et l'oxygène.

Depuis l'Antiquité, de nombreuses étapes ont donc été franchies sur le chemin de la connaissance des profondeurs terrestres. La plupart des incertitudes sur la structure de notre planète et la nature de ses constituants ont été levées, et seuls subsistent quelques points de détails à préciser. Ces réponses ont permis d'ouvrir de nouveaux champs d'investigation. Ce sont en particulier les régimes thermique et dynamique de la Terre : profil de température, géométrie de la convection dans le manteau, génération du champ magnétique terrestre dans le noyau.

- BRUSH S.G., *Annals of Sciences*, 36, 1979, p. 225-254. — BUFFON, *Œuvres philosophiques de Buffon*, J. Piveteau, Paris, PUF, 1954. — DEPARIS V., *Études sur le mouvement des plaques lithosphériques et recherches sur quelques aspects historiques de la dynamique terrestre*, Strasbourg, 1997 (thèse). — DESCARTES R., *Principes Philosophiques* (1644), in *Descartes, Œuvres philosophiques*, Paris, Garnier, 1973. — ELLENBERGER F., *Histoire de la géologie*, Paris, Tec et Doc, 1988-1994. — GOHAU G., *Les sciences de la Terre aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, Albin Michel, 1990. — HOPKINS W., *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 132, 1842, p. 43-55. — SUESS E., *La Face de la Terre* (1909), t. III, trad. fr., Paris, Colin, 1918. — THOMSON W. (Lord Kelvin), *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 153, 1863, p. 573-582.

Vincent DEPARIS

— Courant de convection ; Dérive des continents ; Expansion terrestre ; Inertie (Principe d') ; Marées ; Orogenèse ; Tectonique des plaques ; Wegener.

TEST

PHYSIQUE

La notion de test exprime, comme le mot anglais qui la désigne, une mise à l'épreuve. C'est une notion fondamentale dans les sciences empiriques, différentes en ce point des sciences mathématiques. Celles-ci autorisent leurs théorèmes par des procédures de preuve, celles-là autorisent leurs lois fertiles en prédictions par des procédures de test. Cependant le statut épistémologique du test est différent selon qu'il s'agit d'une mise à l'épreuve d'une théorie ou d'une loi ou seulement d'un examen d'une hypothèse quelconque susceptible d'être prise en compte dans l'établissement d'une loi expérimentale ou même d'un contrôle pratique. Le résultat, positif ou négatif, d'une telle mise à l'épreuve se prête, dans l'un et l'autre cas, à une interprétation différente.

La mise à l'épreuve des théories

Dans l'optique empiriste et positiviste, le test ne sert qu'à vérifier, et l'on ne s'attend guère à ce qu'il soit négatif, sinon pour exclure des idées aberrantes, car c'est de l'expérience sensible que dérive toute certitude, une certitude qui se transmet, de façon inductive, à des lois de plus en plus générales, dont l'assemblage hiérarchique constitue une théorie pour tout un domaine du savoir. Une telle attitude se prête facilement au dogmatisme de vérités acquises une fois pour toutes, à moins que, face aux démentis si fréquents de l'expérience, elle ne vire au scepticisme. Dans l'optique rationaliste et critique, au contraire, l'accent est mis sur l'invention d'hypothèses qui ne peuvent devenir des lois, exprimées dans un langage symbolique plus ou moins conventionnel, que si les prédictions qui en dérivent sont réalisées dans l'expérience. On imagine une situation expérimentale où telle prédiction, conforme à la loi, devrait être satisfaite, et l'on constate dans la réalité empirique s'il en est, ou non, ainsi. Le test confirme ou infirme la prédiction. On considère alors qu'il est favorable ou défavorable à la loi, voire à la théorie, qui autoriserait cette prédiction. On trouve l'exemple d'un tel cas, souvent cité de nos jours, dans une fameuse mise à l'épreuve de la théorie einsteinienne de la gravitation. Selon cette théorie, dont la prédiction diffère largement sur ce point de la théorie newtonienne, la masse du Soleil doit dévier les rayons lumineux qui viennent d'une étoile, située dans l'alignement solaire, vers la Terre. On devrait se rendre compte de cette déviation lors d'une éclipse du Soleil. L'éclipse qui eut lieu en mai 1919 permit à deux expéditions scientifiques de constater, à d'excellentes approximations expérimentales près, la déviation théorique attendue. Il est clair qu'un test négatif aurait été un désaveu cinglant pour la théorie, même si celle-ci expliquait beaucoup mieux

que la théorie newtonienne le déplacement séculaire du périhélie de Mercure. L'issue positive du test que la théorie einsteinienne venait de subir fit grande impression dans le milieu scientifique, ainsi que l'a rapporté le philosophe Whitehead, qui se trouvait à la séance de la Royal Society quand fut lu le compte rendu de l'expédition scientifique dirigée par Eddington. L'émotion était comparable, a-t-il écrit, à celle suscitée par l'audition d'un « drame grec », en ce que le destin semblait avoir tranché pour la théorie d'Einstein, qui s'avérait meilleure que celle de Newton, régnante depuis deux siècles. La méditation de cette révolution scientifique, comme de l'attitude d'Einstein, qui déclarait que sa théorie aurait dû être abandonnée au cas où d'autres tests (relatifs au *redshift* gravitationnel des lignes spectrales) se seraient avérés négatifs, eut une influence décisive sur l'orientation épistémologique du jeune K.R. Popper, comme ce philosophe l'a raconté dans son *Autobiographie*. Pour Popper, dont la position est devenue classique, la procédure du test n'a pas pour but de vérifier une loi générale (ou de la rendre un peu plus générale, comme le soutiennent certains empiristes), mais elle doit s'efforcer au contraire de la réfuter, c'est-à-dire de la prendre en défaut, de telle sorte que cette loi soit corroborée (mais non vérifiée !) si elle résiste à toutes les tentatives qui sont faites pour la « falsifier », c'est-à-dire la rendre fautive, selon la règle logique d'inférence du *modus tollens*. Jamais cette position n'a été exprimée avec une telle vigueur que chez Popper, mais il faut reconnaître qu'elle n'est pas originale. Elle avait été déjà adoptée par tous ceux qu'on a désignés plus haut comme rationalistes critiques et pour qui une « hypothèse » n'est pas un condensé de prétendus faits (même si Newton, probablement pour se débarrasser de ses critiques, avait osé dire : « Hypotheses non fingo »), mais une création libre de l'esprit humain, qui ne peut s'autoriser d'aucune évidence intrinsèque mais doit subir l'épreuve de l'expérience pour devenir une « loi ». Au XIX^e s., par exemple, Claude Bernard ne cessa de mettre en garde les pratiquants de la méthode expérimentale contre une confiance si excessive dans leurs propres idées qu'ils ne retinssent que les résultats conformes à leur théorie et négligeassent les autres : « C'est ce qui m'a fait dire ailleurs qu'il ne fallait jamais faire des expériences pour confirmer ses idées, mais simplement pour les contrôler » (C. Bernard, *Introduction à la Médecine expérimentale*, Paris, 1865, p. 67). Une telle règle n'est assurément pas toujours aisée à suivre : elle exige une rectitude morale, proche parfois du désintéressement, et passe pour une prescription de l'éthique de la recherche.

Mais faut-il entendre cette règle, assurément indispensable dans la recherche scientifique, comme l'abandon de toute idée préconçue ? À la fin du XIX^e s., Pierre Duhem a bien vu que les admonestations de Claude Bernard étaient d'une interprétation aisée en physiologie, où les faits peuvent s'exprimer presque uniquement dans les catégories du langage ordinaire, mais étaient littéralement inapplicables en physique, où

les faits sont décrits à l'aide d'appareils dont les indications sont empreintes d'un sens théorique qui seul les rend intelligibles et pourvues du pouvoir discriminatoire qu'on veut leur faire jouer : « Ici, en effet, il ne peut plus être question de laisser à la porte de son laboratoire la théorie qu'on veut éprouver, car, sans elle, il n'est pas possible de régler un seul instrument, d'interpréter une seule lecture » (P. Duhem, *La Théorie physique son objet sa structure*, 1906, 2^e éd. revue et augm., 1981, p. 277). Les faits scientifiques, en cela différents des faits bruts, c'est-à-dire des faits sensibles interprétés avec les seules catégories du langage ordinaire, sont, comme on l'a dit par la suite, « chargés de théorie ». Cette circonstance découle de la façon même dont s'est constituée la physique mathématique au XVII^e s., quand on a substitué des symboles mathématiques aux descriptions du langage ordinaire. Même s'il serait très abusif d'exiger que toute science ne fasse appel qu'aux notions symboliques matérialisées dans les instruments physiques de mesure qu'elle utilise, il est bien évident qu'on ne peut faire appel à leur service sans admettre les théories dont ils sont la mise en œuvre. P. Duhem avait tout raison de le faire remarquer : « Le chimiste, le physiologiste, lorsqu'ils font usage des instruments de Physique, du thermomètre, du manomètre, du calorimètre, du galvanomètre, du saccharimètre, admettent implicitement l'exactitude des théories qui justifient l'emploi de ces appareils, des théories qui donnent un sens aux notions abstraites de température, de pression, de quantité de chaleur, d'intensité de courant, de lumière polarisée, par lesquelles on traduit les indications concrètes de ces instruments » (*ibid.*, p. 277-278). Bien entendu, ce qui vaut pour les sciences d'un degré de complexité supérieur à celui de la physique vaut d'abord et avant tout pour la physique elle-même. C'est pourquoi l'on peut dire avec Duhem qu'« une expérience de physique ne peut jamais condamner une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble théorique » et que d'ailleurs « l'*experimentum crucis* est impossible en physique ». On entend par *experimentum crucis*, expression empruntée à Bacon, une expérience qui permettrait de choisir, entre plusieurs hypothèses, la bonne, comme si cette expérience se tenait à un croisement de routes comme un poteau indicateur pour indiquer la voie à suivre. On ne se trouve jamais devant une telle situation, dont l'imagination traduit une interprétation sans doute trop réaliste de la science. L'histoire de la physique manifeste plutôt une pluralité simultanée de théories, pour les mêmes phénomènes, théories qui prennent, chacune à leur tour, la prééminence, selon l'étendue des classes de faits qu'elles permettent de représenter avec exactitude. Duhem avait pris l'exemple des théories de la lumière, où l'hypothèse ondulatoire, déjà émise au XVII^e s. par Huygens, mais de façon incomplète (puisqu'il n'y était pas fait usage de la périodicité), a supplanté, au XIX^e s., l'hypothèse corpusculaire, émise par Newton, et défendue plus tard contre Fresnel par d'illustres physiciens. Après l'expérience de Foucault sur les miroirs tournants, Duhem

estimait que Biot avait été sage de renoncer à défendre l'hypothèse corpusculaire, et l'on ne peut que lui donner raison, car l'hypothèse ondulatoire de Fresnel ou de Maxwell représentait davantage de classes de faits que les théories de l'émission de l'époque, inspirées de Newton. Mais l'histoire de l'optique ne s'est pas arrêtée avec l'expérience de Foucault. Au début du XX^e s., Einstein a expliqué l'effet photoélectrique par l'hypothèse des quanta de lumière, et ces quanta, qui ont reçu ensuite le nom de photons, se comportent comme des particules. Pour la théorie quantique, la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire ne sont donc plus opposées mais contraintes à fusionner dans l'optique quantique. Cette dernière ne prend parti ni pour l'hypothèse corpusculaire ni pour l'hypothèse ondulatoire, mais reconnaît qu'elles sont toutes deux relativement fondées. C'est la combinaison *sui generis* des deux qui se révèle pertinente, pour la lumière comme d'ailleurs, selon l'intuition de Louis de Broglie, pour la matière elle-même.

K.R. Popper ne pouvait ignorer en quel sens l'histoire postérieure de la physique avait donné raison à Duhem, quant à l'impossibilité d'une expérience cruciale, au-delà même de ce que ce dernier pouvait attendre. En effet, l'expérience de Foucault, même si elle n'avait pas pour Duhem, comme elle l'avait pour Arago, la valeur d'un *experimentum crucis*, devait faire préférer, selon lui, l'hypothèse ondulatoire, non par logique, mais par bon sens. Or, sans contrarier ce bon sens, voilà que l'hypothèse corpusculaire s'est trouvée réhabilitée par Einstein ! Popper connaissait trop, lui aussi, l'histoire de la physique pour ne pas reconnaître, avec Duhem, que ce sont des systèmes théoriques, non des hypothèses isolées, qui s'offrent au verdict de l'expérience, et se trouvent par là justifiées ou condamnées. Mais Popper pensait aussi que la méthode axiomatique permet d'isoler les hypothèses et donc de sacrifier, en cas de conflit avec l'expérience, la plus fragile, celle qui est la moins légitimée par la pratique scientifique. Popper a même essayé, grâce à sa notion de « falsificateurs virtuels », d'édifier une théorie épistémologique qui permettrait de classer en quelque sorte les théories scientifiques et de leur accorder un ordre de préférence. Mais il n'est pas parvenu sur ce point à des résultats définitifs. Il semble qu'il soit impossible d'édifier une théorie de la « vérisimilitude », et que la convenance d'une théorie avec les faits chargés de la tester reste une affaire d'appréciation ou, comme le disait déjà Augustin Cournot, de « probabilité philosophique ».

On ne peut donc être surpris que le logicien Quine ait repris la thèse holiste de Duhem. Ce dernier avait proposé ce qui peut passer pour la définition du holisme : « Le seul contrôle expérimental de la théorie physique qui ne soit pas illogique consiste à comparer le système entier de la théorie physique à tout l'ensemble des lois expérimentales, et à juger si celui-ci est représenté par celui-là de manière satisfaisante » (*op. cit.*, p. 303-304). Quine, de son côté, en luttant contre le réductionnisme, entendu comme la doctrine qui

s'attache à réduire à l'évidence sensible toute vérité de fait, et, en particulier, les énoncés scientifiques, constate que ce dogme du réductionnisme survit dans la supposition que toute proposition, prise indépendamment de ses compagnes, peut passer isolément le test de confirmation ou d'infirmité. En s'autorisant explicitement de Duhem, il y oppose la thèse suivante : « Ma contre-suggestion, qui dérive essentiellement de la doctrine de Carnap sur le monde physique dans l'*Aufbau*, est que nos propositions sur le monde extérieur rencontrent le tribunal de l'expérience sensible non individuellement mais en corps constitué » (W. van O. Quine, « Two Dogmas of Empiricism », *From a logical point of view*, 1953, 2^e éd. revue, 1963, p. 41 ; la traduction de la phrase citée est de H. Barreau). On évite les difficultés rencontrées par Popper dans ses essais d'une logique de la « vérisimilitude » si l'on porte une attention suffisante à cette contresuggestion de Quine, qui est certes peu banale sous la plume d'un empiriste, et qui est devenue célèbre sous le nom de « thèse de Duhem-Quine ».

Les tests d'hypothèses dans l'usage statistique

Au laboratoire ou dans la vie courante il ne s'agit pas d'apprécier les valeurs respectives des théories scientifiques. Il s'agit de faire progresser la science et les disciplines qui s'en inspirent (sciences de l'ingénieur, médecine, agronomie, recherches en sciences humaines et sociales), ou d'évaluer si des échantillons sont conformes à une norme. Le point de vue inductif, qui va de l'inspection de cas particuliers à la formulation d'une proposition générale, reprend ici valeur et intérêt. Puisqu'il faut induire, autant le faire avec le plus de sécurité possible, en évaluant les risques d'erreur. C'est dans ce but que sont offertes les méthodes de la statistique mathématique. Elles n'ont pas pour but de fournir les « bonnes idées » mais d'examiner si, une idée étant suggérée par la masse des données obtenues, cette idée peut obtenir le support de la seule prise en compte de ces données, de telle sorte que les rapprochements retenus par l'idée-hypothèse ne puissent pas tout simplement être attribués au hasard. Le fondement logique de ces méthodes est à chercher dans la théorie mathématique du hasard, c'est-à-dire le calcul des probabilités. Il n'est pas question d'exposer ici les bases de ce calcul. Il convient cependant de rappeler le rôle capital que joue, dans la justification de la plupart des tests d'hypothèses, la loi de Gauss-Laplace, ou loi normale, qui est figurée par la courbe dite « de Gauss ». L'étude de la distribution qui caractérise la loi normale a donné lieu à l'énoncé du « théorème central limite » dont il existe plusieurs formulations, parmi lesquelles on peut retenir celle-ci : « Si un phénomène aléatoire global est la somme d'un très grand nombre de phénomènes aléatoires élémentaires, ayant chacun une distribution quelconque, mais étant tous de faible amplitude, alors la distribution du phénomène aléatoire global est une distribution de Gauss » (Ch. Ruhla, *La Physique du Hasard de Blaise*

Pascal à Niels Bohr, p. 52). On sait que ce théorème fut d'abord utilisé dans l'étude des erreurs commises lors de la mesure des grandeurs physiques. Ces erreurs ont, en effet, des causes multiples, qui ne peuvent cependant faire dévier beaucoup d'une moyenne, dotée d'un écart-type. Mais l'on sait, d'autre part, comme on l'a vu dans l'intertitre précédent, que rien n'est plus déterminé que la mesure théorique d'une grandeur physique, si bien que la distribution d'une variable aléatoire représentée par la loi de Gauss est tout à fait apte à exprimer la conformité à une loi ou à une norme, malgré les nombreuses petites déviations survenues par hasard. En revanche, une distribution empirique qui ne se range pas dans ce modèle mathématique, ou dans un autre modèle apparenté à celui-ci, a fort peu de chance de refléter une régularité.

L'application pratique de tels principes est courante. Supposons qu'une machine soit réglée pour produire des pièces caractérisées par une loi normale $N(m, \sigma)$, où m désigne la moyenne et σ l'écart-type. Le test consiste à vérifier que la machine fonctionne selon cette loi. On établit une carte de contrôle, où m_0 désigne la moyenne prescrite et les lignes $m_0 + 2\sigma$ et $m_0 - 2\sigma$ les côtes d'alerte. Si le relevé des pièces, opéré par exemple d'heure en heure, ne laisse apparaître que de rares dépassements des côtes d'alerte (soit, par exemple, 1 sur 20 épreuves), alors on considère que l'hypothèse est vérifiée, avec une probabilité de 0,95. Dans le cas contraire, on rejette l'hypothèse.

On voit que de telles méthodes ne permettent pas d'atteindre la certitude. Toute décision d'acceptation ou de rejet d'une hypothèse comporte un risque d'erreur. Il faut choisir quelle erreur on désire avant tout éviter. C'est sur cette idée que repose la méthode de J. Neyman et E.S. Pearson. Pour eux le statisticien doit choisir entre deux risques : celui de rejeter une hypothèse alors qu'elle est vraie, celui d'accepter la même hypothèse alors qu'elle est fautive. Par exemple, dans la vente d'un lot de pièces usinées, dont le vendeur ou l'acheteur ne peut tester qu'un échantillon, le premier risque est celui du vendeur (quand le client a rejeté le lot après le test sur l'échantillon, à moins que le vendeur, soucieux de sa bonne réputation, ne privilégie l'intérêt de l'acheteur), le second risque est celui de l'acheteur (quand le client a accepté le lot, parce que le test, opéré par le vendeur ou l'acheteur, n'a pas révélé la fausseté de l'hypothèse, à moins que le vendeur n'ait inversé les risques). En raison de ces risques opposés, J. Neyman propose de considérer tout test comme le choix entre deux hypothèses, où l'hypothèse privilégiée est celle qui est accompagnée du risque dit de première espèce, tandis que l'hypothèse alternative comporte un risque dit de deuxième espèce. On fixe d'abord le seuil du risque de première espèce et l'on veille à ce que le risque de deuxième espèce soit minimum, par exemple en augmentant la taille de l'échantillon. Dans certains cas les deux hypothèses sont connues (par exemple, quand il s'agit de déterminer, entre deux réglages possibles, quel est celui auquel appartient l'échantillon). Dans d'autres cas, on

fixe arbitrairement l'hypothèse alternative (où la moyenne, par exemple, serait inacceptable). Il s'agit donc d'un « comportement inductif » gouverné par des préceptes de prudence.

Mais une telle méthode est-elle applicable dans la recherche scientifique ? Quand on étudie un phénomène naturel, il est nécessaire de forger une hypothèse, mais l'hypothèse alternative est tout simplement que cette hypothèse soit fautive. Pour cette raison, R. Fisher n'avait aucune confiance dans la méthode des tests proposée par J. Neyman. Il se bornait à conseiller de tester l'hypothèse alternative de celle qu'on désirait établir, puisqu'une négation a, comme l'a bien vu K. Popper, plus de force qu'une affirmation obtenue de l'expérience. Mais le rejet de l'hypothèse dite nulle (parce qu'on voulait la rejeter) n'est pas équivalent à accepter l'hypothèse qui certifierait la causalité présumée du facteur en question. De plus, quand on a choisi l'hypothèse dite nulle, un résultat significatif (quand la probabilité d'erreur est 0,05 ou même 0,01) est suffisant pour mettre en doute l'hypothèse en question, mais un résultat non significatif n'implique pas la vérité de cette dernière hypothèse. La statistique ne dispense pas de réfléchir. Si l'on a appelé la probabilité le guide de la vie, on peut dire que la statistique est l'auxiliaire de la science expérimentale. Elle sait exclure assez facilement les pistes aberrantes ; elle prépare mais n'accomplit pas l'invention théorique. Il ne faut pas demander à l'induction statistique plus que ce qu'elle peut offrir.

► BARREAU H., « Popper et les Probabilités », *Karl Popper et la science d'aujourd'hui*, s.l.d. de Renée Bouveresse, Paris, Aubier, 1989, p. 231-252. — DUHEM P., *La Théorie Physique son objet sa structure* (1906), 2^e éd. revue et augm. avant-propos, index et bibliogr. P. Brouzeng, Paris, Vrin, 1981. — LARGEAULT J., *Hasards, Probabilités, Inductions*, Publ. de l'Univ. de Toulouse Le Mirail, 1979. — POPPER K.R., *La Logique de la Découverte Scientifique* (1959), trad. de l'angl. N. Thyssen-Rutten & Ph. Devaux, Paris, Payot, 1984. — QUINE W.V.O., *From a Logical Point of View* (1953), 2^e éd. revue, New York, Harper Torchbooks, 1963. — REEB G. et FUCHS A., *Statistiques commentées*, Paris, Gauthier-Villars, 1967. — RUHLA Ch., *La Physique du Hasard de Blaise Pascal à Niels Bohr*, Paris, Hachette-CNRS, 1989.

Hervé BARREAU

→ Duhem ; Expérience cruciale ; Méthode ; Popper ; Preuve ; Quine ; Réfutabilité ; Validation ; Vérification.

THÉMATA

PHYSIQUE

Depuis quelques années, il est de plus en plus admis que des présupposés ne devant rien aux phénomènes et qui ne sont au départ ni démontrables ni falsifiables jouent un rôle déterminant dans la phase préparatoire à la recherche en sciences expérimentales ou humaines. L'étude de ces présupposés, pour la plupart cachés, tacites, voire insoupçonnés des auteurs de la recherche,

permet de mieux comprendre les motivations de ceux, scientifiques en particulier, qui œuvrent à produire de nouvelles connaissances, si on la concentre sur deux moments importants : a) le tout début du travail novateur d'un individu, lorsqu'il entame une réflexion dont témoignent, par exemple, ses brouillons, ses notes de laboratoire ou sa correspondance ; et b) lors de l'étape « publique », à l'occasion des désaccords éventuels susceptibles de surgir entre des intervenants d'un même niveau de compétences quant à la valeur de découvertes abouties et publiées.

a) Pour illustrer l'emprise de ces présupposés à la phase initiale, prenons l'exemple d'un scientifique, Albert Einstein, qui écrivait à Max Born que sa foi inébranlable dans la causalité physique l'engageait, à rebours du succès des théories fondamentalement probabilistes défendues notamment par Born, à ne reconnaître d'autre autorité que celle de ses intuitions les plus profondes ; Einstein confiait de même à W. de Sitter que la plus grande partie de ses recherches trouvaient leur raison d'être dans son irrésistible « besoin de généraliser » (ce que montre, par exemple, son passage de la relativité restreinte à la relativité généralisée, puis à une théorie unitaire du champ). Les travaux d'Einstein révèlent d'ailleurs un certain nombre d'autres présupposés, notamment un goût affirmé pour la symétrie, l'unification, la simplicité, l'explication fondée sur l'idée de continuum (les champs) plutôt que sur la fragmentation de la matière en particules discrètes, ou encore le caractère achevé de la théorie. Ces préférences expliquent pour une part son refus d'accepter la validité à long terme des résultats obtenus par d'autres scientifiques à partir de présupposés aux antipodes des siens — la mécanique quantique de Niels Bohr, par exemple, malgré son indéniable capacité à apporter des solutions satisfaisantes.

Einstein estimait qu'à défaut de tenir ces présupposés en principe, faire de la science était « aussi impossible que de respirer dans un vide ». Il parlait pour sa part de « catégories », mais pas au sens immuable des catégories kantienne ; car Einstein, qui contestait le point nodal de l'idéalisme transcendantal en réfutant l'*a priori* synthétique, y voyait au contraire des « libres conventions » ne trouvant leur justification que dans leur utilité ultime.

b) Les règles aujourd'hui appliquées en matière de publication scientifique découragent d'examiner les présupposés à l'origine de la recherche, mais il arrive toutefois que ces derniers se découvrent clairement. Par exemple, à l'occasion des querelles qui opposent les scientifiques sur la validité de leurs travaux respectifs, comme celle, célèbre, qui vit s'affronter Heisenberg et Schrödinger. Défi à la visualisation et à l'interprétation imagée, le modèle mécanique de Heisenberg attribue un rôle clef à l'électron, ici présenté comme un élément de discontinuité fondamentale. La mécanique ondulatoire de Schrödinger, qui porte sur les mêmes phénomènes physiques (et dont il s'avéra par la suite qu'elle produisait des résultats équivalents), se fondait sur des idées absolument antagonistes. Et

pendant que d'un côté Heisenberg stipendiait cette approche à ses yeux « dégoûtante », de l'autre Schrödinger déclarait trouver « repoussante » la méthode de Heisenberg.

On sent, derrière ces dissensions portées sur la place publique, combien les préférences esthétiques servent à déterminer des programmes de recherche entiers. Aussi retiennent-elles toute l'attention des historiens des sciences.

Pour déterminer le rôle et les formes spécifiques de ces présupposés, que j'appelle *thémata*, il faut renoncer à la spéculation théorique au profit d'études de cas factuelles, empiriques. S'il n'est guère douteux que l'analyse de l'existence et du rôle des *thémata* peut s'appliquer à toutes les disciplines scientifiques, jusqu'ici la plupart des travaux ont porté sur les recherches menées en physique par des savants comme Kepler, Newton, Einstein, Bohr ou, plus récemment, Steven Weinberg (cf. Holton, 1973, 1978). Les historiens des sciences se sont habitués à manier ce nouvel outil, venu compléter l'étude plus traditionnelle des éléments de la réflexion scientifique ; dans la remarquable histoire qu'il a consacrée à la naissance de l'électrodynamique quantique, S.S. Schweber (1994) remarque ainsi dès le premier paragraphe, à propos des destins promis aux points de vue divergents de Pasqual Jordan et de P.A.M. Dirac : « Le mouvement de balancier entre ces *thémata* détermine l'histoire que va connaître la théorie des particules « élémentaires ». »

Ces quelques exemples indiquent le rôle essentiel, moteur mais souvent tenu secret, des présupposés thématiques de base dans la détermination des avancées scientifiques ; de pair avec les éléments beaucoup mieux connus du raisonnement et de la spéculation scientifiques, ils viennent en permanence renouveler les fondements des sciences de la nature et en particulier de la physique. Telle qu'elle se pratique depuis maintenant quelques décennies autour d'études de cas, l'étude thématique de la science est principalement présentée dans cinq des ouvrages de l'auteur de cet article : *L'imagination scientifique ; Thematic Origins of Scientific Thought : Kepler to Einstein ; The Advancement of Science, and its Burdens : The Jefferson Lectures and Other Essays ; Science and Anti-Science ; et Einstein, History and Other Passions*.

Dimension des *thémata*

Pour un scientifique, publier les résultats de ses travaux dans une revue, un manuel, etc., revient en fait à demander leur intégration dans la science « publique », si l'on peut dire. Sous cet aspect, la science est bien différente de l'activité individuelle poursuivie au cours de l'étape précédente, pendant la période de genèse, et qui, elle, mérite d'être qualifiée de « privée ». Or les présupposés généraux auxquels le scientifique recourt la plupart du temps lors de la phase d'élaboration (et que j'appelle présupposés thématiques, ou hypothèses thématiques) n'apparaissent pas, ou pas souvent, dans les communications, et on les perd alors de vue. Les

programmes d'enseignement et les manuels de cours ne s'y réfèrent pas explicitement. Tout au contraire, les scientifiques n'utilisent habituellement que deux types d'énoncés pour rendre compte de leurs recherches.

Le premier regroupe les propositions « phénoméniques » : elles se rapportent à des questions empiriques, ramenées pour finir à des formules protocolaires sur des phénomènes publics — les relevés d'instruments par exemple. Le second correspond aux propositions « analytiques » : d'ordre logique et mathématique, elles se ramènent en définitive à des tautologies cohérentes en regard du système des axiomes retenus. (Pour Einstein, ces deux composantes du savoir scientifique public relevaient respectivement de l'« empirique » et du « rationnel », et si elles étaient selon lui « inséparables » elles s'opposaient aussi dans une « éternelle antithèse ».)

Il y a certains avantages pratiques au fait qu'aucun de ces deux types d'énoncés ne laisse place aux propositions thématiques. Si donc, à des fins mnémotechniques, nous considérons les composantes phénoménique et analytique comme deux axes orthogonaux (x et y), elles définissent un plan discursif bidimensionnel qui est en règle générale le lieu du débat scientifique public sur les résultats de la recherche. Passer sous silence les motivations individuelles et les préférences thématiques qui nourrissent la phase de genèse permet d'atteindre plus facilement le consensus et rend de surcroît plus convaincante la présentation pédagogique de la science. Cette attitude sert également à amputer la science d'idées « métaphysiques » exaspérantes, qu'il est impossible de dissocier en leurs composantes le long des deux axes x et y . C'est en partie pour préserver cet avantage que, de Hume aux courants inspirés par le Cercle de Vienne, les empiristes et les positivistes insistent pour que l'activité « scientifique » soit exclusivement définie à partir du sens de l'observation et de la logique de l'argumentation.

Toujours est-il que, nous l'avons vu, cette représentation en deux dimensions de la science a elle aussi son prix. L'historien des sciences s'aperçoit d'abord qu'elle ne permet pas de rendre compte du comportement et de l'expérience des individus au moment où ils sont engagés dans la recherche. Elle n'explique pas non plus les différences frappantes qui, à la même période et devant le même corpus de données, vont se faire jour entre individus quant au choix des problèmes et à la réception des théories ; pensons par exemple aux réactions au départ si contrastées suscitées par la théorie de la relativité en Allemagne, en Angleterre, en France et aux États-Unis. Elle méconnaît également, en sus du potentiel positif et émancipateur de certaines propositions, leur côté négatif et asservissant qui a pu induire d'éminents scientifiques en erreur ou les entrainer dans des voies infructueuses ; tel fut le cas, par exemple, de la « hantise de la circularité » de Galilée (Alexandre Koyré). Bien que le modèle plan soit satisfaisant en ce qui concerne les objectifs immédiats que s'assignent les scientifiques, il est donc indispensable de le retoucher pour mieux comprendre les sources et les cheminement du processus créatif. Cette nécessité qui s'est

imposée à moi alors que j'étudiais des manuscrits de scientifiques m'a conduit à définir une troisième composante, représentée à des fins mnémotechniques par un axe (z) qui s'élève à la verticale du plan phénoméno-analytique. C'est à cette troisième dimension qu'appartiennent les thémata (*thema* au singulier, du grec θέμα : « ce qui est posé » ; proposition, mot premier).

Selon ce modèle, l'énoncé scientifique n'est plus, comme précédemment, un élément de surface du plan bidimensionnel mais un élément volumique, une entité prise dans un espace à trois dimensions et dont les éléments se distribuent sur trois axes perpendiculaires (phénoménique, analytique et thématique). Le troisième axe ordonne toute la série des thémata à l'œuvre dans un travail particulier, même si le scientifique qui en est l'auteur n'en a que vaguement conscience.

L'analyse thématique sert donc à reconnaître la carte particulière des différents thémata qui, aussi sûrement que les empreintes digitales, caractérise tel scientifique ou une partie de la communauté scientifique à une époque donnée. S'agissant de Johannes Kepler, cela permit de découvrir qu'en renonçant en 1605 au présupposé voulant que l'univers fût un « organisme divin » Kepler put exploiter simultanément trois conceptions thématiques fondamentales où l'univers est successivement envisagé comme une mécanique physique, une harmonie mathématique, un ordre théologique central. Chaque fois qu'il se heurtait aux limites de l'une d'entre elles (à cause par exemple de la physique encore rudimentaire qu'il pratiquait) Kepler se rabattait sur les deux autres. Cette stratégie qui explique la complexité et la confusion apparentes de ses écrits et de ses engagements successifs a également déterminé ses succès.

Les recherches comparatives menées sur l'œuvre de nombreux scientifiques révèlent que les thémata apparaissent généralement par dyades d'éléments opposés, symbolisées par l'écriture Θ/Θ . Tel est le cas, en physique surtout, mais ailleurs aussi, des couples continuum (le champ p. ex.)/discontinuum (l'atomisme p. ex.); complexité/simplicité; réductionnisme/holisme; unité/classification hiérarchique; causalité/probabilisme; analyse/synthèse. On rencontre également quelques triades: évolution/permanence/dégénérescence; ou modèle mécaniste/modèle matérialiste/modèle mathématique. Il est remarquable, comme le montre la recherche historique, que seul un nombre restreint (probablement de l'ordre de la centaine) de thémata et de dyades ou triades thématiques ait suffi au développement de la science moderne. (Raison qui conduit à préférer l'emploi de *thema* à celui de « thème », car il n'y a pas comme en musique et en littérature un nombre illimité de thèmes possibles, et l'on ne peut inférer de ces thèmes une loi générale valant pour l'activité scientifique dans son ensemble.)

Il n'est pas moins significatif de constater que la plupart des thémata ont une durée de vie extraordinairement longue. Les thémata opposés d'Héraclite et de Parménide ont toujours cours aujourd'hui. Les ajouts, telle l'introduction dans les années 1920 de l'idée

thématique de complémentarité, sont fort rares. Certes les différents éléments qui servent à composer un concept scientifique – « atome », par exemple – ont changé à maintes reprises depuis Démocrite. Ce qui, en revanche, n'a pas changé, c'est le concept d'« unité discrète » qui sous-tend l'atomisme et qui aujourd'hui comme autrefois s'exprime au travers de la notion mouvante d'« atome ». C'est d'ailleurs la permanence des thémata fondamentaux, y compris aux époques de grandes avancées scientifiques, qui rend si contestable l'idée que la théorie serait incommensurable.

Limites des thémata

Bien sûr les thémata n'ont pas tous autant de mérite. Ainsi que le rappelait Francis Bacon à propos des quatre Idoles qui sont autant de pièges pour l'esprit scientifique, certains ont de fait fourvoyé la science et ralenti son développement. Et toutes les disciplines n'en tirent pas des bénéfices égaux; la perspective holiste adoptée au début du XIX^e s. présentait bien des avantages en physique, mais au total ce fut peut-être un handicap pour la biologie de l'époque. De la même manière, il ne devrait pas être besoin de souligner que l'analyse thématique n'est pas une idéologie, une école de métaphysique, un plaidoyer pour l'irrationalité, une attaque contre l'indubitable vertu opératoire des données empiriques et de l'expérimentation, ou un moyen de montrer aux scientifiques comment mieux faire leur travail. L'analyse thématique est descriptive, pas prescriptive. Il n'est pas impossible, par exemple, que la quête puissamment motivante de l'« unification », d'une synthèse générale de la physique, si brillamment menée d'Oersted à Maxwell et d'Einstein à nos jours soit effectivement un piège, ainsi que nous en prévient Isaiah Berlin lorsqu'il parle à propos de ce besoin de synthèse globale de l'« illusion ionienne » au moteur de la recherche poursuivie d'Aristote à Bertrand Russell et encore aujourd'hui, des constituants ultimes du monde mais dans un sens non empirique.

Quelques conséquences

La communauté scientifique s'oppose sur certains thémata et s'entend sur d'autres: ce double constat permet de comprendre pourquoi le progrès scientifique ne précipite pas les milieux de la recherche dans une catastrophe totalitaire et n'exige pas non plus de « conversions » en masse. Chacune des diverses représentations du monde prometteuses mais achevées répandues dans la profession à un moment donné ne constitue pas une entité d'un seul tenant, indissociable. Il y a, si l'on peut dire, suffisamment de biodiversité à l'intérieur du groupe, les ensembles de chromosomes qui caractérisent chacun de ses membres se ressemblant assez pour le constituer en communauté, mais leurs différences suffisent néanmoins à le rattacher à certains thémata à l'œuvre dans des représentations du monde concurrentes. N'oublions pas qu'Einstein et Bohr sont tombés d'accord plus souvent

qu'ils ne se sont opposés. De plus, bien des thémata en cours à une époque donnée ne sont pas créés de neuf mais repris, ou adaptés, à partir de versions précédentes de la représentation du monde, la marche de l'évolution suffisant à expliquer la plus grande partie du progrès scientifique.

Ce modèle nous permet de saisir pourquoi les scientifiques peuvent avoir entre eux des échanges constructifs sur leurs points d'accord et de désaccord, et pourquoi ils ne sont pas coupés de l'étape scientifique antérieure par une infranchissable barrière épistémologique. Les thématiques se recoupent assez pour assurer la stabilisation du système, et la liberté intellectuelle laisse place aux désaccords thématiques. C'est précisément cette tension qui selon le modèle d'un progrès scientifique évolutif est génératrice d'innovations. Les nombreux degrés de liberté internes ménagent un pluralisme salvateur, si bien que le changement se produit presque toujours par déformation plastique plutôt que rupture catastrophique.

Généralisation de l'analyse thématique

La valeur esthétique et incitative des thémata scientifiques montre qu'ils ne sont pas si différents des présupposés et représentations du monde qui guident et encadrent d'autres activités créatrices, de l'art à la politique. Bien plus, certains de ceux qui ont cours dans telle ou telle spécialité scientifique sont en fait des exemplifications de thémata fondamentaux identifiés dans d'autres disciplines, ou même dans des domaines culturels très éloignés de la science en tant que telle. On en a un exemple avec le principe de complémentarité de Niels Bohr. De l'aveu même de ce dernier, la complémentarité en physique vient exprimer, pour reprendre le langage ici utilisé, un thème général prélevé dans le fonds relativement restreint de thémata qui nourrit les efforts de l'imagination humaine. Peu importe les facteurs qui, comme Bohr l'a plusieurs fois suggéré, ont le plus compté dans sa formulation première de la complémentarité en physique – aussi bien ses propres recherches de physicien que ce qu'il pensait de la psychologie ou de certains problèmes philosophiques, des controverses qui en son temps opposaient des écoles de biologie rivales ou encore des exigences complémentaires de l'amour et de la justice dans les affaires quotidiennes dont il a souvent parlé – car en définitive, c'est l'importance universelle du rôle de la complémentarité que Bohr a mise en relief. De la même manière, on voit à l'évidence que le thème de l'évolution se manifeste sous des aspects différents dans les disciplines les plus diverses, de la biologie à la cosmologie et de l'embryologie à l'économie. Ce qui par conséquent autorise à considérer tout thème général comme la somme de ses exemplifications particulières.

À partir de là, il est raisonnable d'escompter que l'analyse thématique pourra être utilement appliquée à des domaines d'étude très diversifiés. Et c'est de fait ce qui se passe aujourd'hui. La postface de l'édition 1988 de *Thematic Origins of Scientific Thought*

mentionne quelques-uns des auteurs qui ont explicitement utilisé les concepts thématiques dans des disciplines et des contextes différents: en histoire et en philosophie des sciences; en sociologie des sciences (à cet égard, cf. en particulier Robert K. Merton, 1975, qui signale les analogies existant entre analyse thématique et « analyse de contenu » en sociologie et en politique); en biologie, en psychologie, en sociologie, en critique littéraire et linguistique (la bibliographie indiquée ci-dessous fournit quelques exemples supplémentaires). Bien que réelle à plusieurs niveaux, la dichotomie qu'il est d'usage d'établir entre sciences expérimentales et sciences humaines devient beaucoup moins convaincante dès lors qu'on examine avec attention l'utilité des matériaux thématiques dans ces deux champs du savoir.

Ce que ne sont pas les thémata

Un mot pour finir à propos d'autres concepts parfois confondus avec les propositions thématiques. Ainsi les « métaphores », qui à la différence des thémata ont traditionnellement pour fonction d'opérer des rapprochements conceptuels entre des similitudes choisies; et dont, de plus, il existe en principe un nombre infini.

Autre confusion possible avec les thémata, le concept de « paradigme », qui, lui, désigne essentiellement un phénomène d'ordre social apparu au sein de la communauté scientifique dans un domaine bien précis. L'exemple par excellence du paradigme serait donc l'acceptation apparemment généralisée d'un cadre de pensée particulier, qui en règle générale s'impose de manière « révolutionnaire ». Tôt ou tard, cependant, ce paradigme sera évincé par un autre, pris dans le nombre potentiellement infini des paradigmes possibles et promis lui aussi à disparaître conformément aux lois d'un développement discontinu « révolutionnaire ». Savoir si ce schéma trouve effectivement à s'appliquer en général est une question amplement débattue (Ernst Mayr, 1972, montre ainsi que la « révolution darwinienne n'est pas conforme à [ce] modèle simple »). À l'inverse, il est possible de trouver dans l'œuvre d'un individu un thème appartenant à une gamme de thémata qu'il est peut-être le seul à accepter. De plus, le nombre fini de thémata et, en règle générale, leur très longue durée de vie accentuent la longévité du progrès scientifique et sa nature évolutive.

► BERLIN, I., *The Crooked Timber of Humanity*. New York, Random House, 1992. – CERUTI M., *Constraints and Possibilities: The Evolution of Knowledge and Knowledge of Evolution*. Lausanne, Gordon & Breach, 1994. – CROMBIE A., *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition*. Londres, Duckworth, 1994. – GALISON P., *How experiments end*. Chicago, Univ. of Chicago Press, 1987. – HETHERINGTON N., « Plato and Eudoxus: Instrumentalists, Realists, or Prisoners of Themata? », *Stud. Hist. Phil. Sci.*, vol. 27, n° 2, 1996, p. 271-289. – HOLTON G. (1995), *Einstein, History, and Other Passions*. Cambridge, Harvard Univ. Press, 3^e éd. 2000 (1978) *The Scientific Imagination*. Cambridge, Harvard Univ. Press, rééd. 1998. – JAMMER M., *Conceptual Development of Quantum Mechanics*. Woodbury, American Institute of

Physics, 2^e éd., 1989 – JARVIE I., « On the History of Science », *Queen's Quarterly* (Canada), vol. 87, 1980, p. 65-68. – KREMER-MARIETTI A., « Thematic Analysis », in KENT A., dir. *Encyclopedia of Library and Information Science*, vol. 41, suppl. 16, New York, M. Dekker, 1987, p. 332-339. – MAYR E., « The Nature of the Darwinian Revolution », *Science*, 2 juin 1972, vol. 176, p. 981-989. – MERTON R., « Thematic Analysis in Science : Notes on Holton's Concept », *Science*, vol. 188, 1975, p. 335-338. – PECHENKIN A., « The Two-Dimensional View of the History of Chemistry », in GAVROGLU K. et al. dir., *Trends in the Historiography of Science*, Dordrecht, Kluwer, 1994, p. 369-377. – PRITS M., *Toward a Dialogue of Understanding*, Bethlehem, Lehigh Univ. Press, 1995. – SCHWEBER S., *QED and the Men Who Made It*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1994. – TOULMIN S., « The Intellectual Authority and the Social Context of the Scientific Enterprise : Holton, Rescher and Lakatos », *Minerva*, vol. 18, 1982, p. 652-667. – TRUPPI C., *Continuità a Mutamento*, Milan, Franco Angeli, 1994. – WOLTERS G., « Topik der Forschung », in BURRICHTER C. et al. dir., *Technische Rationalität und rationale Heuristik*, Paderborn, Schöningh, 1986, p. 123-154. – ZIMAN J., *Puzzles, Problems and Enigmas*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1981.

Gerald HOLTON
(trad. O. Bonis)

→ Controverse Bohr-Einstein ; Paradigme ; Phénomène ; Réductionnisme.

THÉORIE

La notion de théorie scientifique implique une mise en forme logique de principes et de conséquences qui regroupent des résultats préexistants. Elle existait déjà chez les Grecs anciens, et les avantages comme les difficultés qu'elle recèle leur étaient bien connus. Ils l'avaient mise en œuvre avec succès dans les mathématiques, puisque les *Éléments* d'Euclide (III^e s. av. notre ère), qui s'offrent comme une déduction rigoureuse de théorèmes à partir de notions premières, d'axiomes et de postulats, ne sont que l'expression réussie d'une méthode d'exposition qui avait été poursuivie depuis au moins deux siècles, comme nous le savons par les témoignages de Platon et d'Aristote. Ce dernier avait d'ailleurs proposé une méthode apparentée, bien que moins rigoureuse, pour la physique ou science des corps en mouvement, mais cette méthode ne rencontra pas le même succès. C'est que les astronomes grecs, qui étudiaient le mouvement des astres, ne s'estimèrent pas soumis, pour la plupart, aux principes de la physique aristotélicienne qui ne laissaient qu'une place secondaire et subordonnée aux modèles mathématiques. C'est à la poursuite de tels modèles qu'ils s'appliquèrent avant tout, satisfaits qu'ils étaient quand ils pouvaient, grâce à ces modèles empruntés à la géométrie à deux ou trois dimensions, et selon le mot d'ordre attribué à Platon, « sauver les phénomènes ». Ils s'aperçurent même très vite qu'il y a plusieurs manières de sauver les phénomènes. Ainsi Aristarque de Samos (III^e s. av. notre ère) estima plus vraisemblable l'hypothèse de l'héliocentrisme, qu'il substitua au géocentrisme, professé par Platon et Aristote, pour

l'explication du mouvement des planètes (au nombre desquelles le géocentrisme comptait donc le Soleil). Cependant, Hipparque (II^e s. av. J.-C.) et Ptolémée (II^e s. apr. J.-C.) ne le suivirent pas dans cette voie et revinrent au géocentrisme, corrigé, il est vrai, par les hypothèses d'excentriques et d'épicycles, qui pouvaient rendre compte des irrégularités apparentes du mouvement de certaines planètes (rétrogradations).

Copernic, au XVI^e s. de notre ère, reprit l'hypothèse émise par Aristarque de Samos, de laquelle il était lui-même convaincu, bien qu'il fût incapable de la justifier par des raisons proprement physiques, obligé qu'il était de recourir lui aussi à des expédients (épicycles). D'où la multiplicité des systèmes du monde, qui est si frappante dans les temps du bas Moyen Âge et de la Renaissance. Au XVII^e s. encore, on s'accommodait de cette situation incertaine, bien que la théorie planétaire de Kepler, en substituant l'ellipse au cercle comme modèle du mouvement des planètes, apportât un soutien remarquable, refusé toutefois par Galilée, au système héliocentrique. Enfin, Newton fonda une mécanique nouvelle et put y rattacher les trois lois, fondées sur l'observation, de Kepler. L'unité théorique de la physique était enfin restituée, du moins pour un temps.

On voit, par cet exemple, l'importance d'une théorie pour une science empirique : elle apporte une vision d'ensemble d'un large champ du savoir, permettant à certaines hypothèses, promues au rang de principes, de rendre compte des régularités et des lois établies par l'expérience et exprimées le plus souvent, s'il s'agit d'astronomie et de physique, à l'aide de relations mathématiques. L'hypothèse de la gravitation universelle, qui considérait la pesanteur comme une force d'attraction, se rangeait elle-même dans les cadres fournis par les trois principes de la mécanique newtonienne (inertie, proportionnalité de la force et de l'accélération, égalité de l'action et de la réaction). D'ailleurs Newton lui-même, conscient du caractère étrange, dans une explication de type mécanique, d'une action à distance, s'ingénia à faire passer son hypothèse de l'attraction comme une loi parmi d'autres et garantie, comme ces dernières, grâce au procédé d'induction, sur le socle solide de l'expérience. On pouvait espérer que les autres phénomènes de la nature, et, par exemple, ceux relatifs à l'électricité et au magnétisme, obéiraient à des lois du même type, où la force serait inversement proportionnelle au carré de la distance. Mais, malgré quelques succès de ce paradigme, comme la loi de Coulomb, il fallut bientôt renoncer à considérer le paradigme newtonien comme universel. Les principes de la thermodynamique, puis ceux de l'électromagnétisme, répugnaient à entrer dans le cadre de la physique dite des « forces centrales ».

À la fin du XIX^e s., Pierre Duhem fut parmi les premiers à tirer les leçons d'une situation aussi confuse, et qui mettait aux prises des conceptions fort différentes du monde physique. Au lieu de voir dans la théorie physique un essai d'explication des lois par des principes ayant valeur de causes, il osa définir tout

autrement le statut de la théorie physique : « Une théorie physique n'est pas une explication. C'est un système de propositions mathématiques, déduites d'un petit nombre de principes, qui ont pour but de représenter aussi simplement, aussi complètement et aussi exactement que possible, un ensemble de lois expérimentales » (P. Duhem, *La Théorie Physique, son objet - sa structure*, 1903, 2^e éd. revue et augm., repr. facsimilé avec avant-propos, index et bibliogr. P. Brouzeng, Paris, Vrin, 1981, p. 24).

Une théorie physique a donc pour objet d'opérer un classement des lois connues ou à découvrir. Cette épistémologie, ou théorie des sciences, était proche de celle d'Henri Poincaré, qui identifiait lui-même physique théorique et physique mathématique, et distinguait dans *La Science et l'Hypothèse* (1902, avec préf. J. Vuillemin, Paris, Flammarion, 1968) trois sortes d'hypothèses : celles qui sont assez particulières pour être confirmées et mises au rang de lois expérimentales, celles qui sont assez générales pour réunir des phénomènes multiples dans une représentation commode (par exemple : l'éther porteur des ondes électromagnétiques en général, et des ondes optiques en particulier), celles qui sont tout à fait générales et ne reposent que sur des conventions soustraites au verdict de l'expérience bien que soumises à la règle de commodité (principes généraux de la physique : inertie, relativité, moindre action, irréversibilité, conservation de l'énergie). On sait que ni Duhem ni Poincaré n'eurent la chance, comme savants, de faire triompher la manière dont ils proposèrent respectivement de restaurer l'unité de la théorie physique, qu'ils considéraient avec raison comme le gage de la valeur objective de celle-ci (à l'opposé de l'attitude décrite comme positiviste), mais qui était, davantage qu'ils l'estimaient eux-mêmes, mise en cause par la découverte de nouveaux phénomènes, ces phénomènes qui devaient briser les cadres de la physique classique. Mais les idées méthodologiques et épistémologiques de ces deux auteurs, nourries de connaissances historiques étendues, en particulier chez Duhem, se révélèrent aptes à offrir, au cours du XX^e s., une voie moyenne pour tous ceux qui n'étaient satisfaits ni d'un réalisme scientifique excessif, qui assimilait pratiquement une théorie physique à un système métaphysique dogmatique, ni d'un empirisme scientifique trop modeste (déjà feint par Newton), qui assimilait un principe théorique à une loi expérimentale d'un degré plus élevé que les autres.

Il est significatif, par exemple, qu'un auteur contemporain comme Quine, insatisfait de l'empirisme logique d'un Carnap, s'est convaincu que Duhem avait eu raison de dénoncer la possibilité de faire appel à une « expérience cruciale » pour rejeter ou adopter une théorie, puisque celle-ci n'encourt jamais seule le verdict de l'expérience. C'est, pour Quine (« Two Dogmas of Empiricism », *From a Logical Point of View*, 1953, 2^e éd. revue, New York, Harper & Row, 1961, 20-46), le refus de l'un des deux « dogmes » de l'empirisme, l'autre, également insoutenable selon lui,

étant la distinction tranchée entre l'analytique et le synthétique. D'un autre côté, Karl Popper (1902-1994), dont la thèse de la « falsifiabilité » d'une théorie scientifique s'oppose certes à la position duhémienne mais qui a voulu rompre lui aussi avec le « néopositivisme » en général de l'École de Vienne, s'est rapproché de Poincaré en proposant sa thèse de la « vérissimilitude » des théories scientifiques, une vérissimilitude qui exclut de les considérer aussi bien comme des vérités métaphysiques que comme des outils seulement utiles à la conquête par l'homme de la nature. Quoi qu'il en soit de cette affiliation après coup à deux conceptions protagonistes célèbres de l'épistémologie, ces deux auteurs contemporains ont en commun de marquer une certaine distance à l'égard d'une conception sociologique du savoir scientifique. Cette dernière conception, qu'on peut rapprocher du positivisme en ce que celui-ci s'est toujours montré respectueux de l'opinion de la majorité des scientifiques, a été illustrée, en notre siècle, par T. Kuhn dans son livre célèbre *La Structure des révolutions scientifiques* (1962, trad. de l'américain L. Meyer, 2^e éd., 1970, Paris, Flammarion, 1983). C'est à T. Kuhn qu'on doit le mot de « paradigme » utilisé plus haut et qui désigne un mode d'explication autorisé par les succès d'une théorie dominante. Il en fut ainsi, on le sait, de la théorie de Newton, et, à certains égards en notre siècle, de la relativité d'Einstein. On peut concéder à Kuhn que le prestige d'une théorie est, en très grande part, dépendante de celui de son auteur ou du groupe scientifique qui se reconnaît en lui, quitte à l'interpréter à sa manière.

Mais le consensus d'un milieu scientifique ne peut durablement passer pour le critère de validité d'une théorie. Il ne pourrait en être ainsi que si les théories rivales étaient tellement étrangères les unes aux autres qu'elles se seraient « incommensurables », comme le prétendent Kuhn et ses disciples. Dans ce cas, chaque groupe scientifique tiendrait à ses représentations familiaires, comme chaque nation tient habituellement à sa langue et à son territoire. Mais il n'en a jamais été ainsi, sauf en des périodes de relative décadence. La connaissance scientifique se reconnaît, au contraire, comme c'est le mérite de Popper de l'avoir souligné, en sa capacité de « révolutions » qui ne sont pas destructrices des acquis antérieurs mais qui s'autorisent principalement, au contraire, de leur aptitude à réinterpréter l'acquis, tout en offrant des résultats nouveaux et en ouvrant de nouveaux horizons. Les périodes que Kuhn dit de « science normale » sont des périodes de stabilisation, non de progrès. Or il est essentiel à la science de progresser, même en des périodes où ce progrès ne semble pas décisif, ou, du moins, pas salué comme tel. Il faut parfois attendre longtemps pour que de nouvelles théories, plus compréhensives que les précédentes, s'imposent au milieu scientifique. La sociologie de ce milieu peut être utile à l'épistémologie, mais elle ne se confond pas avec cette dernière. Celle-ci doit être attentive aux progrès qui se font jour même en des périodes d'un certain piétinement théorique, comme semble l'être la fin du XX^e s. À la suite de

Popper et de Quine, mais sans se tenir aux positions, qui d'ailleurs ne se recouvrent pas, de ces deux auteurs, on examinera les grandes théories qui ont marqué notre siècle : la théorie des ensembles en mathématiques, la relativité et les quanta en physique, la théorie synthétique de l'évolution dans les sciences de la vie, les théories post-marxistes dans les sciences de l'homme et de la société. Même si ces différentes théories ont subi des refontes et semblent encore appelées à en subir, il apparaîtra qu'elles sont encore susceptibles d'intégrer les progrès de la recherche et de préparer des synthèses postérieures.

Les mathématiques et la théorie des ensembles

Dans ses *Remarques sur la formation de la théorie des ensembles*, J. Cavaillès a montré que cette théorie répondait aux besoins qu'avait fait naître le développement des mathématiques, et surtout de l'analyse, au XIX^e s., en particulier s'il s'agissait de la définition des nombres irrationnels, de la représentation des fonctions par des séries trigonométriques, ou de l'étude de la croissance des fonctions. Pour toutes ces questions, il fallait introduire la notion d'ensemble de points.

Cependant, comme l'a bien montré aussi J. Cavaillès, « il n'y a théorie des ensembles qu'à l'apparition non de notions, mais d'un mode de raisonnement original : tel est celui [dérivation d'un ensemble par rapport à un autre, l'ensemble dérivé contenant les points limites du premier – ajouté par H. Barreau] dont Cantor faisait pour la première fois usage en généralisant le théorème de Heine [sur la possibilité de représenter une fonction continue "en général" par une série trigonométrique – ajouté par H. Barreau] ; de lui – que l'on retrouvera sous le nom d'itération transfinitie – dépend une partie essentielle de l'édifice futur » (J. Cavaillès, « Remarques sur la formation de la théorie abstraite des ensembles », *Philosophie mathématique*, Paris, Hermann, 1962, p. 60).

Cet édifice s'est poursuivi, en effet, chez Cantor, en trois étapes : découverte et distinction de deux puissances (celle du dénombrable et celle du continu), exploration du continu, procédé de la diagonale. La puissance des entiers ou du dénombrable se révéla équivalente à celle des nombres rationnels et même des nombres algébriques. La puissance du continu est équivalente au produit de cette puissance par elle-même et ainsi indéfiniment. Pour l'exploration du continu la dérivation d'un ensemble par rapport à un autre semblait un procédé prometteur : c'est en étudiant la puissance des ensembles du deuxième genre (ceux pour lesquels la suite indéfinie des ensembles dérivés ne s'arrête pas) que Cantor inventa les nombres ordinaux transfinis et les ensembles fermés et parfaits. Cependant, Cantor ne put parvenir à identifier la puissance du continu à celle d'une classe bien déterminée d'ensembles dérivés. Le seul résultat relatif à ce problème fut obtenu par le procédé de la diagonale : l'ensemble des fonctions d'une variable a une puissance supérieure à l'ensemble des variations de son

argument ; on peut en déduire qu'il existe une puissance supérieure au dénombrable, et même une puissance supérieure au continu. Mais la puissance du continu resta elle-même imprécise, et les différentes façons d'aborder le problème sans lien entre elles.

Telles sont les origines intuitives de la théorie des ensembles. Elles n'aboutirent qu'à des fragments théoriques sur les propriétés cardinales et ordinales des ensembles. Pour embrasser ces questions d'une façon plus systématique et, si possible, plus décisive, comme pour échapper aux paradoxes qui étaient venus oblitérer le concept même d'ensemble, il fallait une théorie plus abstraite, la théorie axiomatique des ensembles, où les règles de formation des ensembles seraient définies formellement. C'est à une telle théorie que s'appliquèrent des mathématiciens au début du XX^e s., en particulier Zermelo et Fraenkel.

Cette théorie abstraite des ensembles, bien préparée par Dedekind, évite les paradoxes et situe bien les problèmes, mais elle ne les résout pas. Elle apporte un langage commun, et même quand elle dédouble ce langage (car à l'axiomatisation de Zermelo-Fraenkel s'ajouta bientôt celle de von Neumann-Bernays-Gödel) on peut montrer que ces deux langages sont équivalents, traduisibles l'un dans l'autre. Ces résultats sont impressionnants mais comportent d'étranges limites. D'un côté, on ne peut prouver leur non-contradiction, ce qui est insatisfaisant pour un système formel, dont la valeur réside dans ses possibilités d'application (comme en physique), non dans une évidence intrinsèque (comme pouvait s'en flatter la construction d'Euclide). D'un autre côté, l'indépendance des axiomes, si elle est la marque d'une bonne méthode axiomatique poursuivie depuis les mathématiciens grecs, peut révéler également une certaine faiblesse. On sait que la géométrie euclidienne a perdu sa splendide autorité depuis que l'indépendance du 5^e postulat d'Euclide ayant été prouvée des géométries non euclidiennes se sont constituées, qui ne sont pas restées sans emploi. Or, il est arrivé quelque chose de semblable à la théorie des ensembles. Les deux axiomes du choix et du bon ordre, dont Zermelo avait démontré la solidarité, peuvent être sans difficulté ajoutés ou retranchés des autres axiomes. En 1939, Gödel a montré que si on les ajoute aux autres axiomes, supposés non contradictoires, il n'en résulte aucune contradiction, et, en 1962, P. Cohen a montré que si on les retranche il n'en résulte non plus aucune contradiction. Et il en va de même pour l'hypothèse cantorienne du continu, qui posait que la puissance du continu était la puissance immédiatement supérieure à celle du dénombrable. La théorie des ensembles se trouve donc libérée des problèmes où Cantor l'avait engagée. Est-ce une faiblesse ou un avantage ?

Toute réponse à cette question présuppose qu'on se rende compte que formaliser une théorie ne consiste pas seulement à la rendre logiquement rigoureuse, en lui fournissant un langage canonique. C'est également la modifier et lui conférer une nouvelle objectivité, qui ne se confond pas avec l'ancienne. Sur ce point les

premiers intuitionnistes (Brouwer et ses premiers disciples) ainsi que Poincaré, qui reprochaient aux formalistes d'introduire de nouveaux êtres mathématiques qu'ils étaient incapables de contrôler, avaient parfaitement raison. Mais ils n'avaient pas raison de penser que ce manque de contrôle était irrémédiable : en réalité, la non-contradiction de l'arithmétique a pu être obtenue grâce au recours aux procédures transfinites, et c'est également grâce à de tels recours, matérialisés par l'emploi de fonctions récursives inventées par les intuitionnistes, qu'ont été obtenus les résultats précédents concernant la théorie des ensembles. Une métamathématique peut donc contrôler dans une certaine mesure la mathématique formalisée des ensembles. Cette situation signe en quelque sorte une réconciliation entre le formalisme et l'intuitionnisme.

Dans ces recherches métamathématiques, qui sont l'apanage des logiciens, les résultats ont été nombreux. Les plus instructifs sont ceux qui ont montré la non-catégoricité de la théorie des ensembles et de l'arithmétique, c'est-à-dire leur interprétation par des modèles non isomorphes. A. Robinson a pu montrer qu'un modèle non standard des nombres réels pouvait accueillir les infinitésimaux, jadis introduits à titre de « fictions utiles » par Leibniz, mais bannis par Cantor, qui ne pouvait les concilier avec l'analyse classique. E. Nelson a même proposé un système dit IST, dans lequel il suffit d'ajouter trois axiomes, dits d'idéalisation, de standardisation et de transfert (d'où l'appellation IST), aux axiomes de Zermelo-Fraenkel avec l'axiome de choix pour obtenir le même résultat, avec l'avantage non négligeable qu'il s'agit d'une extension syntaxique et non plus sémantique (comme modèle d'une structure formelle) du corps des nombres réels (E. Nelson, « Internal Set Theory », *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 83, n° 6, nov. 1977 ; trad. fr. J.M. Salanskis, « Théorie des Ensembles internes : une nouvelle approche de l'analyse non standard », *La Mathématique non standard histoire-philosophie-dossier scientifique*, H. Barreau & J. Harthong dir., Paris, Éd. du CNRS, 1989, p. 355-399). Ainsi la théorie axiomatique des ensembles, si l'on y adjoint le prédicat « standard » (et « non standard »), se révèle plus accueillante que ne l'était la théorie sous sa forme naïve. Faut-il en conclure qu'elle offrira dorénavant des fondements, sinon totalement assurés, du moins suffisamment « commodes » aux mathématiciens ? On sait que la théorie des catégories et des *topoi*, qui fait un usage plus général de l'idée de fonction, semble déjà prête à prendre la relève. Face à une situation qui reste controversée, il semble légitime de se référer aux conclusions prémonitoires par lesquelles J. Cavaillès achevait ses *Remarques* et les valorisait par des considérations qui restent toujours actuelles : « Rejeter ou fonder une théorie n'est pas travail définitif, ni dépourvu de degrés ; surtout, comme pour les considérations d'unité, il ne peut s'opérer par simple investigation logique. Si les axiomatiques [de la théorie des ensembles – ajouté par H. Barreau] semblent dissocier deux théories : équivalence, nombres ordinaux [et

peut-être une troisième où serait étudié le problème du continu – c'est maintenant réalisé – ajouté par H. Barreau], dont la sécurité va décroissant, les considérations pragmatistes du mathématicien militant ont le dernier mot » (*op. cit.*, p. 164). En mathématiques aussi, les théories seraient donc représentatives et non explicatives. Elles sont au service d'une compréhension de plus en plus profonde du domaine étudié.

La physique et la théorie quantique

En même temps que les mathématiques opéraient un progrès décisif en passant de l'intuitif au formel, il en allait de même en physique. C'est vrai pour la théorie de la relativité, où l'espace-temps, plat ou courbe, n'a rien d'intuitif et manifeste seulement une équivalence métrique entre l'espace et le temps, qui ne repose expérimentalement que sur l'invariance constatée de la vitesse de la lumière, quel que soit le mouvement de sa source, et quel que soit le repère matériel d'où elle est mesurée. Cette théorie offre le cadre indispensable pour toutes les mesures expérimentales, spécialement quand les mouvements des particules mesurées s'approchent de la vitesse de la lumière. On évite de lui donner une signification ontologique déniait le devenir quand on constate qu'appliquée à l'Univers dans son ensemble elle a donné naissance à la cosmologie moderne, selon laquelle l'expansion spatio-temporelle de l'Univers lui-même est fonction du temps cosmique.

Ainsi la réalité physique n'est pas dépourvue du devenir, dont la privait, alliée au déterminisme de la physique classique, une conception de l'Univers qui le considérait comme vraiment étendu dans ses quatre dimensions. Mais ce n'est pas pour garder, du moins à l'échelle microphysique, la signification intuitive d'un processus qui se déroule de façon continue. La théorie quantique substitue aujourd'hui à cette signification un mode de déroulement qui est considéré comme la base de tout processus matériel de nature physico-chimique. D'une façon encore semi-intuitive, N. Bohr, l'inventeur de la théorie, considérait qu'à l'échelle microphysique, qui commence à l'atome, un processus physique est soumis à l'évolution de la fonction d'onde ψ régie par l'équation de Schrödinger (qui permet de calculer des probabilités vérifiées par des fréquences empiriquement constatées) et qu'il subit, lors d'une mesure, « la réduction de la fonction d'onde ». C'est-à-dire qu'il prend instantanément l'une des valeurs possibles, à partir de laquelle une évolution conforme à l'équation de Schrödinger recommence. D'un point de vue pragmatique, cette manière de voir ne conduit à aucune contradiction avec l'expérience, mais il a été possible récemment de la raffiner du point de vue théorique.

Pourquoi un tel raffinement est-il souhaitable et même nécessaire ? Parce que ce mode d'exposition dissocie les systèmes classiques (les appareils de mesure) et les systèmes quantiques (qui sont soumis aux mesures) et que cette dissociation, si utile soit-elle, n'est pas satisfaisante d'un point de vue théorique : les systèmes classiques sont aussi des systèmes

quantiques, puisqu'ils sont formés d'atomes, et qu'aucune règle de la théorie de Bohr ne permet de dire à partir de quelle grandeur et pourquoi un système suffisamment « gros » devient classique et soumis, comme nos appareils de mesure, aux lois de la physique classique. Dans la pratique, il faut dissocier les deux physiques, mais les dissocier dans la théorie conduit à des contradictions, parmi lesquelles on peut compter le fameux « principe de complémentarité » selon lequel, d'après la question qui lui est posée, un système quantique se comporte soit comme une onde, soit comme un corpuscule. Or, on a de bonnes raisons de penser qu'un système quantique n'est ni l'une ni l'autre. Il faut donc trouver une autre façon d'exprimer son étrange comportement, et le comportement plus simple des systèmes classiques.

Comment donc sauver l'idéal théorique de la physique, tout en restant en accord avec l'expérience, telle qu'elle nous est livrée par nos appareils de mesure ? La critique contemporaine a fourni pour ce faire deux concepts qui fournissent l'interprétation de la théorie quantique qui tend à prévaloir.

Le premier concept est celui d'histoire cohérente (Griffiths, 1984). Il consiste à fournir du devenir d'un système quantique un récit conforme à la fois aux faits, que les appareils de mesure permettent d'établir, et aux probabilités, que les solutions de l'équation de Schrödinger permettent de calculer. Dans cette perspective, la logique quantique, à laquelle doit se conformer toute histoire sensée, dépend des probabilités quantiques et notamment des règles de non-commutation entre des quantités conjuguées, comme le sont la position et la vitesse d'une particule (relation d'indétermination, ou de dispersion, découverte par Heisenberg). La condition d'additivité des probabilités restreint considérablement la classe des histoires concevables. Par exemple, dans une expérience d'interférométrie, on peut imaginer de façon très diverse, selon les points d'impacts possibles d'un photon sur un écran, l'histoire future de ce photon ; mais ce qui contredit la règle d'additivité des probabilités, c'est d'imaginer que le photon passe par un bras de l'interféromètre plutôt que par l'autre. Cette dernière histoire est inconcevable et donc à exclure.

Le deuxième concept est celui de décohérence (Zurek, 1982). On sait qu'un concept essentiel de la théorie quantique est celui d'interférence ou de superposition des états. Les solutions possibles de l'équation de Schrödinger, dans un cas particulier, sont des interférences ; cette situation a donné lieu au paradoxe soulevé par Schrödinger lui-même, selon lequel un chat enfermé avec une source radioactive à effet mortel est à la fois mort et vivant, avant qu'un observateur, ouvrant la prison où il se trouve, le découvre soit mort soit vivant. D'où le rôle magique attribué à l'observateur dans certaines interprétations de la théorie. D'après la théorie de la décohérence, de telles interprétations sont exclues. Toutes les interférences entre deux états macroscopiquement distincts disparaissent

très rapidement, dès qu'un système est suffisamment grand (composé d'un certain nombre d'atomes). Voilà donc en quoi consisterait la fameuse « réduction de la fonction d'onde » imaginée par les premiers théoriciens quantiques et le caractère important toujours reconnu à l'opération de mesure. La décohérence se produit dans l'appareil lui-même, puisque ce dernier est macroscopique. La théorie contemporaine de la mesure assure que le fait (ou la « donnée ») et le résultat pour l'objet quantique sont logiquement équivalents. On sait pourquoi on passe du quantique au classique et inversement. Et l'on sait aussi pourquoi on passe d'un probabilisme essentiel quantique à un déterminisme classique. En effet, dans un système classique, les interférences sont détruites et la probabilité d'un « effet tunnel » (où l'on passe d'un état quantique à un autre sans transition) pratiquement réduite à 0 : d'où l'émergence du déterminisme. C'est le probabilisme qui explique le déterminisme et non l'inverse. Mais comment se fait-il qu'au niveau microscopique une probabilité seule se réalise, au détriment des autres ? Cela, qui peut passer pour du hasard essentiel, la théorie physique ne l'explique pas. C'est ce que R. Omnès (1994) appelle la « béance ». Une nouvelle fois, la théorie physique est représentative et non explicative.

L'évolution des espèces et les théories néodarwinienne

En ce qui concerne les sciences de la vie, l'œuvre du XIX^e s. a été considérable. Elle a mis, en particulier, en évidence que les formes d'existence et de structure des individus vivants ne sont pas fixes, mais qu'elles procèdent les unes des autres selon des mécanismes qu'il est difficile d'étudier dans leur détail. Au XX^e s., ce type de questions a été étendu aux organisations de la matière non vivante, et des difficultés semblables sont apparues dans le champ de la cosmogénèse. Quand des formes de complexité croissante apparaissent on peut montrer *a posteriori* qu'elles étaient possibles, voire probables, mais on ne peut montrer, du moins jusqu'à plus ample informé, qu'elles étaient nécessaires.

Les inventeurs de la théorie scientifique de l'évolution des espèces sont Lamarck et Darwin. Ils ont cherché dans la classification des espèces vivantes (lesquelles jouent ici un rôle analogue à celui qui tiennent les lois dans une théorie physique) le dessin de l'arbre de la vie, c'est-à-dire à la fois des marques et des preuves d'un processus évolutif dont le caractère globalement progressif ne pouvait leur échapper. Ce caractère a été attribué, par le premier, à la capacité d'apprentissage des êtres vivants et, par le second, au pouvoir sélectif du milieu, qui donne leurs chances aux formes les plus viables tant pour la conquête de ce milieu que pour la reproduction. L'impossibilité, maintes fois constatée, de mettre en évidence l'hérédité de l'acquis a condamné le lamarckisme et a poussé les biologistes à tenter d'expliquer l'évolution des espèces par le couple des facteurs retenus par Darwin et ses successeurs : mutation/sélection.

Le premier défi porté à la théorie darwinienne de l'évolution des espèces vivantes a été la découverte faite par Mendel, et refaite par trois botanistes du début du XX^e s. (H. de Vries, C. Correns, E. Tschermak), des lois de l'hérédité. Ces lois confirmaient la découverte faite par Weismann, à la fin du siècle précédent, de la distinction à respecter entre le *soma* (cellules du corps en général) et le *germen* (cellules reproductrices ou gamètes), distinction qui n'était certes pas favorable à l'hérédité de l'acquis. Mais elles manifestaient, en outre, la disjonction entre les sexes et l'indépendance des caractères héréditaires apparents, dont les facteurs biologiques reçurent le nom de gènes, et qui furent localisés dans les chromosomes constituant le noyau des gamètes. C'est à l'école de T.H. Morgan qu'on doit la théorie chromosomique de l'hérédité qui se développa durant la première moitié du XX^e s., grâce aux expériences faites sur la drosophile. La mutation des gènes ne constituait-elle pas le facteur principal de l'évolution des espèces ?

À ce développement théorique, la théorie néodarwiniste sut répondre en proposant ce qu'il est convenu d'appeler la théorie synthétique de l'évolution. Son promoteur fut J.S. Huxley (1887-1975), et ses principaux représentants le généticien des populations R.A. Fisher, le paléontologiste G.G. Simpson, et le naturaliste E. Mayr. D'après cette théorie les mutations sont évidemment nécessaires, mais ce n'est pas le facteur principal de l'évolution ; ce dernier reste la sélection naturelle, responsable de la direction que prend l'évolution comme du maintien d'une stabilité spécifique quand une adaptation suffisante est atteinte. Cette théorie, encore prépondérante chez la plupart des biologistes, constitue, selon le mot de son fondateur, « la revanche du darwinisme ».

Cependant, de nouvelles difficultés surgirent avec l'apparition, dans la deuxième moitié du XX^e s., de la génétique moléculaire, qui permet d'identifier les mécanismes moléculaires qui commandent la régulation du *soma* par le germen et restreint l'action de la sélection naturelle au phénotype, qui n'a pas d'influence sur le génotype. Alors que Jacques Monod voyait encore une nécessité dans le tri qu'opère la sélection du milieu (mais de quelle nécessité s'agit-il quand on ne peut exhiber aucune loi ?), la plupart des généticiens y voient un pur hasard. C'est le cas en particulier des partisans de la théorie dite des équilibres ponctués (N. Eldredge et S.S. Gould), selon laquelle l'apparition d'une nouvelle espèce est due non à des modifications continues du génome (gradualisme) mais à l'isolement d'une population marginale qui a trouvé une niche écologique favorable. L'évolution se produit par bonds successifs et n'est pas synonyme de progrès. Les bactéries ne cessent pas d'être la forme dominante de la vie.

À cette théorie s'est rallié le biologiste moléculaire F. Jacob, non sans y apporter des éléments qui menacent, semble-t-il, l'orthodoxie néodarwinienne. Les mutations s'opèrent, selon lui, d'après deux principes,

dont l'un concerne la création de molécules nouvelles, l'autre leur sélection. La création se fait par duplication de segments d'ADN (acide désoxyribonucléique qui constitue l'essentiel des chromosomes) ou de gènes entiers. La sélection s'opère par réassortiment de fragments préexistants et formation de gènes dits mosaïques (avec exons codant la formation des protéines et introns non codants). Tels seraient les deux modes du « bricolage moléculaire ». Le terme de bricolage, emprunté à C. Lévi-Strauss, suggère que la vie opère non comme un « ingénieur » qui fabrique des machines mais comme un « bricoleur » qui invente des mythes. Cette analogie rend compte de la façon, déconcertante pour un esprit scientifique moderne, dont s'opère la création d'organes, de fonctions et d'espèces. Mais elle est plus favorable à un vitalisme, ou même à un finalisme, qu'à un matérialisme de type darwinien. À quoi peut conduire de viable un « bricolage », s'il n'est soutenu par aucune « idée » ? Le mathématicien M. Schützenberger a montré combien il est invraisemblable d'assimiler les vivants à des systèmes cybernétiques d'« auto-adaptation ».

Les difficultés auxquelles se heurtent les théories néodarwinienne proviennent sans doute du fait qu'elles n'ont pas renoncé à être « explicatives », faute d'être facilement « représentatives » ; en l'absence de lois biologiques ayant une portée suffisamment générale. Pourtant, quand M. Delsol défend le néodarwinisme (avec gradualisme) à l'aide de vingt propositions qui résument l'effort accompli par les synthéticiens et rattachent l'une à l'autre différentes théories partielles par un effet de « puzzle » ; l'impression naît qu'il s'agit, dans la théorie synthétique, de prendre en compte toutes les données de la biologie, plutôt que de les subordonner à des principes dont l'interprétation n'est guère contraignante. La portée des principes darwinien, frappante à l'origine, est devenue assez floue. On ne sait s'ils seraient plutôt renforcés qu'infirmez dans une vision plus générale de l'évolution, qui prendrait en compte l'évolution cosmique. Si cette théorie faisait appel au « principe anthropique », selon lequel la présence de l'homme dans l'Univers est un élément capital de son évolution, alors le darwinisme serait supplanté. Si, en revanche, l'évolution de la matière répondait grossièrement au schéma darwinien, alors le darwinisme serait magnifié. Ne faudrait-il pas reconnaître, dans l'un et l'autre cas, que l'explication serait plus métaphysique que physique et qu'une telle théorie n'aiderait guère la science à progresser, ce qui serait contraire à ce que les scientifiques du moins attendent d'une théorie ? À moins que les difficultés de l'application du néodarwinisme soient clairement identifiées dans des cas particuliers. Ainsi J. Eccles n'a vu d'explication raisonnable au développement du cerveau dans la famille des hominidés que par recours au principe anthropique. Ce n'est que par l'accumulation de difficultés particulières qu'une théorie donne des signes d'épuisement et se trouve obligée de subordonner sa part de vérité à une théorie plus générale où cette part reçoit une interprétation rectifiée.

L'histoire humaine et les théories post-marxistes

Ce qui a entraîné la faillite de la théorie marxiste de l'Histoire, c'est d'abord que la prédiction qu'elle avait faite que la révolution prolétarienne devait se produire dans les pays les plus industrialisés ne s'est pas réalisée, et ensuite que cette révolution ayant éclaté en Russie, la doctrine marxiste-léniniste qui s'en est prévaluée s'est mise elle-même à l'abri de toute réfutation, s'érigeant en doctrine totalitaire d'État, et persécutant toute opposition. Dans ces conditions, les tenants de cette doctrine ne pouvaient éviter de commettre, outre des fautes morales, des erreurs scientifiques (affaire Lyssenko), préludes à un échec économique et à un effondrement politique.

Faut-il en tirer la leçon que c'est folie de prétendre expliquer l'histoire humaine ? Il y a des siècles pourtant que la religion et la philosophie, alliées ou rivales, ne cessent de s'y employer. L'homme perdrait sans doute toute espérance et toute détermination dans l'action s'il cessait de s'inspirer d'une tradition reçue et/ou d'un idéal entrevu.

Mais alors quel peut être le rôle d'une théorie scientifique relative au monde humain ? Un siècle au moins d'efforts entrepris en ce domaine montre qu'il peut exister, outre des sciences particulières qui ne cessent de se multiplier comme dans les sciences de la nature, une théorie économique, une théorie politique, une théorie morale ou éthique, une théorie de la religion, ou théologie. Ces différentes théories sont soumises à la discussion entre experts concernés, comme le sont tous les hommes à un certain degré. Elles ne peuvent être crédibles, semble-t-il, que si chacune d'entre elles reconnaît l'existence des autres et, sans prétendre les remplacer, leur assigne certaines fonctions dans sa propre perspective.

La difficulté propre à une théorie concernant le monde humain, c'est que ce dernier est un monde d'activités et de valeurs (on pourrait ajouter de passions). Ceux qui ne perçoivent pas l'intérêt de ces activités et de ces valeurs sont mal placés pour juger de la validité d'une théorie qui s'y rapporte. Mais, d'autre part, sitôt qu'on est intéressé à l'une de ces sphères de l'activité humaine (où l'on devrait inclure l'art et les loisirs), c'est spontanément qu'on adopte une théorie à son égard. Il y a donc inflation de théories plutôt que pénurie. La compétition qui s'exerce entre elles n'est pas près de s'éteindre.

L'épistémologie ne peut que constater cette situation, qui tranche avec l'idéal principalement spéculatif rencontré dans les autres domaines de la science. Dans les sciences de l'homme et de la société, l'intérêt pratique prédomine, comme Marx lui-même l'avait bien vu, et comme ses successeurs auraient dû le comprendre, tout en distinguant, mieux que lui sans doute, les différents intérêts auxquels l'homme tend à s'identifier, et dont l'articulation en chacun dépend de sa personnalité, non de la théorie.

► BARREAU H. & HARTHONG J. dir. *La Mathématique non standard histoire-philosophie-dossier scientifique*, Paris, Éd.

du CNRS, 1989. — CAVAILLÈS J., « Remarques sur la formation de la théorie des ensembles », *Philosophie mathématique*, Paris, Hermann, 1962, p. 25-176. — DELSOL M., *L'évolution biologique en vingt propositions*, Paris, Vrin, 1991. — DUHEM P., *La Théorie Physique son objet - sa structure*, 2^e éd. revue et augm., repr. fac-similé avec avant-propos, index et bibliogr. P. Brouzeng, Paris, Vrin, 1981. — ECCLES J., *Évolution du cerveau et création de la conscience* (1989), trad. de l'angl. J.M. Lucioni, Paris, Fayard, 1992. — GRIFFITHS R.B., *J. Stat. Phys.*, 36, 219, 1984. — JACOB J., *La souris, la mouche et l'homme*, Paris, Odile Jacob, 1997. — OMNÈS R., *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton Univ. Press, 1994; *Philosophie de la science contemporaine*, Paris, Gallimard, 1994. — POPPER K.R., *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1984. — SCHÜTZENBERGER M.P., « Systèmes auto-adaptatifs. Théorie et Pratique », *Hommage au Professeur Pierre-Paul Grassé*, Paris, Masson, 1987. — ZUREK W.H., *Phys. Rev.*, D 26, 1862, 1982.

Hervé BARREAU

→ Continuité ; Conventionalisme ; Corroboration ; Fait ; Lysenkisme ; Modèle ; Objectivité ; Paradigme ; Parcimonie ; Rationalisme ; Réfutabilité ; Révolution scientifique ; Test.

TOPOLOGIE

MATHÉMATIQUES

Leibniz et l'analysis situs

Leibniz est l'une des grandes figures de la logique mathématique. Il a, parmi les premiers, remis à l'ordre du jour la lecture d'Euclide et l'étude des problèmes de fondements (Leibniz, *In Euclidis ΠΡΩΤΑ, Mathematische Schriften*, éd. Gerhardt, 1858, Hildesheim, G. Olms Verlag, 1971). Ces travaux sont à reconduire à l'un des motifs dominants de l'œuvre leibnizienne, qui frappe à la fois par sa dispersion thématique et sa cohérence architectonique : la recherche d'une langue universelle et d'une écriture rationnelle. « Son véritable usage serait de peindre non pas la parole, mais les pensées, et de parler à l'entendement plutôt qu'aux yeux. Car si nous l'avions telle que je la conçois, nous pourrions raisonner en métaphysique et en morale à peu près comme en géométrie et en analyse » (Leibniz, Lettre à Galloys, 1677, *op. cit.*).

Au-delà de l'analogie facile et de portée limitée avec Spinoza, il faut surtout se tourner vers les mathématiques et la méthode cartésiennes pour comprendre les motivations leibniziennes. L'algèbre de Viète et Descartes est selon lui un détour du point de vue de la pure géométrie ; ses voies ne sont ni les plus courtes ni les plus naturelles et, par-dessus tout, ses calculs, s'ils conduisent aux résultats voulus, n'éclairent pas l'esprit en chemin. Aussi est-il en quête d'une langue universelle, une caractéristique dans sa terminologie, qui dans le contexte de la géométrie aurait l'efficacité de l'algèbre tout en restant fidèle à l'intuition : chaque calcul, chaque argument de cette caractéristique géométrique devrait désigner à l'esprit les opérations correspondantes sur les objets considérés. Une lettre à Huygens du 8 septembre 1679 précise encore ce

projet : « Je crois qu'il nous faut encore une autre analyse proprement géométrique ou linéaire, qui nous exprime directement *situm*, comme l'Algèbre exprime *magnitudinem* » (Leibniz, *op. cit.*). C'est que pour Leibniz l'algèbre exprime la quantité, l'expression de la qualité ou de la forme restant à inventer. « *Figura in universum praeter quantitatem continet qualitatem seu formam* » (Leibniz, *Characteristica geometrica, op. cit.*). On remarquera au passage l'extrême classicisme philosophique de la distinction quantité/forme, et la façon dont Leibniz se l'approprie pour ébaucher le programme d'un calcul des positions, une *analysis situs*.

Il n'ira pas très loin dans la formalisation de cette nouvelle géométrie. Plusieurs textes esquissent un calcul où sont mises en avant autant d'idées qui, bien que réminiscentes de la géométrie grecque, sont trop en avance sur leur temps pour trouver application : congruences géométriques, équivalences par translations et déplacements, similitudes homothétiques... (Leibniz, *Characteristica geometrica, op. cit.*). Le projet leibnizien proprement dit en est resté là, mais l'idée qui le sous-tend, celle d'un calcul qui n'exprime plus les qualités mais les formes et les situations géométriques, va parcourir l'histoire. Grassmann y verra l'ébauche de son calcul vectoriel (Grassmann, *Geometrische Analyse geknüpft an die von Leibniz erfundene geometrische Charakteristik*, Leipzig, 1847), mais c'est avant tout comme anticipation de la topologie moderne qu'est restée l'*analysis situs*, même si Leibniz n'avait manifestement pas en vue ce que le terme de « topologie » recouvre aujourd'hui techniquement mais simplement la vision prémonitoire et très vague d'une géométrie qualitative.

Le terme d'*analysis situs* et ses avatars idiomatiques (géométrie de situation ou de position selon les auteurs, à distinguer de la géométrie de position de Carnot) vont être adoptés, après Leibniz, par la communauté mathématique pour désigner de façon assez générale les problèmes de géométrie non quantitative : « Outre cette partie de la géométrie qui traite des grandeurs... il en est une autre, jusqu'à nos jours complètement inconnue, dont Leibniz a fait le premier mention et qu'il appelle géométrie de position... mais il n'est pas encore bien établi quels sont les problèmes appartenant à cette géométrie et quelle méthode il faut employer pour les résoudre » (Euler, *Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*, 1736). « Comme le terme de géométrie ne peut décemment caractériser une science d'où les notions de mesure et d'extension sont exclues », le mot « topologie » est créé à partir du mot grec *topos* (lieu) par Listing en 1836 pour suppléer à la terminologie leibnizienne. Le choix est heureux et va s'imposer après Poincaré, qui, pour sa part, préférera encore parler dans ses travaux d'*analysis situs*.

Il faut encore signaler une équivoque malheureuse. Le terme topologie recouvre aujourd'hui deux disciplines mathématiques de contenus et d'orientations sensiblement distincts : la topologie générale,

intimement liée à l'analyse et en particulier à l'analyse fonctionnelle, et la topologie algébrique, dont l'objet se rapproche plus directement du projet leibnizien. Enfin, une topologie est également une structure ensembliste particulière, où l'on distingue des familles de sous-ensembles (ouverts et fermés) devant satisfaire à certains axiomes. C'est généralement sous cette acception, le plus souvent au sein de cours d'analyse et donc majoritairement dans l'esprit de la topologie générale, que le terme « topologie » apparaît d'abord dans l'enseignement supérieur, l'introduction d'une topologie sur les espaces vectoriels réels étant le préalable nécessaire à l'étude des fonctions d'une ou plusieurs variables réelles.

Un cas d'école : la formule d'Euler

C'est dans le texte d'Euler de 1736 cité précédemment qu'apparaissent pour la première fois des résultats effectifs en *analysis situs*, obtenus consciemment comme tels. L'objet de l'étude est le célèbre problème des ponts de Königsberg : il s'agit de déterminer si l'on peut réussir à traverser une fois et une seule chacun des sept ponts du fleuve, leur configuration étant d'un type particulier, le fleuve se partageant en deux bras et contenant une île, le Kneiphof. Euler résout le problème de manière générale, quelles que soient « la figure du fleuve et sa distribution en bras, et quel que soit aussi le nombre de ponts ».

Un autre résultat d'Euler, sur lequel il convient de s'attarder en raison du rôle qu'il devait jouer dans la philosophie mathématique, allait avoir une fonction déterminante dans la constitution de la topologie : il s'agit de la formule $s - a + f = 2$ reliant le nombre s des sommets, le nombre a des arêtes et le nombre f des faces d'un polyèdre. Une querelle de priorité entoure cette identité : dans une étude de Descartes, *De Solidorum Elementis*, dont le manuscrit a été perdu mais publié en 1859 à partir d'une copie découverte parmi les papiers de Leibniz, se trouvent des résultats qui impliquent de manière immédiate la formule d'Euler. Cela a conduit de Jonquières (1890) à attribuer à Descartes la paternité de la découverte, à quoi de nombreux commentateurs ont répondu que Descartes n'ayant pas formulé l'identité est tout simplement « passé à côté ». De fait, il semble probable que Descartes, qui avait le résultat à portée de main, n'ait tout simplement pas conçu, contrairement à Euler, l'utilité d'explicitier pour elles-mêmes des relations combinatoires entre sommets, faces et arêtes d'un polyèdre.

Il faudrait décider, pour trancher la querelle, si, dans un tel cas de figure, un théorème doit être attribué au mathématicien ayant techniquement démontré un résultat ou à celui qui, le premier, a su le formuler dans une situation où il prend toute sa signification. Le débat est beaucoup moins anodin qu'il n'y paraît, car le nombre de résultats ainsi « redécouverts » est loin d'être négligeable et leur attribution est souvent hasardeuse. J.-C. Pont (*La Topologie algébrique des origines à Poincaré*, Paris, PUF, 1974), qui consacre

plusieurs pages au cas de la formule d'Euler et prend parti contre de Jonquières, rapporte à ce sujet une remarque de J. Hadamard : « Deux théorèmes importants pour le sujet étaient des conséquences si évidentes et immédiates des idées qui étaient contenues [dans mon travail de thèse] que, des années plus tard, d'autres auteurs me les attribuèrent et je fus obligé d'avouer que, si évidents fussent-ils, je ne les avais pas vus. » C'est qu'un résultat, indépendamment de sa teneur conceptuelle, est d'abord formulé – au moins chez les grands mathématiciens – pour répondre à une attente et un questionnement préalable. La conduite de Descartes est à ce propos exemplaire, peut-être parce qu'il était plus soucieux de méthode que de résultats. Il signale souvent, en particulier à propos de sa *Géométrie* (1637), qu'il laisse à chacun le soin de développer les détails qu'il estime devoir l'être, allant quant à lui droit à ce qu'il estime être l'essentiel.

Quoi qu'il en soit, une des raisons du rôle clé joué par la formule de (Descartes-) Euler dans l'histoire de l'*analysis situs* est... son caractère erroné sous la forme qu'elle prend dans les travaux d'Euler. Aussi bien la démonstration qu'il en donne en 1751 que son énoncé même ne valent pas sans modifications notables. La formule vaut en tout cas pour tous les polyèdres convexes mais, même dans ce cas, la preuve d'Euler nécessite certaines adaptations pour devenir correcte, comme devait le remarquer Lebesgue, dans un article au *Bulletin de la Société Mathématique de France...* en 1924 !

La définition correcte du concept de polyèdre allait occuper des générations de mathématiciens. Plusieurs traités détaillent cette histoire : Dehn-Heegard, *Analysis situs* (Enzykl. Math. Wiss. III, Leipzig, Teubner, 1907) ; J.-C. Pont, *op. cit.* ; mais aussi I. Lakatos, *Proofs and refutations* (Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1976 ; trad. fr. *Preuves et réfutations, essai sur la logique de la découverte mathématique*, Paris, Hermann, 1984).

Toujours sous l'hypothèse restrictive que les polyèdres considérés sont convexes, Legendre donna en 1794 une démonstration exogène mais très élégante du théorème en le reconduisant à un problème de géométrie sphérique. De manière emblématique, Cauchy, pourtant célèbre pour sa rigueur (il sut munir de fondements solides l'analyse infinitésimale), devait proposer en 1811 une démonstration souffrant des défauts de la preuve originale d'Euler : l'absence de précision quant aux concepts géométriques utilisés et un recours abusif à l'intuition. En 1813, Lhuillier allait mettre (enfin !) l'accent sur les exceptions à la formule, inaugurant en la matière la construction de contre-exemples ou « monstres », mais il faudra attendre la *Geometrie der Lage* de von Staudt (1847) pour que soient précisées de manière satisfaisante les hypothèses que doivent vérifier les polyèdres pour que la formule soit valable. L. Schläfli allait ensuite étendre ces idées aux polyèdres de dimensions supérieures, non sans quelques imprécisions, avant que Poincaré ne

découvrit l'homologie, qui a permis de donner une forme définitive et achevée à ces divers résultats.

La formule d'Euler, en raison des aléas de sa formulation et de sa démonstration, apparaît aujourd'hui comme un cas d'école pour l'histoire et la philosophie des sciences. Il s'agit d'un résultat fondamental, d'un énoncé élémentaire, et, ce qui est assez exceptionnel, facilement testable sur ces objets que sont les cubes, pyramides et autres polyèdres familiers. La longue absence d'une preuve satisfaisante semble rétrospectivement due au défaut d'une définition satisfaisante des objets considérés plutôt qu'à une quelconque difficulté technique. Quant à ce défaut, il apparaît résulter d'un vide prospectif : longtemps personne n'a compris l'intérêt qu'il pouvait y avoir à donner une formulation rigoureuse et systématique au concept intuitif de polyèdre. C'est d'ailleurs ce caractère intuitif des objets et des constructions considérées qui a grevé ces questions de tant d'incertitudes. Pour la géométrie de situation, le tournant de la rigueur et le rejet du seul recours à l'intuition ne devaient en fait s'accomplir que très tard – après les travaux de Poincaré.

Les *Preuves et réfutations*, œuvre clé de Lakatos, ont voulu donner un statut paradigmatique à la laborieuse histoire de la formule d'Euler. Formé à l'école du falsificationnisme de Popper, le rationalisme critique de Lakatos insiste sur le rôle fondamental de l'erreur et de la contingence dans le développement de la pensée scientifique. Ses travaux jouent un rôle fondamental dans les tentatives contemporaines de renouveau de la pédagogie mathématique, où l'influence directe du style de pensée des *Preuves et réfutations* est souvent manifeste. Lakatos y met en œuvre de nombreux concepts développés plus explicitement à l'occasion d'articles (édités dans ses œuvres complètes). Ainsi de la notion discutée de reconstruction rationnelle, dont les premiers traits se trouvent chez Carnap et qui prend chez Lakatos la forme de la substitution d'une histoire idéalisée des progrès de l'esprit à l'histoire imparfaite du devenir effectif des concepts scientifiques (Lakatos, *Histoire et méthodologie des sciences*, Paris, PUF, 1994). La plupart de ses thèses pourtant, lorsqu'elles sont formulées sans souci de polémique, ne peuvent qu'entraîner de prime abord l'adhésion. Le premier travail de découverte est conjectural ; les ressorts des phénomènes se saisissent sur des exemples simples et intuitifs, mais les résultats ainsi escomptés peuvent s'avérer ne pas être valables dans des situations plus complexes dont il faut alors comprendre le fonctionnement au long d'une progression difficile et hasardeuse. L'histoire de la formule de Descartes-Euler semble étayer parfaitement une telle théorie de la découverte scientifique.

Il faut cependant tempérer par un certain nombre de critiques l'enthousiasme que peut procurer la lecture de Lakatos et cette idée que le rationalisme austère des mathématiques modernes doit s'accommoder de flottements et pactiser avec la poésie de l'incertitude pour être authentiquement créatif. L'ensemble de l'histoire des mathématiques doit servir de pierre de touche à sa

théorie de la science. L'exemple qu'il choisit, la topologie avant Poincaré, est trompeur, car il concerne la préhistoire d'une théorie et donc un moment très particulier et atypique d'un point de vue méthodologique. Peut-être faut-il avant tout reprocher à Lakatos de manquer de la pratique de la recherche mathématique nécessaire pour aller au cœur du processus de création. Le modèle qu'il en propose, un dialogue constructif entre les élèves et leur maître, a ce défaut qu'il opère de manière dialectique à partir de concepts déjà formulés dont il s'agit de tester la validité, alors que l'invention et la découverte se jouent, en deçà de toute expression orale ou écrite, dans le travail individuel des concepts et des intuitions. Seules peuvent en rendre compte les théories de la connaissance qui prennent en compte la phénoménalité de la pensée. Il convient également de mettre en garde contre une certaine lecture de Lakatos qui néglige de prendre en compte ce qu'a de fortement idéalisé et donc de trompeur la discussion engagée autour de la formule d'Euler dans les *Preuves et réfutations* : il s'agit bien d'une reconstruction rationnelle d'un processus historique et en aucun cas d'un dialogue susceptible de se produire réellement dans une salle de cours ! Là encore, il convient d'être vigilant car le risque est manifeste d'une instrumentalisation de l'histoire des sciences. On pourra lire l'introduction très polémique à la traduction française de l'ouvrage pour avoir une idée du combat engagé aujourd'hui à partir des conceptions de Lakatos contre des prises de position plus classiques quant à la nature de l'activité mathématique. Parmi ces dernières, on retiendra surtout cette analyse de J. Dieudonné, qui soutient la thèse d'une spécificité du résultat d'Euler pour l'histoire des sciences : « J'ai dit plus haut les difficultés rencontrées pour dégager certaines notions nouvelles ; dans certains cas cette lente maturation s'est accompagnée de tâtonnements et d'incertitudes [...] Récemment, certains philosophes se sont portés à un autre extrême et ont voulu voir dans ces tâtonnements la démarche constante de toute la mathématique ; c'est la thèse qui a été notamment soutenue par I. Lakatos, dans un livre, *Proofs and refutations*, qui a eu dans les milieux philosophiques s'occupant de sciences un succès qui paraît fort étrange à un mathématicien professionnel. L'auteur y prend un exemple assez singulier à tous égards, le théorème d'Euler... » (J. Dieudonné, *Les Grandes Lignes de l'évolution des mathématiques*. Villeneuve, IREM, Paris-Nord, 1980). Dieudonné insiste également sur l'inadéquation des analyses de Lakatos à la pratique mathématique moderne, où ont fini par s'imposer des critères de rigueur et des méthodes qui devraient rendre impossibles autrement que marginalement ces incertitudes quant à la nature des objets étudiés ou la validité des théorèmes démontrés que l'on peut rencontrer dans les débuts de l'*analysis situs*.

La topologie générale

La topologie générale naît, on l'a dit, de problèmes analytiques : notion de limite, construction et

propriétés de l'ensemble des nombres réels, analyse fonctionnelle, calcul des variations. Les premiers résultats significatifs de la théorie renvoient à la formalisation du concept de limite d'une suite de nombres réels et de continuité d'une fonction d'une ou plusieurs variables réelles. S'il faut citer Gauss et Bolzano, c'est Cauchy dans son célèbre *Cours d'analyse* (1821) qui met vraiment en place les notions fondamentales. Abel et Weierstrass devaient ensuite compléter les travaux de Cauchy et rectifier une de ses erreurs restée célèbre en élucidant les propriétés liées à la convergence des séries de fonctions. Au mouvement de remise en question des fondements de l'analyse qui parcourt le XIX^e s. restera d'ailleurs associé le terme de rigueur weierstrassienne. Ce mouvement, que F. Klein appellera l'arithmétisation de l'analyse, va conduire par différentes voies C. Méray, G. Cantor, K. Weierstrass et R. Dedekind à dégager les nombres réels de leur enracinement dans le concept de grandeur pour les construire, pour l'essentiel par un procédé de complétion à partir de l'ensemble des nombres rationnels.

G. Cantor devait poursuivre l'étude des ensembles de nombres réels en établissant, outre ses résultats fameux sur les cardinaux ou puissances, les structures topologiques fondamentales avec Dedekind, Cantor allait découvrir que les espaces à plusieurs dimensions ont encore la puissance du continu. C'est à propos de ce résultat qu'il dira, dans une lettre à Dedekind du 29 juin 1877 : « [...] je ne pourrai pour ainsi dire pas arriver à une certaine tranquillité d'esprit avant que je n'aie reçu votre jugement sur son exactitude. Tant que vous ne m'aurez pas approuvé, je ne puis que dire : *je le vois, mais je ne le crois pas.* » Il remarque au passage toute la complexité de la notion de dimension : là aussi, il s'avère que l'intuition n'est pas un guide suffisant.

La courbe de Peano, une application continue d'un segment de droite sur un carré (Peano, 1890), devait encore affaiblir l'« évidence », longtemps tenue pour telle, qu'une multiplicité à n dimensions nécessite pour sa description n coordonnées réelles indépendantes. Il faudra attendre 1911 et le développement de la topologie combinatoire ou algébrique pour que L.E.J. Brouwer établisse une propriété d'invariance entrevue par Dedekind : il n'existe pas d'application bijective bicontinue entre espaces réels d'inégales dimensions.

Si Weierstrass et Cantor ont su dégager les notions fondamentales de la topologie des espaces réels (ouverts, fermés, voisinages...), c'est à Fréchet puis Hausdorff que l'on doit l'idée abstraite de la topologie générale. Fréchet découvrit en 1906 que la notion de distance, convenablement formalisée, suffit à mettre en place sur un ensemble quelconque les concepts topologiques fondamentaux ; on parle alors d'espace métrique. Enfin, en 1914, Hausdorff observa que l'abstraction peut être poussée plus loin et défini la notion ensembliste moderne d'un espace topologique à partir d'une axiomatique fondée sur le comportement des sous-ensembles ouverts.

La topologie combinatoire

Si la topologie générale devait poursuivre ensuite de manière régulière son développement, une autre forme de la topologie, dite d'abord combinatoire puis algébrique, devait apparaître comme l'une des disciplines phares des mathématiques du XX^e s. et imposer partout, de la logique à la géométrie en passant par l'analyse, ses idées et ses méthodes. Le génie de Poincaré ne s'y était pas trompé, qui, au moment de créer véritablement la discipline, entrevoyait déjà son universalité : « Toutes les voies où je m'étais engagé successivement me conduisaient à l'*Analysis Situs*. J'avais besoin des données de cette science pour poursuivre mes études sur les courbes définies par des équations différentielles [...] pour l'étude des fonctions non uniformes [...] des intégrales multiples [...] Enfin j'entrevois dans l'*Analysis Situs* un moyen d'aborder un problème important de théorie des groupes, la recherche des groupes discrets ou des groupes finis contenus dans un groupe continu donné » (H. Poincaré, « Analyse de ses travaux scientifiques », *Acta Math.*, 1921, 38, 3-135).

La topologie algébrique permet pour l'essentiel (et conformément aux intuitions leibniziennes) de dégager de nombreux phénomènes d'essence géométrique de leur teneur quantitative pour les reconduire à l'analyse qualitative des espaces sur lesquels ils se produisent. C'est le cas par exemple pour le théorème d'invariance topologique de la dimension de Brouwer, dont il a déjà été question, dans la démonstration duquel les structures différentielles et métriques des espaces vectoriels réels ne jouent aucun rôle. Le plus étonnant dans le développement de la théorie est dans le fait que les structures topologiques, une fois définies pour elles-mêmes et indépendamment de toute intuition spatiale, s'avèrent avoir une signification autonome. Il s'agit là d'un phénomène général, caractéristique des mathématiques modernes, que J. Dieudonné aimait à qualifier de principe du transfert d'intuitions, et en lequel il voyait la source d'une « domination universelle de la géométrie ». Sans le rejoindre dans cette conclusion, on peut préférer parler d'une unité profonde des mathématiques, où les concepts aiment de plus en plus à se déplacer d'une théorie à l'autre, de grandes idées se dégageant pour fournir les bases communes à une *mathesis universalis*. Hélas, ce mouvement vers l'unité des idées et des méthodes, particulièrement évident du point de vue de la théorie des catégories, est contrebalancé par un éclatement et une dispersion thématiques dus à l'extrême sophistication des résultats de la recherche contemporaine, si bien que le souci du détail, avec ce qu'il comportera toujours de gothique, peut masquer de prime abord l'évolution d'ensemble. Un exemple parmi tant d'autres : la réélaboration par A. Grothendieck au début des années 1960 du concept d'espace topologique, non plus à partir des sous-ensembles ouverts comme chez Hausdorff, mais à partir des recouvrements, a permis d'utiliser des techniques de topologie algébrique dans des situations où

on ne les attendait guère ; par exemple en arithmétique, où la notion de recouvrement ainsi définie est intimement liée... à la théorie de Galois des extensions de corps !

L'histoire des concepts de la topologie algébrique moderne est extrêmement riche, technique et complexe, beaucoup trop pour que l'on puisse ici donner plus que quelques indications sur ses origines, abstraction faite des aspects liés à la formule d'Euler, sur lesquels l'accent a déjà été mis en raison de leur caractère historique exemplaire.

S'ils vont reprendre dans un contexte mathématique sensiblement différent certains concepts dégagés à propos des polyèdres, comme celui d'ordre de connexion, déjà défini par Lhuillier, les travaux de Riemann (en particulier sa *Dissertation inaugurale*, Göttingen, 1851, et les *Théories des fonctions abéliennes*, Berlin, 1857) vont faire prendre un tournant à l'*analysis situs* en la mettant au cœur de l'étude des fonctions multiformes, entre autres au travers de l'idée de surface associée à une telle fonction, connue depuis comme « surface de Riemann ». Betti allait généraliser la notion d'ordre de connexion aux dimensions supérieures, tandis que Möbius, concourant pour le grand prix de l'Académie des sciences de 1861 sur le thème : « perfectionner, en quelque point important, la théorie géométrique des polyèdres », dégageait, dans un mémoire assez maladroit mais d'un intérêt rétrospectif exceptionnel, un certain nombre d'idées qu'il allait développer plus avant dans des articles ultérieurs. Il obtint en particulier une classification des surfaces et introduisit les surfaces à un seul côté ou « unilatérales », dont le célèbre ruban. F. Klein devait préciser la notion connexe d'orientabilité des surfaces et construire une surface sans bord non orientable, la « bouteille de Klein ».

C'est pourtant avec H. Poincaré, à partir du mémoire *Analysis Situs* de 1895, que se mettent vraiment en place les fondements modernes de la topologie algébrique. Son œuvre, quoique y apparaissent les idées essentielles de la théorie, a été parfois perçue rétrospectivement comme un programme de recherche, car un certain nombre de techniques restaient à mettre en place pour en rendre les résultats rigoureux. Ses premières tentatives, inspirées par les approches de Riemann et Betti, le conduisent à définir la notion révolutionnaire d'homologie : un véritable calcul algébrique sur les sous-espaces d'un espace donné, dont Poincaré n'hésite pas à manipuler les combinaisons linéaires formelles. Il définit le groupe fondamental, ou groupe de Poincaré, et énonce un théorème de dualité qui permet d'identifier certains nombres de Betti correspondant à des dimensions de sous-espaces complémentaires d'un espace donné. On ne dira jamais assez ce que ces résultats ont de stupéfiant de par leur originalité et leur profondeur, dus à un seul homme aux compétences et au génie par ailleurs si étendus : il y a chez Poincaré une dimension héroïque au sens héglélien du terme, que l'on retrouve à très peu d'exemplaires dans l'histoire des mathématiques et que la

spécialisation à outrance va probablement désormais rendre impossible.

Certains résultats semblaient aller à l'encontre de son théorème de dualité vont le conduire à changer totalement de méthode et à reconstruire toute la théorie sur des bases combinatoires dans ses *Compléments à l'Analysis situs* (1899, 1900). L'idée fondamentale devient celle de triangulation, qui permet de coder de manière assez élémentaire la structure topologique d'un espace à partir de son découpage en sous-espaces (cellules) élémentaires. Dans cette nouvelle approche, le calcul de l'homologie relève de l'algèbre linéaire ; de fait, on peut voir l'essentiel des tentatives de la topologie algébrique comme la volonté de reconduire à un codage combinatoire ou algébrique élémentaire des problèmes de géométrie de position, souvent très délicats et inabordable par des méthodes directes.

Toute une algèbre s'est développée à partir des calculs d'homologie et de ceux liés au groupe de Poincaré (théorie de l'homotopie), et est devenue assez vite pour une bonne part indépendante des idées géométriques qui en avaient motivé l'introduction. Parmi les idées essentielles allant au-delà du cadre théorique fourni par les idées de Poincaré, il faut citer la théorie des catégories, née autour de 1942-1945 et qui, du point de vue de la topologie, a d'abord permis de formaliser les techniques liées au concept d'homologie. Les catégories de la topologie sont formées des espaces (en fait de certaines classes d'espaces) et des applications (ou morphismes) entre ces espaces. Autour des années 1960, il est devenu clair que ces collections d'espaces et de morphismes doivent être considérées comme des objets d'étude propres. En d'autres termes, l'intérêt des topologues s'est peu à peu déplacé des espaces « eux-mêmes » et de leur structure vers ces configurations d'espaces et de morphismes que sont les catégories topologiques. Indubitablement, il y a là une évolution qui est le fait de toute une communauté mathématique, mais il convient de citer pour leur rôle moteur et décisif dans ce changement de perspective les noms d'A. Grothendieck et de A. Quillen.

Deux autres idées devaient s'avérer avoir une influence capitale, intimement liée d'ailleurs au développement des techniques catégoriques : la notion de fibration et celle de faisceau (Leray, 1946). On peut les voir comme des généralisations de l'idée d'espace tangent au sens de la géométrie différentielle ou, surtout pour les faisceaux, comme un moyen de passage de l'étude locale à l'étude globale des espaces.

Les diverses notions fondamentales de la topologie algébrique moderne ont fini par prendre, au travers de généralisations successives, des contenus très éloignés de toute forme d'intuition naïve et s'appliquent dans des domaines sans contenus géométriques. Cela ne va pas sans poser problème, car la présence d'un vocabulaire ayant pour référent nature) des notions topologiques au sein de théories purement algébriques, arithmétiques, voire analytiques peut parfois surprendre et inciter à lui attribuer des significations qui n'ont pas lieu d'être en dehors du contexte de la

topologie. La question est particulièrement délicate de décider jusqu'à quel point les concepts correspondants sont susceptibles de renvoyer à d'authentiques intuitions. La méthode axiomatique, qui conduit à négliger le problème de la signification des concepts pour privilégier leurs contenus formels, résout la question de manière bien peu satisfaisante car on sait bien que les mathématiciens ne raisonnent pas sur des formes logiques mais sur des contenus de conscience aux contours difficilement définissables et qui supposent un rapport direct aux objets mathématiques.

La topologie est confrontée aujourd'hui à un problème de communication de ses idées et ses résultats. Comme l'ensemble des mathématiques modernes, elle est peu et mal connue, alors que des notions physiques bien plus complexes sont devenues familières à tous — au prix, il est vrai, de simplifications drastiques. La simplicité d'idées, comme celle de triangulation, se perd souvent dans les présentations plus abstraites de la théorie, qui en oublient la saveur combinatoire. Tout un travail est à entreprendre pour rendre mieux accessibles certaines idées simples et élégantes en repensant leur ancrage dans l'intuition. Peut-être faut-il d'abord montrer que si l'édifice de la topologie contemporaine est extrêmement complexe ses idées directrices sont assez simples et ses calculs, dans une situation donnée, abordables très tôt dans une formation mathématique.

► AULL C. E. (éd.), LOWEN R. (éd.), *Handbook of general topology*, 3 vol., Dordrecht, Kluwer, Academic Publishers, 1997-2001. — DIEUDONNÉ J., *A History of algebraic and differential topology 1900-1960*, Boston, Birkhäuser, 1989. — JAMES I. M. (éd.), *History of topology*, Amsterdam, Elsevier, 1999. — LAKATOS I., *Proofs and refutations*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1976 (trad. fr. *Preuves et réfutations, essai sur la logique de la découverte mathématique*, Paris, Hermann, 1984). — LEIBNIZ G.W., *Mathematische Schriften*, éd. Gerhardt, 1858, Hildesheim, G. Olms Verlag, 1971. — PIER J.-P. (éd.), *Development of mathematics 1900-1950*, Basel, Birkhäuser, 35-155, 1994. — POINCARÉ H., *Œuvres*, Paris, Gauthier-Villars, 1928-1953. — PONT J.-C., *La topologie algébrique des origines à Poincaré*, Paris, PUF, 1974.

Frédéric PATRAS

→ Catégories et foncteurs ; Combinatoire ; Local et global ; Singularité.

TRANSCENDANTAL

Le transcendantal, concept philosophique qui déborde le seul domaine épistémologique, détermine néanmoins d'abord un rapport de la philosophie à la science et une donne de leur liaison, qui apparaît à la fin du $XVIII^e$ s. avec Kant. On pourrait définir une philosophie classique par l'absence de solution de continuité entre son champ et celui de la science (elle-même déployée comme « philosophie naturelle »), quel que soit le rôle fondateur imputé à la première par rapport à la seconde (cf. la métaphore de l'arbre de la philosophie dans la *Lettre-préface des Principes* de Descartes). Le transcendantal intervient au point de rupture de cet édifice,

là où la métaphysique est expulsée de la sphère scientifique, pour être reléguée au rôle de métadiscours sur la science : précisément ladite connaissance transcendante. Peuvent dès lors se développer parallèlement deux types de discours, dans un redoublement tout à fait caractéristique de la pensée moderne, analysé par Foucault : le discours de la science, essentiellement (mais pas seulement) empirique, tout au moins tourné vers le monde, comme objet, et le discours transcendantal, qui a trait aux conditions de possibilité du premier. Il y va du sens moderne du philosophe, et Kant est bien conscient, en la posant dans ces termes, d'introduire une rupture dans la problématique classique du transcendantal.

Celle-ci, en effet, qui remonte au moins à Duns Scot, via Suarez, s'était peu ou prou identifiée à celle d'une ontologie. La nouveauté kantienne est de réorienter la question vers celle des conditions de possibilité de la connaissance de ce qui est déterminé, notamment et avant tout par la science, comme étant – ce qu'il nommera objet (*Gegenstand*) : « J'appelle *transcendantale* toute connaissance qui s'occupe en général non pas tant d'objets que de notre mode de connaissance des objets en tant qu'il est possible en général » (*Critique de la raison pure*, B 25). Toute connaissance *a priori* n'est pas transcendante (même si inversement le sens kantien de l'*a priori* ne pourra être déterminé que depuis celui du transcendantal), mais seule celle qui se rapporte à la possibilité qu'ont des représentations de se rapporter *a priori* à des objets (B 80-81). Cette question de l'objet domine toute la problématique moderne du transcendantal, telle qu'on la retrouve chez Husserl, qui voudra entendre dans le mot transcendantal la transcendance de la conscience se dépassant vers l'objet qui lui apparaît (*Idées directrices pour une phénoménologie*, § 97). Chez Kant, l'exploration des conditions de l'objet en tant que corrélat de la connaissance conduit à la mise en place d'une *Esthétique transcendantale*, doctrine des formes pures de la sensibilité *a priori*, et d'une *Logique transcendantale*, qui vient doubler la logique au sens traditionnel (baptisée par Kant « logique formelle ») en analysant non pas les formes de la discursivité pour elles-mêmes, mais dans leur application à d'éventuels objets, gouvernée par ces concepts fondamentaux que sont les « catégories ». Un tel redoublement peut sembler transporter la scène de la philosophie de la connaissance sur le terrain d'une certaine forme de psychologie imaginaire, au détriment d'une analyse précise des savoirs constitués. Reste que la véritable question kantienne était celle de la possibilité ou non de la métaphysique, et non de la science (dont il part comme d'un fait), et que, surtout dans la deuxième édition de la *Critique*, fortement dépsychologisée, on ne peut vraiment donner alors un sens subjectif au transcendantal, qui renvoie à des conditions structurales très générales de la connaissance, en l'absence de toute analytique développée d'une « subjectivité transcendante » dont il faut rap-

peeler que, dans la *Critique*, elle n'apparaît que négativement – « rien de plus qu'un sujet transcendantal = X » (A 346).

Il revenait à Husserl de donner sa figure moderne au transcendantal, en déployant, au titre d'une sphère élogique absolue, ce qu'il nommera un véritable « champ transcendantal » (comme objet propre de la philosophie). Husserl – ce que n'avait pas fait Kant – parlera d'une « fondation transcendantale de la connaissance » dans l'*ego cogito* (*Méditations cartésiennes*, § 12). Pour Kant, la connaissance transcendante a trait à la possibilité de la connaissance ; il n'est pas dit pour autant qu'elle ait un domaine propre, au sens où cette possibilité constituerait une sphère qui serait elle-même l'objet d'une connaissance. C'est le pas franchi par la phénoménologie transcendantale, qui nourrit une telle ambition, faisant de la possibilité de ce qui apparaît (en général et non seulement en tant qu'objet de connaissance, dans un élargissement important de la notion de transcendantal) son domaine. Celui-ci est obtenu par réduction (ou *epochè*) transcendantale, cette opération de pensée qui consiste à suspendre toute thèse d'existence et à ne considérer les choses que du point de vue de leur apparaître à une conscience, indépendamment de la question de savoir si elles existent réellement ou non (mais on retient alors éventuellement le sens qu'elles ont d'être posées comme existantes, indépendamment de cette existence).

Corrélativement à cette opération se dégage le champ de ce qui est nommé par Husserl conscience transcendantale (cf. *Idées directrices*, § 33), sphère pure de cet apparaître en général, par opposition à toute détermination empirique et notamment psychologique de la conscience. Ce sera, dans la seconde phase (idéalistique) de la pensée de Husserl, le royaume de la phénoménologie, que, dans *La crise des sciences européennes*, § 26, il définira comme un « subjectivisme transcendantal radical ». La subjectivité transcendantale devient ici un champ d'analyse et de description propre, dans lequel en dernier ressort vient se fonder toute forme de connaissance – y compris celle de la science, qui souffre d'un oubli de cette origine – en tant qu'elle a à se présenter à elle : « Ce motif est celui de la question-en-retour sur l'ultime source de toutes les formations de connaissance, c'est l'automéditation du sujet connaissant sur soi-même et sur sa vie de connaissance. » Le transcendantal exprime sans doute alors une nostalgie de la pensée moderne par rapport à ses origines enfouies et le rêve, par-delà son histoire, de conserver en soi la présence d'un commencement, fût-il construit. Il inscrit en creux au cœur de la science la conscience qui serait censée lui prêter son évidence sous-jacente.

Un tel lien a fait évidemment l'objet d'innombrables critiques tant de la part des tenants de l'épistémologie historique que de ceux de l'empirisme logique. L'idée du transcendantal survivra-t-elle à la domination des savoirs anthropologiques, voués à le relativiser et à l'historiciser ? Sans doute beaucoup des

efforts de la pensée moderne depuis les années 1930 se sont-ils concentrés sur un véritable déplacement de la frontière tracée, au moins depuis la *Critique de la raison pure*, entre l'empirique et le transcendantal.

► BENOIST J., « Sur une prétendue ontologie kantienne », in RAMOND Ch. dir., *Kant et la pensée moderne : alternatives critiques*, Bordeaux, Presses Univ., 1996. – CAVAILLES J., *Sur la logique et la théorie de la science*, Paris, 1947, repr. in *Œuvres complètes de philosophie des sciences*, Paris, Hermann, 1994, p. 473-560. – FOUCAULT M., *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966. – HONNEFELDER L., *Scientia transcendens*, Hambourg, Felix Meiner, 1990. – STROUD B., « Transcendental Arguments », *The Journal of Philosophy*, LXV, 1968, p. 241-256.

Jocelyne BENOIST

→ A priori ; Criticisme ; Husserl ; Kant ; Naturphilosophie ; Objectivité ; Phénomène.

TRANSFORMATION GÉOMÉTRIQUE

La notion de transformation géométrique s'est développée autour de deux problématiques, celle de la représentation plane des objets spatiaux et celle du mouvement. La première problématique a conduit à la mise en place de la géométrie projective avec les travaux de Desargues et de ses disciples, tandis que la seconde a conduit à une étude autonome du mouvement (c'est-à-dire indépendante des causes du mouvement) avec le développement de la cinématique. Ces deux problématiques se sont rencontrées lorsque l'on a pris conscience que les déplacements liés au mouvement (translations, rotations, vissages) sont des transformations projectives particulières conduisant d'une part à l'introduction de méthodes géométriques dans l'étude du mouvement et d'autre part à la synthèse du *Programme d'Erlangen* de Felix Klein dans la seconde partie du XIX^e s.

Un peu d'histoire : de la perspective à la méthode des transformations

L'invention de la perspective par les peintres du Quattrocento a conduit ceux-ci à chercher d'une part à définir des méthodes de construction et d'autre part à les légitimer en s'appuyant essentiellement sur le corpus géométrique euclidien.

Le mode de représentation perspectiviste peut être défini de la façon suivante : le tableau est l'intersection du cône visuel joignant l'œil du peintre aux divers points de l'objet à représenter avec le plan défini par le tableau (Alberti). Cette définition une fois énoncée, il restait à établir les règles de construction de cette intersection, ce fut l'objet des divers traités de perspective (Alberti, Piero della Francesca, Dürer). On peut alors considérer que la mise en place de ces constructions a conduit d'une part à construire la notion géométrique d'espace comme coordonnant les

lieux respectifs occupés par le peintre, le tableau et les objets à représenter, d'autre part à expliciter les modes de transformations des objets de l'espace dont la représentation plane n'est qu'une forme particulière.

Après les traités des XV^e et XIV^e s., œuvres de peintres et d'architectes, on verra apparaître au siècle suivant des ouvrages sur la perspective écrits par des mathématiciens ; ainsi ceux de Guido Ubaldo del Monte et de Stevin mettant en avant un mode de construction s'appuyant sur la notion générale de point de fuite d'une direction défini comme le point d'intersection des images perspectives des droites parallèles à cette direction.

L'étape suivante sera marquée par l'œuvre de Desargues ; celui-ci, après avoir publié en 1636 un court traité de perspective, publiera en 1639 un traité sur les coniques dans lequel, après avoir défini les coniques comme perspective d'un cercle, il obtient leurs propriétés en projetant les propriétés du cercle. On est ainsi passé du point de vue d'Apollonius des coniques comme sections de cône à base circulaire au point de vue des coniques considérées comme perspectives d'un cercle. Desargues met ainsi en place ce qui deviendra deux siècles plus tard la méthode des géomètres projectifs, la méthode des transformations. Cette nouvelle méthode, issue d'une systématisation des constructions perspectivistes, conduira Desargues d'abord à définir la notion de point à l'infini (point d'intersection d'une famille de droites parallèles) mais surtout à considérer un point à l'infini comme un point ordinaire si l'on remarque qu'une perspective transforme en général une famille de droites parallèles en une famille de droites concourantes et peut transformer une famille de droites concourantes en une famille de droites parallèles, remarque qui termine le texte de 1636 sur la perspective ; ensuite à mettre l'accent sur certaines relations métriques invariantes par projection, telle l'involution de six points alignés.

L'audace de Desargues restera incomprise de la plupart de ses contemporains qui ne comprendront pas la notion de point à l'infini et encore moins que l'on puisse traiter les points à l'infini comme des points ordinaires. Cependant, Desargues fera école, et nous citerons ici Pascal, La Hire et Newton.

Pascal, dans un court essai publié en 1640, énoncera les principes d'une étude générale des coniques qu'il développera dans un traité ultérieur dont il ne reste malheureusement que le premier chapitre, et un résumé par Leibniz. Au contraire de Desargues, qui, tout en mettant en place une nouvelle façon de penser la géométrie (le point à l'infini, la méthode des transformations et la notion d'invariance), usait de lourdes démonstrations dans le style d'Apollonius, il semble que Pascal avait vu la force des seules relations d'incidence (alignement et concours) ; il énonce ainsi une condition pour que six points soient sur une même conique qui n'utilise que des considérations d'incidence.

Une telle étude projective sera continuée par Philippe de La Hire dans ses traités sur les coniques (La

Hire), mettant en avant une transformation plane qui n'est autre que la perspective d'une perspective.

Il faudrait enfin parler des travaux de Newton sur les coniques (1686), qui utilise une transformation proche de celle de La Hire (qu'il cite) pour ramener certains problèmes à des cas particuliers plus simples (ainsi un quadrilatère peut toujours être transformé en parallélogramme). Dans un article ultérieur consacré aux courbes du troisième ordre (1702) Newton explique, sans démonstration, comment les cubiques s'obtiennent par perspective à partir de cinq d'entre elles.

Les méthodes perspectivistes seront étudiées du point de vue géométrique tout au long du XVIII^e s. même si leur étude semble occultée par le développement des méthodes analytiques plus adaptées aux problèmes posés par le calcul infinitésimal et la physique mathématique naissante. Ainsi les travaux de Taylor et Lambert utilisant systématiquement les propriétés d'incidence pour mettre en place les constructions perspectivistes et développant des méthodes permettant de travailler directement sur le tableau; ces méthodes conduiront Lambert à expliciter le lien entre les constructions perspectivistes et la géométrie de la règle. Les travaux de Taylor et Lambert marquent ainsi la naissance d'un point de vue projectif qui sera développé au siècle suivant.

La géométrie projective

Dans la seconde moitié du XVIII^e s., c'est encore la théorisation d'une pratique de représentation qui va transformer le paysage géométrique lorsque Monge, systématisant les épures des tailleurs de pierre, invente la géométrie descriptive. Celle-ci, mode de représentation des objets de l'espace, contribuera à la géométrie rationnelle dans la mesure où elle mettra l'accent sur ce que Chasles a appelé « l'alliance intime et systématique entre les figures à trois dimensions et les figures planes ».

Les continuateurs de Monge mettront l'accent sur les propriétés invariantes par projection, particulièrement les propriétés métriques : ce sera l'objet de la théorie des transversales de Carnot puis de l'étude systématique entreprise par Poncelet dans son grand traité *Les Propriétés Projectives des Figures*. En fait Poncelet met en place une double classification des figures ; d'abord une classification empirique, distinguant les propriétés métriques définies par des relations entre grandeurs et les propriétés descriptives ou graphiques liées à l'alignement et au concours, ensuite une classification systématique en distinguant les propriétés projectives (invariantes par projection) et les propriétés qui ne le sont pas. Si les propriétés descriptives sont projectives de façon évidente, les propriétés métriques ne le sont pas en général ; certaines le sont cependant, telles la propriété d'involution de six points étudiée par Desargues ou la propriété de division harmonique. Il faut alors noter le rôle joué par les propriétés métriques projectives dans la mesure où c'est leur étude qui a conduit à développer la géométrie projective ; l'étude

de l'invariance projective des seules propriétés descriptives aurait été de peu d'intérêt.

La géométrie projective conduira à une étude systématique des transformations laissant invariantes les propriétés projectives. Il faudrait citer les travaux de Chasles et Steiner qui, continuant ceux de Poncelet, mettront en avant les méthodes dites synthétiques, celles qui usent d'un raisonnement portant sur les objets en tant que tels.

À côté de cette géométrie synthétique se développera une géométrie analytique projective usant de la méthode des coordonnées (Möbius, Plücker) qui conduira Cayley à définir les espaces numériques ; un point d'un tel espace est un $n + 1$ -uplet de nombres non tous nuls et défini à un facteur multiplicatif près ; une transformation projective est alors définie par une transformation linéaire sur les coordonnées, et la géométrie projective consiste à étudier les propriétés invariantes par de telles transformations.

Mouvement et transformations

Nous ne reviendrons pas sur l'étude des mouvements renvoyant aux articles sur la mécanique. Nous nous intéressons ici au seul aspect géométrique du mouvement dont l'étude va conduire à la mise en place de la cinématique comme étude du mouvement indépendant des causes qui le produisent (Ampère) puis de la géométrie cinématique comme étude du mouvement indépendamment du temps (Mannheim).

Au XVIII^e s., d'Alembert et Euler avaient développé une étude analytique du mouvement des corps solides, aussi bien les mouvements finis que les mouvements infinitésimaux. On verra apparaître dans la première moitié du XIX^e s. une étude synthétique (au sens donné ci-dessus) avec Chasles et Poincaré. Étudiant la répartition des vitesses des points d'un solide à un instant donné, Chasles montrera comment l'étude du mouvement d'un solide participe des méthodes projectives avec la notion de complexe linéaire de droites (famille de droites à trois paramètres dans l'espace). En outre, on avait remarqué que l'opération qui relie deux positions d'un mobile dans l'espace est une transformation projective particulière, ce qui précisait le lien entre la géométrie élémentaire de la tradition grecque et la nouvelle géométrie projective.

Se posait alors la question de la distinction entre le mouvement en tant que tel et les transformations qui envoyaient la position initiale d'un corps dans une seconde position. Ce fut le rôle de la géométrie cinématique que de préciser cette distinction ; ainsi Bricard distinguera le mouvement en tant que tel et le déplacement considéré comme l'opération qui envoie la position initiale dans la position finale. L'ambiguïté de langage continuera lorsque l'on sait que Jordan parle encore de mouvements dans un article de 1868 où il étudie les sous-groupes du groupe des déplacements de l'espace.

Géométrie, théorie des groupes et théorie des invariants

Le développement de la géométrie projective et la grande généralité qu'elle permet conduiront les géomètres projectifs à vouloir y intégrer la géométrie élémentaire d'autant que l'on a su très vite que l'on retrouvait cette dernière en introduisant certains éléments idéaux tels les points cycliques, points à l'infini communs à tous les cercles d'un plan ou l'ombilicale, intersection commune de toutes les sphères avec le plan de l'infini ; ainsi Cayley expliquait que les propriétés métriques d'une figure ne sont autres que les propriétés projectives de la figure augmentée des éléments idéaux cités ci-dessus. La géométrie élémentaire devenait ainsi un chapitre de la géométrie projective. Une telle conception posait problème dans la mesure où la géométrie projective s'était construite sur la géométrie élémentaire, ce qui conduisait Felix Klein à parler de « la fatale inconsistance de la géométrie projective ». La question se posait donc d'une construction autonome de la géométrie projective, et des tentatives en ce sens eurent lieu dès le milieu du siècle dont nous n'avons pas à parler ici. La solution allait venir d'une classification des géométries faisant appel à la théorie des groupes de transformations et à la notion d'invariant.

La méthode des transformations pose la question des propriétés conservées par une famille de transformations. Nous avons vu que c'est l'étude des invariants métriques projectifs qui a conduit au développement de la géométrie projective et c'est autour de la notion d'invariant que s'est construit le point de vue moderne de la géométrie tel que le développe Felix Klein dans l'un des textes fondamentaux de l'histoire de la géométrie, le *Programme d'Erlangen*.

Rappelons d'abord la notion d'invariant d'une forme algébrique (un polynôme homogène) : c'est une fonction des coefficients qui reste inchangée lorsque l'on effectue certaines transformations sur les indéterminées, l'invariant le plus simple étant le degré de la forme. Dans les années 1850, Arthur Cayley avait entrepris une étude systématique des transformations des formes algébriques lorsque l'on effectue sur les variables des transformations linéaires homogènes et avait ainsi déterminé les invariants associés. Dans le cas de trois variables homogènes, correspondant à la géométrie plane, Cayley avait donné une interprétation géométrique ; une géométrie cayleyenne est définie par la donnée d'une conique dans le plan projectif associée à une forme quadratique, et les transformations considérées sont les transformations conservant la conique ; les expressions invariantes par ces transformations expriment alors les propriétés de la géométrie cayleyenne correspondante. Cayley remarquait que, dans le cas bidimensionnel, lorsque la conique dégénère en deux points que l'on peut considérer comme étant les points cycliques du plan projectif, la géométrie correspondante n'est autre que la géométrie plane euclidienne, les transformations préservant la conique,

c'est-à-dire les deux points cycliques qui sont les similitudes. En 1871, Felix Klein montrera que lorsque la conique n'est pas dégénérée la géométrie cayleyenne n'est autre que la géométrie non euclidienne ; on obtient ainsi la géométrie de Lobatchevski, qu'il nomme hyperbolique, lorsque la conique est réelle ou la géométrie elliptique lorsque la conique est imaginaire ; lorsque la conique dégénère en deux points distincts on retrouve la géométrie euclidienne. On peut y voir la première ébauche d'une classification des géométries qui sera systématisée dans le *Programme d'Erlangen*.

Dans son *Programme d'Erlangen* de 1872, Felix Klein définira une géométrie comme la donnée d'un groupe de transformations (groupe principal) opérant sur l'espace. Une géométrie étant donnée, une géométrie subordonnée est définie par un sous-groupe du groupe principal. La géométrie projective est déterminée par le groupe projectif opérant sur l'espace projectif ; la géométrie euclidienne est alors définie par le sous-groupe des similitudes définies comme le groupe des transformations conservant l'ombilicale, et les géométries non euclidiennes sont déterminées par la donnée d'un sous-groupe conservant une quadrique convenable. Deux géométries sont dites équivalentes si leurs groupes sont isomorphes ; pour préciser ce dernier point, Felix Klein introduit la notion de corps défini comme un ensemble de figures sur lequel le groupe opère simplement transitivement, c'est-à-dire que deux figures du corps étant données il existe une transformation et une seule du groupe envoyant la première figure sur la seconde ; la donnée d'un corps caractérise donc complètement une géométrie.

Le *Programme d'Erlangen* apportait une nouvelle conception de la géométrie. D'une part l'accent était mis sur l'espace et non sur les figures et la donnée du groupe apparaissait comme une structuration de la géométrie considérée. D'autre part la notion d'équivalence montrait que les propriétés géométriques dépendent de la structure ainsi définie et non de la forme particulière de cette géométrie ; on peut y voir la naissance du point de vue structural qui caractérise les mathématiques du XX^e s. Mais à côté de ce point de vue formel il faut voir aussi la possibilité de lire les propriétés d'une géométrie donnée à travers une géométrie équivalente permettant ainsi des « transferts d'intuition », pour reprendre une expression de Jean Dieudonné. Ainsi le point de vue structural s'appuie dès l'origine à la fois sur une plus grande abstraction (une plus grande généralité, pour reprendre le langage de Chasles) et sur un élargissement de l'intuition. C'est alors un nouveau paysage des mathématiques qui s'ouvre et dont on recueillera les fruits au XX^e s.

La question du même

Un retour sur le développement de la méthode des transformations géométriques nous conduit à distinguer trois moments. Le premier moment est celui de

la transformation effectivement réalisée ; c'est l'œuvre de Desargues qui explique ainsi comment les coniques se transforment les unes dans les autres pour ne faire plus qu'une seule et même courbe. C'est alors la méthode des transformations qui permet cette « seule et même énonciation » que Desargues met en avant dans l'étude de la géométrie. Le second moment apparaît lorsque la seule possibilité de la transformation suffit pour assurer l'équivalence de deux situations géométriques. Ainsi point n'est besoin pour Newton d'explicitement la transformation qui transforme un quadrilatère en parallélogramme pour considérer que le problème de la construction d'une conique tangente à quatre droites et passant par un point est résolu lorsque l'on sait résoudre le problème quand le quadrilatère est un parallélogramme. De même, la géométrie perspective de Taylor et Lambert suffit à construire le tableau sans que l'on ait besoin d'effectuer la construction à partir de l'objet « en vraie grandeur ». Le troisième moment apparaîtra lorsque l'équivalence se réduira à une simple question de langage comme l'explique Gergonne dans un article de 1826 sur la dualité. On connaissait la transformation par polaires réciproques par rapport à une conique qui échange droites et points de telle façon que des points alignés deviennent des droites concurrentes et que des droites concurrentes deviennent des points alignés ; on peut ainsi associer à toute proposition géométrique, pourvu qu'elle porte sur des propriétés descriptives, une proposition duale en échangeant les termes points et droites et les termes alignement et concours. Comparant cette situation avec d'autres situations de dualité (polyèdre de l'espace, géométrie sphérique), Gergonne énonce une théorie générale de la dualité remarquant que la démonstration de la duale d'une proposition s'obtient en dualisant la démonstration de la proposition donnée. On obtient ainsi une version langagière de la notion de transformation que l'on peut considérer comme l'aboutissement de la « seule et même énonciation » de Desargues. Poncelet, qui connaît le dictionnaire de la transformation par polaires réciproques, refusera de réduire la géométrie à de tels jeux de langage mais le point de vue de Gergonne sera renforcé par la découverte de la dualité définie par un complexe linéaire.

La notion de transformation géométrique prend ainsi toute son ampleur. Elle conduit à une nouvelle façon de penser le même, déjà posée par Desargues avec la question de « la seule et même énonciation ». C'est ainsi que Felix Klein peut écrire : « La géométrie projective n'a pris naissance que quand on s'est accoutumé à considérer comme entièrement identiques la figure primitive et toutes celles qui s'en peuvent déduire par projection, et à énoncer les propriétés projectives de façon à mettre en évidence leur indépendance vis-à-vis des modifications apportés par la projection. »

Cette conception de « la seule et même énonciation », relue à l'aune des méthodes formalistes de notre siècle, se relie à la notion d'isomorphisme de structures telle que l'énonce Bourbaki et peut-être plus encore à la

notion d'équivalence de catégories. Outre l'aspect formel qui met en avant les structures communes à plusieurs théories et qui montre que le développement déductif ne dépend que de la structure, il faut y voir la possibilité de lire une théorie à travers une autre comme on lit dans un tableau, considéré comme un ensemble de formes géométriques planes, la situation spatiale qu'il représente. On peut y voir ainsi une conception perspectiviste des mathématiques qui consiste d'une part à reconnaître du même à travers plusieurs situations et d'autre part à connaître une situation à travers une situation équivalente.

► ALBERTI L.B., *De la Peinture* (1435), préf., trad. et notes J.-L. Schefer, introd. S. Deswarte-Rosa, Paris, Macula Dédale, 1992. — AMPÈRE A.M., *Essai sur la Philosophie des Sciences* (1834), Bruxelles, Culture et Civilisation, 1966. — BOSSE A., *Manière universelle de M. Desargues pour pratiquer la perspective par petit-pied, comme le géométral*, Paris, 1647. — BOURBAKI N., *Théorie des Ensembles*, chap. IV : Structures, Paris, Hermann, 1957. — BRICARD R., *Cinématique et Mécanismes*, Paris, Armand Colin, 1947. — DESARGUES G., *Exemple de l'une des manières universelles du S.G.D.L. touchant la perspective...* (1636), rééd. A. Bosse, in *Manière universelle de Mr Desargues pour pratiquer la perspective...*, op. cit. ; *Brouillon Project d'une atteinte aux Evénements des rencontres d'un Cône avec un Plan* (1639), in TATON R., *L'Œuvre mathématique de Girard Desargues*, Paris, Vrin, 1981. — DIEUDONNÉ J., *The universal domination of geometry*, International Congress of Mathematical Education IV, Berkeley, 1980. — DÜRER A., *Géométrie* (1525), prés., trad. de l'all. et notes J. Peiffer, Paris, Le Seuil, 1996. — GERGONNE, « Considérations philosophiques sur les éléments de la science de l'étendue », *Annales de Mathématiques pures et appliquées*, XVI, 1826, p. 209-231. — GUIDO UBALDO DEL MONTE, *Les Six livres de Perspective* (1600), trad. fr. et notes C. Guipaud (à paraître). — JORDAN C., « Mémoire sur les groupes de mouvements », *Annali di Matematica*, II, 1868. — KLEIN F., *Le Programme d'Erlangen* (1872), trad. M.H. Padé, préf. J. Dieudonné, postface P. François Russo s.j., Paris, Gauthier-Villars, 1974. — LA HIRE P. DE, *Nouvelles Méthodes en géométrie plane pour les sections des surfaces coniques et cylindriques*, Paris, 1673. — LAMBERT J.H., *La perspective affranchie du plan géométral* (1759), Paris, Alain Brieux, 1977. — LANIER D. & LE GOFF J.-P., « L'héritage arguésien », *Scholæ*, 7-8, Caen. — LAURENT R. & PEIFFER J., *La place de J.H. Lambert dans l'histoire de la perspective*, Paris, Cedic/Nathan, 1987. — MAC LANE S., *Categories for Working Mathematicians*, New York, Springer-Verlag, 1971. — MANNHEIM A., *Cours de Géométrie descriptive de l'École Polytechnique*, Paris, Gauthier-Villars, 1880. — NEWTON I., *Principia mathematica* (1686, 2 vol.), trad. Motte (1729), rev. F. Cajori (1934), Berkeley, Univ. of California, 1962 ; *Enumeratio linearum tertii ordinis* (1701), trad. angl. in STRUICK D.J., *A sourcebook in mathematics 1200-1800*, Princeton Univ. Press, 1986. — PASCAL B., « Essai pour les Coniques », in *Œuvres Complètes*, prés. et notes L. Lafuma, Paris, Le Seuil, 1963 ; « Traité des Coniques », in *Œuvres Complètes*, op. cit. — PIERO DELLA FRANCESCA, *De Prospectiva Pingendi*, Wittenberg, 1899 (trad. fr. J.-P. Le Goff, à paraître). — PONCELET J.V., *Traité des Propriétés Projectives des Figures* (2 vol., premier vol. publié pour la 1^{re} fois, 1822), Paris, Gauthier-Villars, 1865-1866. — SAKAROVITCH J., *Épures d'architecture (de la coupe des pierres à la géométrie descriptive, XIV-XIX siècles)*, Berlin, Birkhauser, 1998. — STEVIN S., *De Sciagraphia* (1605), trad. fr. A. Girard, in *Les Œuvres Mathématiques*, Leyde, 1634. — TAYLOR B. in

ANDERSEN K., *Brook Taylor's on Linear Perspective*, New York/Berlin, Springer-Verlag, 1992.

Rudolf BKOUCHE

→ Géométries ; Isopérimètre ; Structure.

TRAVAIL

Travail et forces vives

Le travail, noté W, désigne en physique le produit intégral Fd d'une force par la distance parcourue dans la direction de cette force. Cette grandeur correspond à une constante près à la « force vive » définie par Leibniz (produit de la masse par le carré de la vitesse : MV^2). En effet, si l'on considère le modèle canonique de la chute des corps, la force produite sera égale au produit de la masse M du corps par son accélération g, cela pour une chute de hauteur h. Le travail produit par la chute sera alors égal à la somme intégrale Mgh . Or, g peut s'écrire comme une vitesse sur un temps (V/t) et h comme une vitesse par un temps ($V.t$). Le temps intervenant au dénominateur et au numérateur est éliminé, alors que la vitesse est mise au carré. Dans l'intégration apparaît le coefficient 1/2, ce qui donne : $W = Fd = Mgh = 1/2 MV^2$ (soit, dans le vocabulaire contemporain, l'énergie cinétique). Du concept de travail on a dérivé celui de puissance, qui est un travail divisé par un temps.

C'est à Gustave Gaspard de Coriolis (1792-1843) que l'on doit l'introduction officielle en 1829 du concept de travail dans le glossaire de la physique. Cette grandeur était utilisée depuis longtemps par les savants et les ingénieurs mais la dénomination n'en était pas fixée. Coriolis, relevant les différentes expressions employées, optera pour ce terme, communément utilisé dans un sens intuitif par de nombreux auteurs : « Ce nom ne fera aucune confusion avec aucune autre dénomination mécanique ; il paraît très propre à donner une juste idée de la chose, tout en conservant son acception commune dans le sens de travail physique. » C'est en cohérence avec ce concept que Coriolis a, dans un souci pédagogique, redéfini la force vive leibnizienne pour aboutir à la formule contemporaine : « Je me suis permis encore une légère innovation en appelant *force vive* le produit du poids par la hauteur dû à la vitesse. Cette *force vive* n'est que la moitié du produit de ce qu'on a désigné jusqu'à présent par ce nom, c'est-à-dire de la masse par le carré de la vitesse. Si l'on avait éprouvé comme moi combien les élèves sont embarrassés par des dénominations mal choisies, je crois qu'on ne blâmerait pas ce léger changement. Il est très gênant d'avoir un nom pour le double d'une quantité qu'on retrouve à chaque instant. Si on a donné anciennement le nom de *force vive* au produit de la masse par le carré de la vitesse, c'est qu'on ne portait pas son attention sur le travail. »

La formulation du concept de travail constitue l'aboutissement d'un processus intellectuel où se

croisent les débats philosophico-scientifiques et les préoccupations pratiques des ingénieurs. Elle aboutit en effet à régler, sur un mode pratique, la « rudelle des forces vives » entamée en 1686 par Leibniz dans sa célèbre réfutation de la physique de Descartes et qui se poursuivra durant tout le XVIII^e s. La définition du concept de travail impose en effet comme valeur fondamentale de l'économie des machines la « force vive » leibnizienne MV^2 , dont il a, comme nous l'avons vu, les dimensions physiques, en lieu et place du produit cartésien M.V (« quantité de mouvement »). Mais simultanément, en concluant les débats scientifiques de l'âge classique, la formulation du concept de travail ouvre ceux de l'ère industrielle. Première unité de « conversion » entre phénomènes physiques, le concept de travail anticipe l'énergétisme ; moins de vingt ans plus tard, les physiciens entreprendront de démontrer l'équivalence entre le travail et la chaleur. Pourtant, si l'histoire du concept de travail croise ainsi, en amont et en aval, les débats fondamentaux constitutifs de la physique classique elle peut, jusqu'à un certain point, être retracée indépendamment d'eux ; cette grandeur émerge en effet spontanément dans la pensée des ingénieurs.

Ainsi, en 1699, treize ans seulement après la célèbre réfutation de Descartes par Leibniz, Guillaume Amontons (1663-1705) mesurait-il, en prenant l'exemple du polissage des glaces, l'activité humaine par le produit d'un poids par une vitesse par un temps, mesure qui, pour une vitesse supposée constante, est assimilable à un travail et qu'il appelle précisément « labores ». L'exemple est significatif, car Amontons met en œuvre son expérience pour mesurer à l'aune du travail humain l'efficacité de la « machine à feu » qu'il soumet au jugement de l'Académie. Il s'agit bien, comme un siècle plus tard chez Coulomb (cf. plus loin), d'établir, dans un mouvement de renvoi réciproque, un schéma de comparaison entre l'homme et la machine. Plus généralement, depuis le début du XVIII^e s., l'hydrodynamique, discipline technologique clé de l'époque, nourrie tant de la pratique des ingénieurs que de la spéculation des plus grands savants du temps, de Huygens à Daniel Bernoulli et Euler, avait opté, comme l'a montré Jean-Pierre Séris, pour le principe leibnizien des forces vives. Dès 1729, Guillaume s'Gravesande (1688-1742) avait montré expérimentalement, en mesurant l'impact dans la terre glaise de la chute de sphères de même volume et de masses différentes, que des quantités égales de forces vives produisaient des effets égaux, ce qui n'était pas le cas de quantités égales de mouvement. Il en conclut très joliment que la question « ne concerne pas seulement les théologiens, mais aussi les constructeurs de moulins à foulons ».

La mécanique industrielle

La définition du concept de travail marque l'émergence d'une discipline emblématique du XIX^e s. : la mécanique industrielle. Cette discipline fut fondée en

France dans les années 1820 par un groupe de jeunes polytechniciens des promotions 1805-1810, parmi lesquels il faut compter, outre Coriolis déjà cité, Charles Dupin (1784-1873), Claude-Louis Navier (1785-1836), Jean-Victor Poncelet (1788-1867), Claude Burdin (1788-1873) et quelques autres. À ce groupe on ne peut manquer d'associer le nom de Sadi Carnot (1796-1832), dont la démarche relève du même industrialisme. Tous furent élèves de Jean-Pierre-Nicolas Hachette (1769-1834), qui fut le premier à assurer à l'École polytechnique, de 1805 à 1816, un cours de « sciences des machines » initialement conçu par Monge, où il transmettra notamment l'apport des travaux des grands ingénieurs de la fin du XVIII^e s., tels Lazare Carnot (1753-1823), le père de Sadi, et Charles-Augustin Coulomb (1736-1806). La mécanique industrielle se diffusa aussi par l'intermédiaire du Conservatoire national des arts et métiers, où Joseph Montgolfier (1740-1810) exerça les fonctions de « démonstrateur » de 1800 à sa mort, dont Pierre-Joseph Christian (1778-1832), ancien secrétaire de Lazare Carnot et auteur d'un *Traité de mécanique industrielle* (1822-1825) fut le directeur de 1816 à 1831, et où Charles Dupin occupa, de 1819 à 1864, une chaire de mécanique puis de géométrie « appliquée aux arts ».

La mécanique industrielle a hérité de la science des machines de l'âge classique. Mais elle s'en distingue par l'ambition explicite, formulée en 1815 par Burdin, de « rattacher la mécanique à l'économie politique ». Il s'agit de constituer un corps de doctrine pratique apte à guider l'ingénieur dans le choix des techniques productives les plus efficaces. La notion de travail prend son sens dans cette conception économique de la machine. Selon Navier, l'invention du concept de travail (qu'il désigne encore en 1819 par l'expression empruntée à Coulomb de « quantité d'action ») vise ainsi à « établir une sorte de monnaie mécanique [...] avec laquelle on puisse estimer les quantités de travail employées pour effectuer toute espèce de fabrication ». Grandeur physique, le « travail » est donc également une grandeur économique. C'est en vertu d'un argumentaire économique qu'il constitue, pour ses inventeurs, la pierre de touche de la mécanique industrielle. Navier, Coriolis et les autres ingénieurs du temps ne se laisseront pas de répéter l'adage de Joseph Montgolfier, qu'ils avaient trouvé dans l'enseignement de Hachette : « La force vive est celle qui se paie. » En 1834, Antoine-Augustin Cournot, qui n'était encore qu'un jeune professeur de mécanique et d'analyse à la Faculté des sciences de Lyon et n'avait encore rien publié en économie, citera aussi cette phrase. Mieux que ses prédécesseurs, il développera l'analogie entre la monnaie et la force vive : « En un mot la force vive est de tous les effets dynamiques le seul qui se conserve, s'emmagasine, se transmet, s'échange, se fractionne : et il faudrait être bien peu initié dans la science économique pour ne pas voir qu'à ce titre seul, la force vive devrait devenir l'étalon dynamique, lors même que le travail le plus habituel des machines ne

serait pas directement mesuré par la force vive. C'est en vertu de propriétés analogues que les métaux précieux servent d'étalon à toutes les valeurs commerciales, sans être à beaucoup près, les denrées dont la consommation directe est la plus fréquente et la plus impérieusement réclamée par nos besoins. »

Cette insistante comparaison avec l'économie politique éclaire d'un jour singulier le choix du terme « travail » par les ingénieurs mécaniciens du début du XIX^e s. Le rapprochement ne peut manquer d'être fait entre l'émergence de la mécanique industrielle et l'éclosion parallèle de l'économie politique classique, qui s'appuie, depuis Smith, sur la valeur fondatrice du travail humain. Plus précisément, la mécanique industrielle naît en France dans un univers intellectuel marqué par la pensée de Jean-Baptiste Say (1767-1832). Si celui-ci n'adopte pas la théorie ricardienne de la valeur-travail, il intègre à son analyse, plus que les classiques anglais, la dimension technologique. Comme les mécaniciens, il admet en conséquence l'idée d'un « travail » de la nature, conceptuellement comparable au travail humain : « Lorsqu'on laboure et qu'on ensemence un champ, outre les connaissances et le travail qu'on met dans cette opération, outre les valeurs déjà formées dont on fait usage [...], il y a un travail exécuté par le sol, par l'air, par l'eau, par le soleil [...] C'est ce travail que je nomme service productif des agents naturels. » L'industrialisme saint-simonien, qui marquera si fortement la communauté des ingénieurs français du XIX^e s., résulte largement de cette convergence entre la version sayenne de l'économie politique classique et la pensée contemporaine des ingénieurs. Dupin, qui fut mathématicien et économiste, grand administrateur et politicien de tendance libérale, symbolise cette rencontre de la physique et de l'économie politique. Ami et collègue de Say au Conservatoire national des arts et métiers, il développe dans son enseignement une conception extensive du travail qui englobe la mécanique industrielle dans une économie de la production : « La mécanique, telle que je dois vous l'enseigner dans ce cours, n'est pas seulement la science qui explique le jeu des machines proprement dites. Elle explique les règles et les lois de toute action dans laquelle on emploie de la force grande ou petite, de toute action dans laquelle il y a mouvement, lent ou rapide. Comme il ne saurait y avoir de travail sans mouvement ou sans force, vous voyez déjà que le travail de toute espèce, appliqué à toute profession, rentre dans le domaine de la mécanique. Ainsi nous expliquerons les principes et les règles du travail des machines, du travail des outils, du travail des mains et des membres de l'homme, qui sont les outils les plus précieux dont la nature l'ait gratifié. »

La définition du concept physique de travail repose ainsi sur un riche jeu de transferts analogiques entre l'homme et la machine. La machine est comparée à l'homme sous un double registre. Comme l'homme, elle produit ; comme l'homme, elle dépense. Cette dualité du travail, qui est à l'origine de débats essentiels de

la théorie économique durant tout le XIX^e s., avait été mise en valeur en 1798 par Coulomb : « Il y a deux choses à distinguer dans le travail des hommes ou des animaux : l'effet que peut produire l'emploi de leurs forces appliquées à une machine, la fatigue qu'ils subissent en produisant cet effet. » Cette distinction lui fournit la base d'une procédure d'optimisation : « Pour tirer tout le parti possible de la force des hommes, il faut augmenter l'effet sans augmenter la fatigue ; c'est-à-dire qu'en supposant que nous ayons une formule qui représente l'effet et une autre qui représente la fatigue, il faut, pour tirer le plus grand effet possible des forces animales, que l'effet divisé par la fatigue soit un maximum. » Le paradoxe est ainsi que l'étude mécanique du travail humain précède en quelque sorte celle du travail des machines. Cet ordre généalogique de la connaissance ne correspond pas à l'ordre logique de la science contemporaine, qui fait de la première un corollaire lointain de la seconde. En effet, si Coulomb peut mesurer en termes physiques le travail produit par l'homme, que l'on peut toujours ramener à l'action d'élever un poids à une hauteur donnée, soit à un « travail » au sens physique, il ne dispose pas des concepts permettant de mesurer physiquement la dépense animale. La bioénergétique se saisira ultérieurement de cette question (cf. plus loin). En revanche, dans un retour de l'homme à la machine, son mémoire, bien connu des ingénieurs du début du XIX^e s., va fournir la matrice de toute la mécanique industrielle.

S'inspirant de Coulomb, Navier le premier a appliqué à la machine cette double figure du travail humain. Il mesure en « quantité d'action » (travail) la « dépense » d'une machine mécanique mais aussi son « produit » (« effet utile »). La première est l'énergie fournie par le « moteur », qui, dans la technologie classique, est déjà une force en mouvement, comme l'énergie cinétique d'une chute d'eau. La seconde est la fraction de ce travail effectivement éteinte dans l'action qu'on veut accomplir : élévation d'un poids, mouture du blé ou toute autre action mécanique. Le « rendement » mécanique de la machine, rapport du produit à la dépense, est par hypothèse inférieur à un, car, dans la transmission du travail, une partie en est irrémédiablement perdue dans les chocs et les frottements : « Il faut donc dans toute machine concevoir la pression exercée par le moteur partagée en deux parties, dont l'une fait équilibre à la résistance proprement dite résultant du travail à effectuer, et l'autre aux résistances provenant de la machine. » Toute la mécanique industrielle se résume alors à une démarche économique visant l'emploi optimal du flux de travail qui traverse la machine. C'est le « principe de transmission du travail » que formulera Coriolis par une métaphore hydraulique, que l'énergétisme développera plus tard *ad nauseam* : « Pour se représenter avec facilité la transmission du travail dans le mouvement des machines, on peut la comparer à celle d'un fluide qui se répandrait dans les corps en se communiquant de l'un à l'autre par les points de contact comme lieu de passage ; [...]. En suivant cette comparaison, une machine

dans le sens qu'on donne ordinairement à ce mot, est un ensemble de corps en mouvement disposés de manière à former une espèce de canal par où le travail prend son cours pour se transmettre le plus intégralement possible sur les points où on en a besoin. »

La démarche physico-économique de la mécanique industrielle va s'accomplir au cours du XIX^e s. dans de nombreuses études pratiques portant sur les différents champs d'investigation des ingénieurs, de la conception des machines au calcul du tracé des voies routières, puis ferroviaires. Ce calcul économique d'ingénieur va puissamment contribuer à la genèse de l'économie mathématique à la fin du XIX^e s. Mais, comme l'a montré Thomas Khun, le modèle mécanique du rendement va également être une des sources de la thermodynamique. Quand on passe d'une machine mécanique à une machine thermodynamique, la dépense ne peut plus être directement calculée en « travail ». Cette dépense (« duty » dans le vocabulaire des mécaniciens anglais) est une certaine capacité à produire indirectement du travail, via la chaleur (soit, dans le cas de la machine à vapeur, une certaine quantité de charbon). La définition pratique par les ingénieurs d'un rendement thermodynamique (travail produit sur duty), *a priori* sans signification physique, induit l'idée d'une « conversion » de la chaleur en travail. Mayer, Joule et quelques autres s'attacheront dans les années 1840 à calculer ce coefficient de conversion, donnant ainsi naissance à ce qui deviendra le premier principe de la thermodynamique.

Lectures philosophiques

La genèse de la mécanique industrielle autour du concept de travail a eu la chance de disposer de deux témoins de premier plan du point de vue de la philosophie des sciences : Auguste Comte (1798-1857) et Antoine-Augustin Cournot (1801-1877). Le premier, polytechnicien, avait reçu l'enseignement de Hachette, qui le protégea après le « licenciement » de l'École en 1816 et l'associa jusqu'en 1819 à ses recherches. Il était proche par ailleurs de Navier, qui compte parmi les premiers auditeurs du *Cours de philosophie positive*. Le second, à peine plus jeune, était normilien, mais il bénéficia aussi de l'enseignement de Hachette à la Faculté des sciences en 1822-1823. Auteur en 1829 d'une thèse de mécanique, il est, de 1826 à 1829, un des principaux rédacteurs du *Bulletin des sciences mathématiques, astronomiques, physiques et chimiques*, du marquis de Férussac, remarquable point d'observation du développement des sciences physiques, où la question du travail mécanique est amplement commentée.

Ce rapprochement biographique entre les deux auteurs n'en rend que plus saisissante la différence de leur approche de la mécanique industrielle. Cette discipline, dont l'idéologie industrialiste aurait dû séduire Comte, est en effet totalement absente des leçons consacrées à la mécanique du *Cours* de Comte, qui datent des années 1829-1830. Elle est conçue comme

une « science d'application », aussi son examen est renvoyé à un stade plus avancé de la philosophie positive : « La véritable théorie propre de la mécanique industrielle, qui n'est nullement, ainsi qu'on le croit souvent, une simple dérivation de la phononomie ou mécanique rationnelle [...] n'a point encore été conçue. Il en est à cet égard comme de toute autre science d'application, dont l'esprit humain ne possède jusqu'ici que quelques éléments... » Comte n'ignore pas les recherches menées par ses contemporains sur l'économie des machines à partir du « principe des forces vives », dont la discussion « pourrait même être reprise aujourd'hui, car les objections qui ont été faites contre les mesures vulgaires de la valeur dynamique des moteurs méritent d'être prises en considération ». Mais il se méfie du caractère « métaphysique » de la mécanique de Leibniz, définitivement dépassée selon lui par la *Mécanique analytique* de Lagrange (1788) : « On peut regarder comme essentiellement oiseuses par leur nature les tentatives qui pourraient être projetées pour substituer quelque nouveau principe à celui des vitesses virtuelles. Un tel travail ne saurait plus perfectionner nullement le caractère philosophique de la mécanique rationnelle, qui, dans le traité de Lagrange, est aussi fortement coordonnée qu'elle puisse jamais l'être. »

Tout autre est l'attitude de Cournot, qui n'a pas pour Lagrange l'admiration fervente de Comte. Disciple de Siméon-Denis Poisson (1781-1840), il entend à la suite de son maître compléter la mécanique analytique par une « mécanique physique », mieux à même de rendre compte des phénomènes terrestres. Admirateur de Leibniz, qui restera toujours son philosophe de prédilection, il n'a pas la phobie de Comte pour toute considération « métaphysique » et pense que la science doit se nourrir de la philosophie comme la philosophie de la science. Aussi, quand il traduit en 1834 un traité élémentaire de mécanique anglais à la demande d'un éditeur, juge-t-il utile d'ajouter un chapitre sur « la mesure des forces et du travail des machines ». Rédigé dans un esprit épistémologique, ce texte, que nous avons déjà cité, fait une large place à la « querelle des forces vives ». Cet intérêt de jeunesse marquera toute son œuvre, et sera même relancé, dans les années 1860, par sa découverte des théories de la conversion énergétique. À la différence de Comte, Cournot pourra alors exprimer la valeur heuristique de la mécanique industrielle, sa capacité à réfigurer, à la différence de la mécanique rationnelle, le schéma thermodynamique d'une dépense énergétique irréversible : « Depuis deux siècles, ces deux sciences qui portent le même nom sont en contraste, et jusqu'à un certain point en conflit ; et le contraste, sinon le conflit tient au fond des choses. Dans la mécanique qui s'applique au mouvement des corps célestes, l'on conçoit que les corps agissent à distance les uns sur les autres, d'une action permanente, qui ne s'épuise et ne se dépense point par l'exercice [...]. Au contraire, dans la mécanique des machines, il n'y a pas à proprement parler d'action à distance : [...] et tous les moteurs naturels, poids, vents, cours d'eau,

ressorts, gaz ou vapeur qui se détendent, animaux de trait, etc., ne peuvent agir sur nos appareils mécaniques qu'au moyen de liens matériels, en cheminant dans le sens suivant lequel ils sollicitent les corps qu'ils mettent en mouvement, et en consommant ainsi, par leur chute, par leur détente ou de toute autre manière équivalente, la quantité de *force vive* ou de *travail*, que la Nature ou l'art avait pour ainsi dire amassée en eux, et que la science du mécanicien recueille ou utilise. »

Une vingtaine d'années plus tard, c'est également dans une double référence à la « querelle des forces vives » et à la thermodynamique que le concept de travail retiendra l'attention de Friedrich Engels dans sa *Dialectique de la nature*. À bien des égards, son analyse rejoint celle de Cournot : « La mécanique théorique aboutit au concept de force vive, la mécanique pratique des ingénieurs à celui de travail et elle l'impose aux théoriciens. Et, à force de calculer, on a tellement perdu l'habitude de penser que pendant des années on ne reconnaît pas les liaisons de l'une et de l'autre chose... » Mais le premier, il réagira contre l'assimilation abusive à son sens du travail au sens physique et au sens économique (non sans faire une erreur historique sur l'origine du concept, qu'il attribue aux ingénieurs anglais) : « Le mot "travail" et la notion correspondante viennent des ingénieurs anglais. Mais en anglais le travail pratique s'appelle *work*, le travail au sens économique *labour*. Aussi le travail physique est-il désigné par *work*, ce qui exclut toute possibilité de confusion avec le travail au sens économique. Ceci n'est pas le cas dans la science allemande et c'est pourquoi dans la littérature pseudo-scientifique moderne on a pu voir diverses applications étranges du travail physique à des conditions de travail économique et inversement. » L'enjeu était crucial, car certains auteurs socialistes avaient perçu l'analogie formelle existant entre le schéma énergétiste et la théorie de la valeur ricardo-marxienne et pensaient pouvoir utiliser la première pour légitimer la seconde. Or, comme l'avait bien senti Engels, cette analogie ne pouvait que ruiner la doctrine marxiste, car la pensée énergétiste mettait en évidence une « perte », alors que Marx recherchait l'origine d'une « plus-value ». Pourtant, la physiologie était bien alors en train de se saisir de la théorie physique du travail pour l'appliquer à l'homme et bientôt au travail industriel.

Le travail physiologique

L'étude mécanique du travail humain butait comme nous l'avons vu chez Coulomb à la fin du XVIII^e s. sur l'impossibilité de mesurer la dépense animale. Pourtant, Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) avait proposé en 1789 une voie de résolution du problème, qui anticipait la thermodynamique. Il montrait en effet l'existence d'une proportionnalité entre l'effort exercé (mesurable en « travail ») et l'oxygène consommé et en tirait des conclusions audacieuses sur la nature mécanique de tout travail, manuel et intellectuel : « Ces lois sont même assez constantes, pour qu'en appliquant un

homme à un exercice pénible, on puisse établir à quel poids, élevé à une hauteur déterminée, répond la somme des efforts qu'il fait pendant le temps de l'expérience. Ce genre d'observation conduit à comparer les emplois de forces entre lesquels il semblerait n'exister aucun rapport. On peut connaître, par exemple, à combien de livres en poids répondent les efforts d'un homme qui récite un discours, d'un musicien qui joue d'un instrument. On pourrait même évaluer ce qu'il y a de mécanique dans le travail du philosophe qui réfléchit, de l'homme de lettres qui écrit, du musicien qui compose. Ces effets, considérés comme purement moraux, ont quelque chose de physique et de matériel qui permet, sous ce rapport, de les comparer avec ceux de l'homme de peine. Ce n'est donc pas sans quelque justesse que la langue française a confondu, sous la dénomination commune de *travail*, les efforts de l'esprit comme ceux du corps, le travail du cabinet et le travail du mercenaire. » Ce mémoire eut une descendance directe. En 1822, l'Académie des sciences mit au concours « la chaleur animale ». César Despretz (1792-1863), qui fut primé, et Pierre-Louis Dulong (1785-1838) reprennent alors les expériences de Lavoisier. La bioénergétique ainsi fondée contribuera à la mise en évidence du premier principe thermodynamique à travers notamment les travaux de Julius-Robert Mayer (1814-1878). Médecin de bord, celui-ci induira la théorie de la conservation de son expérience des saignées, qui faisaient couler un sang plus rouge, c'est-à-dire moins désoxygéné, sous les tropiques que dans les climats tempérés. Complétées et révisées par la thermodynamique chimique de Marcellin Berthelot (1827-1907), les hypothèses de Lavoisier trouveront, pour ce qui concerne le travail physique, une confirmation éclatante à la fin du XIX^e s. dans les travaux de Max Rubner (1854-1932) sur le chien (1894), puis dans ceux de Wilburn Atwater (1844-1907) sur l'homme (1899) d'où est issue la mesure « calorique » des aliments.

Cette question serait hors de propos dans cette notice si elle n'avait pas fait ressurgir une discussion sur le concept de travail. Le physiologiste français Auguste Chauveau (1827-1917), proche collaborateur d'Étienne-Jules Marey (1830-1904), l'inventeur de la « chronophotographie », introduisit en effet en 1888 le concept de « travail physiologique », correspondant à l'énergie dépensée par un muscle en contraction, qu'il induise ou non un travail extérieur mécaniquement mesurable. Le point de départ de sa réflexion est la question du « travail statique », c'est-à-dire de l'apport énergétique, nécessaire aux organismes animaux (et non aux machines inanimées), pour soutenir statiquement une charge : « Dans le cas du muscle au contraire (du cas des machines inanimées), la tension résulte du mouvement vibratoire incessant dû à la mise en jeu de la contractilité, c'est-à-dire au *travail physiologique* du muscle. Si le soutien d'un poids n'est pas du travail comme l'entendent les mécaniciens, et ne consomme aucune énergie, il n'en est pas moins vrai qu'un muscle soutenant une charge *travaille à sa manière*, plus ou moins suivant le poids de la charge, et que ce travail

entraîne une dépense plus ou moins grande d'énergie. Le muscle travaille si bien qu'il en résulte une fatigue à laquelle il ne pourra bientôt plus résister ; il laissera tomber le poids et éprouvera, pendant un certain temps, la sensation de brisement plus ou moins douloureux qui accompagne toujours la fatigue. »

Un physicien comme M. Gariel, pourtant spécialiste de « physique biologique », critiquera en 1901 cet usage abusif à son sens du terme « travail » : « Le mot *travail* a en mécanique un sens trop précis pour qu'on puisse sans inconvénient l'employer dans un sens différent. [...] il eût été préférable d'adopter une autre expression pour représenter la dépense d'énergie occasionnée par le simple soutien d'une charge. » Ainsi, au début de ce siècle, les physiiciens avaient investi le concept de travail comme totalement endogène à leur discipline, au point d'en oublier l'origine dans une longue tradition d'étude comparée de l'homme et de la machine. Cela n'empêchera pas la genèse à cette même époque d'une physiologie industrielle, issue notamment des travaux de Chauveau et de Marey, qui ira chercher ses sources, au-delà de la thermodynamique, dans la tradition des ingénieurs des XVIII^e et XIX^e s. Le représentant le plus typique en est Jules Amar (1879-1935), fondateur en 1913 du Laboratoire de recherches sur le travail professionnel au Conservatoire national des arts et métiers et dont la thèse de 1909 s'intitulait sans ambages *Le rendement de la machine humaine*. La pensée de cette période, marquée par la phantasmagorie taylorienne de l'homme machinisé, fait ainsi un curieux écho aux recherches des savants et ingénieurs de l'âge classique et encore du début du XIX^e s. qui tentèrent d'élaborer, par comparaison avec le travail humain, une théorie physico-économique de la machine.

- AMAR J., *Le rendement de la machine humaine*, Paris, Bailière, 1909 (thèse). — AMONTONS G., « Moyen de substituer commodément l'action du feu à la force des hommes pour mouvoir les machines », *Mémoires de l'Académie des sciences*, Paris, 1699. — ATWATER W.O. & ROSA E.B., *Description of a new respiration calorimeter and experiments of the conservation of energy in the human body*, Washington, Government Printing Office, 1899. — BURDIN C., « Considérations générales sur les machines en mouvement », *Journal des Mines*, n° 221, Paris, 1815, p. 320-346. — CARNOT L., *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, Paris, 1803. — CHAUVEAU A., « Du travail physiologique et de son équivalence », *Revue scientifique*, Paris, 1888 (repr. in *Le travail musculaire et l'énergie qu'il représente*, Paris, Asselin & Houzeau, 1891). — CHRISTIAN G.-J., *Traité de mécanique industrielle ou exposé de la science de la mécanique déduite de l'expérience et de l'observation*, Paris, Bachelier, 1822-1825. — COMTE A., *Cours de philosophie positive* (1830-1842), rééd., Paris, Hermann, 1975 et 1990. — CORIOLIS G., *Du calcul de l'effet des machines*, Paris, 1829. — COULOMB Ch.-A., « Résultats de plusieurs expériences destinées à déterminer la quantité d'action que les hommes peuvent fournir par leur travail journalier suivant les différentes manières dont ils emploient leurs forces », *Mémoires de l'Académie des sciences*, Paris, 1799 (repr. in *Théorie des machines simples*, Paris, Bachelier, 1821). — COURNOT A.-A., « De la mesure des forces et du travail des machines », chap. add. à sa trad. de Capitaine Kater & Docteur Lardner, *Éléments de mécanique*, Paris, Paulin, 1834 (repr. in

Vatin, 1997) ; *Traité de l'enchaînement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire*, Paris, Hachette, 1861 (rééd., Paris, Vrin, 1982). – DESPRETZ C., « Recherches expérimentales sur les causes de la chaleur animale », *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. XXVI, 1824, p. 337-364. – DULONG P.-L., « Mémoire sur la chaleur animale », *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. I, 1841, p. 440-455. – DUPIN Ch., « Introduction d'un nouveau cours de géométrie et de mécanique appliqué aux arts en faveur de la classe ouvrière » (1824), in *Discours et leçons sur l'industrie, le commerce et la marine et sur les sciences appliquées aux arts*, t. 2, Paris, 1825. – ENGELS F., *Dialectique de la nature* (posthume), trad. fr., Paris, Ed. Sociales, 1968 (les pages citées d'après l'édition de 1880-1881). – GABRIEL M., « Travail fourni par les animaux ; rendement des moteurs animés », in D'ARSONVAL et al., *Traité de physique biologique*, Paris, 1901. – HACHETTE J.-P.-N., *Traité élémentaire des machines*, Paris, 1811 et 1819. – LAGRANGE J.-L., *Mécanique analytique* (1788), repr. in LAGRANGE, *Œuvres*, éd. J.-A. Serret, Paris, Gauthier-Villars, 1867-1892 (t. 11 et 12), ainsi que chez Joseph Gabay, Paris, 1989. – LAVOISIER A.-L., « Mémoire sur la respiration des animaux », *Mémoires de l'Académie des sciences*, Paris, 1789, repr. in *Œuvres*, Paris, Imprimerie impériale, 1862-1864, t. 2, p. 688-703. – LEIBNIZ, *Brevi demonstratio erroris memorabilis Cartesii* (1786), rééd. M. Fichant, Paris, Vrin, 1994. – MAYER J.-R. VON, « Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur », *Annalen der Chemie und Pharmazie*, 42, 1842, p. 233-240 (partiellement repris en français in *Annales de Chimie et de Physique*, respectivement 3, 34, 1852, p. 501-503). – MONTGOLFIER J., « Mémoire sur la possibilité de substituer le bélière hydraulique à l'ancienne machine de Marly », *Bulletin de la société d'encouragement pour l'industrie nationale* (1808), p. 117-124 et 136-152, et *Journal de l'école polytechnique*, 1808, p. 289-318. – NAVIER C.-L., « Sur les principes du calcul et de l'établissement des machines et sur les moteurs », add. à sa rééd. de l'*Architecture hydraulique* de Belidor, Paris, Firmin Didot, 1819, p. 376-396. – PONCELET V., *Cours de mécanique industrielle fait aux ouvriers messins*, Metz, 1829 (2^e éd., 1840 ; 3^e posthume, M.X. Kretz, sous le titre *Introduction à la mécanique industrielle*, Paris, Gauthier-Villars, 1870). – RUBNER M., « Die Quelle der therischen Wärme », *Zeitf. Biol.*, vol. XXX, 1894, p. 73-142. – SAY J.-B., *Traité d'économie politique*, Paris, 1803 (rééd. d'après 5^e éd., 1826, Paris, Calmann-Lévy, 1972). – S'GRAVESANDE G., « Remarques sur la force des corps en mouvement et sur le choc » (1729), in *Œuvres philosophiques et mathématiques*, Amsterdam, 1774, t. 1.

► FLORKIN M., « Des forces de vie à la bio-énergétique », *Revue d'histoire des sciences*, t. XXIX, 1971, p. 289-297. – GILLISPIE C. & YOUSCHKEVITCH A., *Lazare Carnot savant*, Paris, Vrin, 1979. – KUHN T., « Un exemple de découverte simultanée : la conservation de l'énergie (1959), repr. in *La tension essentielle*, trad. fr., Paris, Gallimard, 1990, p. 111-156. – SERIS J.-P., *Machine et communication, du théâtre des machines à la mécanique industrielle*, Paris, Vrin, 1987. – VATIN F., *Le travail, économie et physique (1780-1830)*, Paris, PUF, 1993 ; « Du travail à la fatigue, genèse et échec de la psychophysiologie du travail », *Bulletin de psychologie*, t. XLIX, n° 425, juill.-août 1996, p. 520-529 ; *Economie politique et économie naturelle chez Antoine-Augustin Cournot, essai d'épistémologie comparée des sciences de l'homme et des sciences de la nature au XIX^e siècle*, Paris, PUF, 1997. – Coll. : *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, n° 29, 1990, « Le moteur hydraulique en France au XIX^e siècle » (notamment les articles de Bruno et Jean-François Belhoste).

François VATIN

→ Empirionisme ; Énergie ; Leibniz ; Technique.

TROU NOIR

Les corps obscurs

L'histoire des représentations cosmiques montre que l'idée d'un astre noir, antinomique à l'astre solaire qui préside à la lumière, est née dès lors qu'est apparue une intuition globale de l'univers. Les travaux des astronomes ont donné de la consistance à cette vieille image après la publication des *Principia* d'Isaac Newton (1686), où il est établi que la matière universelle est soumise à une force de gravitation inexorablement attractive. Les débuts de l'histoire des trous noirs se confondent ainsi avec celle de l'action de la gravitation sur la propagation de la lumière.

En 1750, Thomas Wright (*An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*) fait l'hypothèse que notre galaxie tout entière tourne autour d'un centre mystérieux à la densité fabuleuse, un corps invisible s'apparentant à un soleil noir. En 1783, le révérend anglais John Michell publie dans les *Philosophical Transactions* de la Royal Society un article sur une méthode pour estimer la masse des étoiles en détectant le ralentissement de la lumière dû à l'effet de la gravitation sur les corpuscules de lumière. Dans son raisonnement, Michell fait logiquement remarquer qu'un corps suffisamment dense et massif arrêterait complètement la lumière qu'il émet, et serait donc invisible hormis par l'influence gravitationnelle qu'il exercerait sur une étoile voisine : « Si le rayon d'une sphère de même densité que le Soleil dépasse le rayon de celui-ci dans une proportion de 500 à 1, un corps, tombant d'une hauteur infinie vers elle, aurait acquis à sa surface une vitesse plus grande que celle de la lumière ; en supposant que la lumière soit attirée par la même force en proportion de sa vis inertiae, comme les autres corps, toute la lumière émise par un tel corps y retournerait, sous l'effet de sa propre gravité. »

En France, Pierre-Simon Laplace présente ses idées sur les astres invisibles de manière concise – et apparemment indépendante de celle de Michell. Dans les premières éditions de son *Exposition du système du monde*, il écrit : « Il existe donc dans les espaces célestes des corps obscurs aussi considérables, et peut-être en aussi grand nombre que les étoiles. Un astre lumineux de même densité que la terre et dont le diamètre serait deux cent cinquante fois plus grand que celui du soleil, ne laisserait, en vertu de son attraction, parvenir aucun de ses rayons jusqu'à nous ; il est donc possible que les plus grands corps lumineux de l'univers soient, par cela même, invisibles » (livre V, chap. vi). Laplace donne ensuite les conditions pour qu'un astre soit invisible : il doit être suffisamment massif pour que sa force gravitationnelle empêche la lumière de s'échapper. Son calcul donne environ 10 millions de masses solaires, ce qui correspond à ce que nous appelons aujourd'hui un « trou noir supermassif ».

Ses considérations, tout comme celles de Michell, auront un retentissement modeste. D'une part, leur

intuition ne peut être étayée par des données observationnelles ; d'autre part, la question de l'influence de la gravitation sur la propagation de la lumière ne sera plus à l'ordre du jour au XIX^e s. : la théorie ondulatoire de la lumière, qui se développe alors, est exempte de tels effets. Laplace supprime lui-même le paragraphe en question dans l'édition de 1835.

L'hypothèse des corps obscurs est donc mise en sommeil chez les astronomes (à quelques exceptions près), mais elle imprègne fortement l'imagination d'écrivains romantiques comme Edgar Poe, Gérard de Nerval ou Jean-Paul Richter. Or, en 1915, la théorie de la relativité générale mise au point par Albert Einstein établit que toute forme d'énergie gravite. La relativité générale est bâtie sur d'autres concepts que ceux de l'attraction universelle de Newton : la gravitation devient courbure de l'espace-temps, déterminée par la distribution de matière. Les spéculations sur l'existence d'astres capables d'emprisonner la lumière peuvent dès lors reprendre. Dès janvier 1916, Karl Schwarzschild découvre la métrique d'espace-temps décrivant le champ gravitationnel statique engendré par une masse sphérique sans rotation, dans le vide. Cette solution est d'une grande portée : ne dépendant que d'un seul paramètre – la masse centrale –, elle décrit aussi bien la géométrie de l'espace-temps autour d'une étoile sphérique ordinaire (par exemple le Soleil) que celle régnant autour d'une masse ponctuelle. Toutefois, la métrique devient apparemment singulière (en ce sens que certaines coordonnées d'espace-temps deviennent infinies) à un certain rayon critique, déjà calculé par Laplace et Michell dans le contexte de la théorie newtonienne. Cette « singularité de Schwarzschild » bloque le développement de la théorie. Les infinis relativistes font en effet « horreur » à la plupart des physiciens ; Arthur Eddington qualifie le rayon critique de « cercle magique à l'intérieur duquel aucune mesure ne peut nous conduire », et lui dénie toute pertinence physique. Tous les astrophysiciens de l'époque lui emboîtent le pas, à l'exception de son ancien étudiant, le Belge Georges Lemaître. Ce dernier démontre en 1933 que la singularité du champ de Schwarzschild n'est pas réelle : des infinis n'y apparaissent qu'en raison d'un mauvais choix du système de coordonnées. Il construit un système de coordonnées équivalent où ces infinis disparaissent, mais son argumentation, perdue dans un long article au contexte cosmologique beaucoup plus général, passe inaperçue. Einstein l'ignore, de même qu'il reste sourd aux arguments (avancés par le même Lemaître) selon lesquels l'expansion de l'univers à partir d'une singularité initiale est une conséquence inéluctable de la relativité générale. Or, il s'agit bien là – effondrement gravitationnel et expansion cosmique – des deux prédictions les plus novatrices de la gravitation relativiste. En 1939, Einstein publie *Sur un système stationnaire à symétrie sphérique composé de plusieurs masses liées par la gravitation*, où il entend prouver l'inexistence de corps célestes assez denses pour que leur gravitation empêche la lumière de s'échapper. Sa conclusion : « Le

résultat principal de cette recherche est la compréhension claire des raisons pour lesquelles les singularités de Schwarzschild n'existent pas dans la réalité physique » est erronée ; tout comme il l'avait fait avec la constante cosmologique, introduite pour interdire un modèle d'univers dynamique au profit d'un univers statique, Einstein impose une hypothèse supplémentaire pour parvenir au résultat qu'il souhaite : interdire les astres invisibles !

Cependant, quelques mois plus tard, Robert Oppenheimer et Hartland Snyder publient *Sur la poursuite de la contraction gravitationnelle*, où ils utilisent pleinement la relativité générale pour démontrer qu'au-dessus d'une certaine masse un astre « froid » (c'est-à-dire non alimenté par une chaleur interne mais maintenu en équilibre par une pression de dégénérescence d'origine quantique) doit inexorablement s'effondrer en dessous de son rayon critique et, dès lors, se couper de toute communication avec le monde extérieur.

Le concept d'effondrement gravitationnel sans limite reste toutefois pure spéculation théorique jusqu'à ce que le caractère artificiel de la singularité de Schwarzschild ne soit redécouvert dans les années 1960, et surtout jusqu'à ce que l'observation astronomique mette au jour un certain nombre de phénomènes célestes, tels les quasars et les sources X binaires, dont l'interprétation exige l'existence réelle d'astres massifs imperméables à la lumière.

Le trou noir relativiste

L'expression de « trou noir », proposée pour la première fois par John Archibald Wheeler lors d'une conférence donnée le 29 décembre 1967, fera vite fortune. On y trouve la notion essentielle d'un objet purement relativiste et, à ce titre, générateur des déformations les plus extrêmes de l'espace-temps, capables d'emprisonner matière et lumière. À mesure qu'une étoile se contracte, son champ gravitationnel augmente, comme si un puits de plus en plus profond se creusait dans la structure élastique de l'espace-temps. Les rayons lumineux émis par l'étoile, astreints à épouser les parois du puits, ont de plus en plus de mal à s'échapper. Lorsque l'étoile atteint le rayon critique de Schwarzschild, le puits devient si profond que toute la lumière reste emprisonnée : le trou noir est né.

C'est entre 1967 et 1975 que la théorie des trous noirs progresse le plus. Wheeler, Ruffini, Penrose, Hawking, Carter et quelques autres pionniers en donnent les théorèmes fondamentaux et fixent la terminologie : la surface du trou noir est appelée « horizon des événements », la périphérie immédiate d'un trou noir en rotation est nommée « ergosphère », etc. Ils s'attachent à décrire des solutions « trou noir » plus complexes que celle trouvée par Schwarzschild. En effet, un trou noir peut également être en rotation et posséder une charge électrique. Ceci permet d'énoncer le théorème fondamental de la physique des trous noirs,

selon lequel le trou noir isolé le plus général est entièrement spécifié par trois paramètres – sa masse, son moment angulaire et sa charge électrique. En conséquence, il n'existe qu'un nombre réduit de types différents de trous noirs : ceux de Schwarzschild (sphériques, sans mouvement de rotation ni charge électrique), ceux de Kerr (non sphériques, avec mouvement de rotation mais sans charge électrique), ceux de Reissner-Nordström (sans rotation et chargés électriquement) et ceux de Kerr-Newman (à la fois en rotation et chargés).

Au cours de cette période, le trou noir passif qui distord l'espace-temps sans que rien ne l'affecte lui-même laisse la place au trou noir dynamique, capable de subir ou d'exercer des forces, d'absorber ou de fournir de l'énergie, de se transformer au cours du temps. Cette image du « trou noir – machine » vient tout droit d'un rêve du XIX^e s., celui des bâtisseurs de moteurs perpétuels : nourrir le fonctionnement d'une machine par ses propres déchets. Car un projectile pourrait, si sa trajectoire était bien calculée, se disloquer de telle sorte qu'une partie soit capturée par le trou noir mais qu'une autre revienne à l'envoyeur avec une énergie plus grande, le gain provenant de l'énergie rotationnelle du trou noir. Pourquoi dès lors ne pas imaginer des cités industrielles du futur bâties autour des trous noirs ? Frappante illustration d'une physique des plus spéculatives qui ne se contente pas d'explorer, mais qui prétend exploiter !

À la même époque, la mécanique quantique fait une entrée en force dans la théorie des trous noirs. Dans la conception classique, rien ne peut sortir d'un trou noir. Mais dans la description quantique, aucune particule ne peut être considérée comme définitivement prisonnière d'une barrière de potentiel. Le principe d'incertitude appliqué à la théorie des trous noirs microscopiques crée des tunnels quantiques à travers l'horizon gravitationnellement infranchissable, permettant ainsi aux trous noirs de s'évaporer. En 1974, S. Hawking introduit la faune des trous noirs quantiques, formés non par effondrement gravitationnel d'astres massifs mais lors des tout premiers instants de l'univers, par condensation brutale de grumeaux dans la pâte primordiale : mini-trous noirs d'une tonne qui s'évaporent en dix milliardièmes de seconde, trous noirs de la masse d'une montagne mais de la taille d'un proton qui pourraient survivre quinze milliards d'années – l'âge estimé de notre univers. Le résultat le plus remarquable est que leur évaporation devrait se manifester sous forme d'un rayonnement de corps noir, dont la température est fixée par l'accélération de la pesanteur à l'horizon. Les lois qui régissent l'évolution des trous noirs en interaction avec de la matière ou du rayonnement deviennent parfaitement analogues aux lois de la thermodynamique ordinaire. Par un curieux retournement de l'histoire, le trou noir, avec ses trois paramètres qui en caractérisent entièrement le comportement, devient l'objet le plus simple de toute la physique !

Le statut observationnel

Au début des années 1980, alors que la théorie classique des trous noirs est pratiquement « bouclée », leur statut observationnel est encore inexistant. Deux siècles après Michell et Laplace, l'existence des trous noirs géants est réintroduite pour expliquer les grandes quantités d'énergie libérées par les noyaux actifs de galaxies et les *quasars*. Mais les preuves observationnelles restent précaires, jusqu'aux analyses récentes du télescope spatial Hubble, qui sont réellement convaincantes. On suspecte désormais la présence de trous noirs supermassifs au centre de pratiquement toutes les galaxies, y compris la nôtre. Ce n'est que dans la deuxième moitié de la décennie 1970 que, grâce aux satellites d'observation dans la gamme du rayonnement X, les premiers « candidats » trous noirs à l'échelle stellaire font leur apparition. On compte aujourd'hui une dizaine de candidats dans notre galaxie, tout en estimant qu'elle peut en abriter une centaine de millions. Malgré ces indices favorables, le statut observationnel des trous noirs est encore précaire. Seule peut-être la détection des ondes gravitationnelles rendra leur existence indiscutable.

L'histoire des trous noirs n'est parvenue à maturité qu'à partir du moment où l'objet dont elle traite s'est matérialisé en une image réaliste, c'est-à-dire une visualisation scientifique. Mais que signifie le terme « image » à propos d'un objet par définition invisible ? Il existe des situations astronomiques plausibles où un trou noir est entouré d'un disque de gaz chaud tombant en spirale, de façon analogue au mouvement de l'eau entraînée dans un tourbillon ; le gaz s'échauffe et produit du rayonnement. L'apparence photographique d'un tel système a été simulée sur ordinateur pour la première fois en 1978, par l'auteur de ces lignes. Ce travail de visualisation numérique a été repris et développé un peu partout dans le monde, y compris dans le domaine extra-scientifique, par exemple le cinéma : le trou noir est l'un des rares objets de l'astrophysique (avec les comètes et les météores) à avoir suscité des films à grand spectacle.

Au-delà de leur impact sur l'imagination populaire, les trous noirs sont au cœur d'un double enjeu : multiplier le nombre de connexions entre différents champs de la physique, et faire reconnaître l'urgence d'un programme expérimental qui consacrerait leur existence. On voit donc aujourd'hui les trous noirs s'ouvrir à tous les domaines de la physique susceptibles d'accroître leur capital de pertinence. La puissance fascinatrice qu'ils exercent – tant chez le grand public que chez les spécialistes – est un cas unique en physique fondamentale, sans doute lié à l'idée très anthropomorphe d'un destin invisible où s'effondre toute existence, un voyage sans retour vers un gouffre indicible où toute identité se perd.

► BEGELMANN & REES M., *Gravity's fatal attraction : Black Holes in the universe*, New York, Scientific American Library, 1996. – ISRAEL W., « Dark Stars : the Evolution of an Idea », in

HAWKING S.W. & ISRAEL W. éd., *300 Years of Gravitation*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1987. – LAPLACE P.S., *Exposition du système du monde*, Paris, Imprimerie du Cercle Social, an IV (1796). – LEMAITRE G., « L'Univers en Expansion », *Annales de la Société des Sciences de Bruxelles*, 1933, série A, t. III, p. 51-85. – LUMINET J.-P., *Les Trous noirs*, Paris, Le Seuil « Points Sciences », 1992 ; *Les Poètes et l'univers*, Paris, Le Cherche-Midi, 1996. – MICHELL J., *Philosophical Transactions of the Royal Society* Londres, 1784, vol. 74, p. 35-57. – RUFFINI R. & WHEELER J.-A., « Introducing the Black Hole », *Physics Today*, janv. 1971, vol. 24, n° 1, p. 30-41.

Jean-Pierre LUMINET

→ Espace-temps ; Gravitation ; Lumière ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Propagation.

TURING Alan Mathison, 1912-1954

Mathématicien et logicien britannique, il a apporté en 1936 des éléments théoriques fondamentaux ouvrant la voie à l'informatique et à l'intelligence artificielle. Il joua un rôle important lors de la bataille de l'Atlantique en déchiffrant les codes de transmission allemands, contribua à la réalisation du premier ordinateur britannique (en 1949), et consacra d'importants travaux à la question théorique de l'intelligence artificielle et au problème de la morphogénèse. Il fut condamné pour homosexualité, qu'il refusa de renier au cours de son procès (cf. Hodges, trad. fr., p. 393), et sa mort par empoisonnement est considérée aujourd'hui comme un suicide (*ibid.*, p. 402). La machine de Turing, précurseur et modèle abstrait des ordinateurs, relie le concept mathématique de calculabilité au concept intuitif ou informel d'algorithme, procédure effective de réalisation d'un calcul : est calculable, selon Turing, toute opération qui peut être réalisée par sa machine idéale. Par ce moyen, Turing résout « le problème de la décision » de Hilbert : il démontre, dans « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », qu'il existe des problèmes mathématiques pour lesquels il n'y a pas d'algorithme de résolution. Les philosophes des sciences cognitives ont réinterprété le concept de machine de Turing et parlent d'un « fonctionnalisme de Turing » où ils voient un fondement philosophique de leur discipline (cf. Putnam, in Anderson, trad. fr., p. 110-134).

● *Collected Works of A.M. Turing*, 3 vol. parus : *Pure Mathematics*, *Mechanical Intelligence*, *Morphogenesis*, Amsterdam, North-Holland. – « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », 1^{re} publ. in *Proceedings of the Mathematical Society*, vol. 42, 1936-1937, p. 230-265 (trad. fr. J. Basch, « Théorie des nombres calculables, suivie d'une application au problème de la décision », in GIRARD J.-Y., *La machine de Turing*, Paris, Le Seuil « Sources du savoir », 1995, p. 47-102).

► ANDERSON A. éd., *Minds and Machines*, New York, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1964 (trad. fr. P. Blanchard, *Pensée et Machine*, Seyssel, Champ Vallon, 1983). – HERKEN R. éd., *The Universal Turing Machine. A Half-Century Survey*, Oxford, Oxford Univ. Press, 1988. – HODGES A., *Alan Turing :*

The Enigma of Intelligence, Londres, Burnett Books Limited, 1983 (trad. fr. abrégée N. Zimmermann, *Alan Turing ou l'énigme de l'intelligence*, Paris, Payot « Bibliothèque scientifique », 1988). – NEF F. & VERNAANT D. dir., *Le formalisme en question : le tournant des années 30*, Paris, Vrin, 1998.

Françoise SIKI

→ Cognitivism ; Complexité algorithmique ; Computation ; Information et codage ; Informatique ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Monisme ; Récurrence ; Sciences cognitives.

UNIFORMITARISME → Actualisme ou uniformitarisme

UNIVERS

Peut-on considérer l'univers comme un objet de la physique ? Cette question pertinente marque deux étapes majeures de l'histoire de la discipline. Il s'agit tout d'abord de la naissance même de la physique qui, autour du XVII^e s., résulte d'un mouvement collectif jalonné par les grands noms de Tycho Brahé, Kepler, Galilée, Newton... L'acte fondateur peut être considéré comme un entremêlement d'unifications : celle de la matière, celle du mouvement, celle de l'espace... aboutissant précisément au concept d'univers. Désormais, il n'y a plus qu'un seul espace où règnent les lois de la physique, et non une Terre et un Ciel où les phénomènes seraient fondamentalement différents. Il n'y a plus qu'une sorte de matière, présente partout, et non pas quatre éléments se combinant de manière éphémère et corruptible ici, tandis qu'une quintessence parfaite baignerait les cieux. Il n'y a plus deux types de mouvement, ici sur Terre et là-bas dans les cieux, mais une seule dynamique, énoncée par Newton, qui les gouverne tous. Bref, le Monde est vu comme un univers où les lois sont précisément... universelles.

Cette universalité fonde la physique. En effet, comment pourrait-on reproduire une expérience si les lois physiques n'étaient pas les mêmes ici qu'ailleurs ? Si la matière changeait de nature et obéissait à des lois différentes lorsque l'on se déplace ?

L'univers, s'il justifie cette discipline par son existence, n'est pas un objet de la physique comme les autres. Il est considéré seulement comme un cadre au sein duquel se déroulent les phénomènes. Un cadre constitué de l'espace et du temps, dont Newton a énoncé de manière précise et géométrique les propriétés dans ses *Principia*, tout à la fois acte de naissance de la physique et définition opérationnelle de l'univers. Ce cadre inaltérable n'obéit à aucune loi sinon celle qui énonce sa pérennité, son caractère rigide et absolu. Il y a l'univers, et les objets qu'il renferme, de natures différentes. Cette conception permettra à la physique de substantiels progrès, jusqu'au XX^e s. Celle-ci décrit des processus qui se déroulent dans l'univers sans l'affecter. Cette conception laisse ouvertes, bien entendu, de nombreuses questions métaphysiques, celles de la finitude de l'espace, de l'origine et du destin du monde par

exemple. Mais cela n'empêche pas la discipline d'être parfaitement opérationnelle.

Les choses changent au début du XX^e s. Dans la première décennie, Albert Einstein unifie, par la théorie de la relativité restreinte, la cinématique de la matière avec celle des rayonnements électromagnétiques. Le prix à payer est assez cher : durées et longueurs ne sont plus absolues mais leurs estimations dépendent de l'observateur. Cet état de chose, amplement vérifié par l'expérience, oblige à une révision des concepts d'espace et de temps. Hermann Minkowski proposera de manière audacieuse la réunion de l'espace et du temps dans une entité plus globale : l'espace-temps. La géométrie permet de définir de manière précise les propriétés de ce nouvel être mathématique et physique. Alors les effets observés de contraction des longueurs ou de dilatations des durées s'interprètent comme de purs effets géométriques dans ce nouveau cadre élargi. Désormais, le statut que l'on accordait à l'espace et au temps, c'est à l'espace-temps qu'il faudra l'accorder.

Cette première atteinte à la conception newtonienne est toutefois limitée dans ses conséquences. Tout d'abord, pour un observateur donné, les choses ne changent guère. Pour lui chaque phénomène possède une durée bien déterminée, chaque objet est muni d'une longueur bien définie, et mesurable. Espace et temps apparaissent séparés. Ce n'est que lorsque l'on veut envisager simultanément plusieurs observateurs possibles, ou que l'on veut considérer les choses dans leur globalité, que le caractère entremêlé de l'espace et du temps se manifeste. De plus, nombre des propriétés « newtoniennes » de l'univers sont conservées : il s'agit toujours d'un cadre inaltérable et indéformable au sein duquel se déroulent les phénomènes. L'univers n'évolue pas mais reste toujours identique à lui-même. L'espace-temps est infini dans toutes ses dimensions, ce qui veut dire que l'espace est infini, comme chez Newton : le temps l'est également, dans le futur comme dans le passé.

La seconde étape de la révolution cosmologique du XX^e s. sera plus profonde : il s'agit d'une cosmologie relativiste, c'est-à-dire fondée sur la théorie révolutionnaire de la relativité générale, énoncée par Albert Einstein en 1915. Elle prend acte, tout d'abord, de ce qu'il faut raisonner en termes d'espace-temps et non plus d'espace et de temps séparés. Mais la grande nouveauté c'est que cet espace-temps possède désormais une structure riche et complexe, représentée par ce que les mathématiciens appellent une variété. La notion de variété à 2 dimensions généralise la notion de surface : elle offre la richesse de l'ensemble de toutes les surfaces imaginables (et même davantage) par rapport à la variété la plus simple, le plan. Les variétés à 3 dimensions généralisent l'espace euclidien, c'est-à-dire l'espace « ordinaire », par rapport auquel elles offrent une richesse nouvelle. Celles à 4 dimensions généralisent la notion d'espace-temps, par rapport à l'espace-temps le plus simple, celui de la relativité restreinte. La relativité générale permet à la physique de profiter de cette richesse géométrique.

Cette nouvelle vision apporte une avalanche de nouveautés. À côté de certaines qui relèvent de l'étude de

systèmes particuliers, notamment en astrophysique, les implications les plus fondamentales concernent la cosmologie. Avant toute chose, il convient de préciser qu'il reste possible de distinguer temps et espace au sein de l'espace-temps de la relativité générale. Cela peut toujours être accompli de manière locale, pour un observateur particulier. Sous certaines conditions (que nous supposons vérifiées), cela peut l'être également de manière globale, et donc pour la cosmologie.

Première nouveauté, la relativité permet d'envisager tout aussi bien que l'espace soit fini ou infini, dans son extension, dans son volume. Ceci, dans un cas comme dans l'autre, sans qu'il y ait de bord, de frontière. Seule la nouvelle théorie des variétés (ou géométrie non euclidienne) permet cette innovation qui clôt un débat remontant à l'Antiquité grecque. Il est désormais tout aussi possible d'envisager la finitude que l'infinitude de l'espace : la réponse doit provenir des observations. Seconde originalité à propos du temps. L'écoulement du temps, selon la nouvelle théorie, peut être aussi bien fini qu'infini ; et cela dans le passé comme dans le futur. Dans ce cas encore, les observations nous viennent en aide. Elles nous indiquent que très vraisemblablement le temps ne s'écoule que depuis une durée finie que l'on appelle « âge de l'univers ». En revanche elles ne nous disent encore rien sur le caractère fini ou infini de l'écoulement du temps dans le futur.

La révolution est déjà énorme puisqu'elle renouvelle totalement la problématique de la finitude de l'espace et du temps, déjà posée plus de deux millénaires auparavant. Mais ce n'est pas tout. L'espace-temps, envisagé sous la forme d'une variété à 4 dimensions, possède une structure qui se décrit, mathématiquement, par une courbure et une topologie. Or cette structure est observable et mesurable. Par exemple on peut en principe mesurer la courbure spatiale de l'espace, même si les observations ne sont pas encore assez fines pour nous indiquer sa valeur. On peut aussi mesurer la courbure temporelle, qui s'identifie au taux d'expansion de l'univers, que les astronomes savent mesurer, même si c'est avec une précision limitée. Il est important de comprendre que ces deux propriétés ne sont pas des propriétés de la matière, ou des galaxies, ou de quelque structure cosmique que ce soit. Leur caractère universel, précisément, impose de les attribuer à l'univers dans son ensemble, qui devient ainsi un objet de la physique, muni de propriétés mesurables. S'il reste pertinent de s'interroger à propos de la réalité de cet objet physique, ce n'est pas davantage qu'à propos de n'importe quel objet de cette discipline. Au contraire, l'univers est probablement le seul objet physique dont l'existence soit pleinement assurée. Nul n'a jamais vu l'univers, mais nul n'a vu non plus ni ne verra directement, par exemple, un électron : on peut voir au mieux de la lumière que ça interagisse avec lui. Et la physique quantique nous dit d'ailleurs que ce dernier n'existe pas vraiment. Quant à l'univers, nous le voyons, par l'intermédiaire du fond diffus cosmologique, tout

autant que n'importe quel objet. Mais s'il n'existe qu'une seule chose dont l'existence soit assurée, ce ne peut être que l'univers. En effet, dès lors qu'existent des objets, des électrons par exemple, ou nous-mêmes, existent aussi nécessairement l'ensemble de toutes ces choses et le cadre dans lequel elles se situent, c'est-à-dire précisément l'univers.

Jusqu'à la relativité, on pouvait voir l'univers de deux manières. Soit comme le cadre spatio-temporel abritant les phénomènes, ainsi que nous l'avons présenté dans la vision newtonienne. Soit comme la collection de tout ce qui existe, matière, rayonnements, énergie et tout ce que l'on peut imaginer. Jusqu'au XX^e s., cette seconde manière de voir l'univers n'était guère intéressante ni fructueuse car les objets demeurent dans le cadre passif défini précédemment et le fait d'envisager leur totalité n'apporte rien de plus. Mais, au XX^e s. relativité et physique quantique modifient le tableau.

La relativité apporte tout d'abord une innovation remarquable : l'espace-temps n'est plus inaltérable et absolu. Au contraire, ses propriétés sont déterminées par son contenu matériel : l'énergie (matière, rayonnements...) déforme l'espace-temps, lui confère une structure particulière et déterminante (sa courbure). Par ailleurs, c'est bien entendu dans cet espace-temps ainsi déformé qu'évolue la matière. Ainsi cadre géo-chronométrique et contenu matériel deviennent-ils couplés et inséparables. Les deux conceptions de l'univers sont ainsi réunies dans une seule, beaucoup plus riche. Un premier pas, pensent certains, vers une unification de la matière et de la géométrie.

La physique quantique intervient aussi, d'une manière qui n'a guère été soulignée. Cette théorie présente en effet une propriété nouvelle et originale, dite de « non-séparabilité ». Elle exprime que, en droit, il n'est pas possible de considérer séparément deux objets, par exemple deux particules, qui ont déjà interagé. Or tous les objets qui remplissent l'univers ont déjà interagé d'une manière ou d'une autre, par exemple par l'intermédiaire de la gravitation. La physique quantique interdit donc, en toute rigueur, de parler d'autre chose que de la totalité des objets, c'est-à-dire de l'univers dans son ensemble. Autrement dit, l'univers est le seul objet dont la physique quantique ait le droit de parler. S'intéresser à tel ou tel système plus ou moins isolé ne résulte que d'une approximation. Personne ne doute de la validité de cette dernière, du moins pour la plupart des problèmes usuels, mais du point de vue conceptuel, ce n'est qu'une vision approchée. Par ailleurs, la physique quantique est incapable de traiter correctement de l'univers car il lui est impossible, à ce stade, de tenir compte de sa riche structure géométrique. Cette insuffisance fondamentale laisse penser que cette théorie n'est sans doute pas définitive.

La cosmologie moderne renouvelle en tout cas très profondément notre manière de considérer l'univers. En même temps, elle nous a conduit à en découvrir de nouvelles propriétés : quant à ses dimensions spatiales

d'une part, et quant à son évolution d'autre part. Jusqu'à la Renaissance environ, le Monde était considéré comme clos, son extension se réduisant à celle du Système solaire, borné par la sphère des [étoiles] fixes. Au XIX^e s., les astronomes avaient étendu son extension à celle de notre galaxie, la Voie lactée. Ils débattaient de la forme et des dimensions de cette dernière, mais l'identifiaient à la quasi-totalité de l'univers. Le soupçon que d'autres régions d'univers puissent exister avait pourtant effleuré non nombre de penseurs, dans une tradition que marquent les noms de Giordano Bruno et d'Emmanuel Kant. À la suite de plusieurs observations de la fin du XIX^e s., et à la suite d'un débat aigu parmi les astronomes, Edwin Hubble montra définitivement, en 1924, que d'autres galaxies existent en dehors de la nôtre. L'univers se révélait ainsi à nos télescopes immensément plus étendu que ce que l'on soupçonnait. Aujourd'hui, l'observation de dizaines de milliers de galaxies nous assure que ses dimensions dépassent le milliard d'années-lumière, sans que nous puissions savoir avec certitude si ses dimensions, son volume, sont finis ou infinis.

La seconde nouveauté fondamentale de notre cosmologie, sans doute encore plus surprenante, réside dans la reconnaissance de l'évolution de l'univers. Tous les objets et systèmes de la nature naissent, vivent et meurent. C'est évident pour les êtres vivants mais nous savons aujourd'hui que planètes, étoiles, galaxies évoluent également. En revanche, en vertu d'une conception dont il est difficile de dater l'origine, et marquée au passage par Newton, l'univers est resté considéré, durant des millénaires, comme sans évolution. À tel point que le théoricien Albert Einstein et l'astronome Edwin Hubble, sur les travaux desquels repose aujourd'hui notre conviction que l'univers évolue, eurent du mal à y croire. Nos observations nous le montrent pourtant, en premier lieu celle de l'expansion cosmique. Et cette évolution est aujourd'hui pleinement décrite et prise en compte par les modèles de big bang. D'un point de vue théorique comme d'un point de vue observationnel, l'univers est donc vraiment devenu un objet de la physique, auquel on peut attribuer des propriétés observables et mesurables.

► DEMARET J. & LAMBERT D., *Le principe anthropique*, Paris, A. Colin, 1994. — LACHÈZE-REY M., *Naissance du Cosmos*, Paris, Albin Michel, 1987 ; *Au-delà de l'espace et du temps*, Paris, Éditions du Pommier, 2003. — LUMINET J.-P. & LACHÈZE-REY M., *La Physique et l'infini*, Paris, Flammarion, 1994 ; *Figures du Ciel*, Paris, Le Seuil/Bibliothèque nationale de France, 1998. — MERLEAU-PONTY J., *Cosmologies du XX^e siècle. Étude épistémologique et historique des théories de la Cosmologie contemporaine*, Paris, Gallimard, 1965. — PATY M., *Einstein philosophe*, Paris, PUF « Philosophiques d'aujourd'hui », 1993. — Coll. : *Aux confins de l'Univers*, Paris, Fayard/Fondation Diderot, 1987.

Marc LACHÈZE-REY

→ Big bang ; Constante de Hubble ; Espace-temps ; Expansion de l'univers ; Fin thermique de l'univers ; Masse cachée ; Principe anthropique ; Quantique ; Relativité.

VALENCE

CHIMIE

Le chimiste anglais E. Frankland énonce en 1852 un des concepts de base de la chimie : un atome donné possède une capacité de combinaison indépendante de la nature des atomes auxquels il est lié ; de nombreux autres termes (basicité, capacité de saturation, atomi-cité, quantivalence) vont être utilisés pour désigner cette notion jusqu'à ce que, en 1867, F.A. Kekulé propose le terme de « valence », qui va être finalement adopté.

Kekulé affirme en 1857 le caractère « tétratomique ou tétrabasique » du carbone, c'est-à-dire sa tétravalence. L'année suivante, il considère que les composés organiques sont constitués par des enchainements d'atomes de carbone ayant échangé entre eux des « unités d'affinité », nous dirions des unités de valence. Ces deux propositions fondent la chimie organique structurale qui va être un des facteurs du développement prodigieux de la discipline.

Pour Kekulé, le carbone est toujours tétravalent, ce qui va conduire à un certain nombre de difficultés d'interprétation. La théorie des valences partielles (1899) de J. Thiele permet d'interpréter la réactivité des composés conjugués et à partir de 1891 A. Werner (1866-1919) considère qu'un métal de transition possède en plus de sa valence ordinaire, ou primaire, une valence secondaire, ou indice de coordination ; ces conceptions lui permettent d'expliquer la stabilité des complexes métalliques et de fonder la chimie de transition. G.N. Lewis établit à partir de 1916 une théorie électronique de la valence très opérationnelle et L. Pauling (1901-1994) reprend le concept dans le cadre de la chimie théorique ; une des méthodes utilisées dans les calculs de chimie théorique est la théorie de la liaison de valence.

► PALMER W.G., *A history of the concept of valency to 1930*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1965. – RUSSEL C.A., *The history of valency*, Leicester, Leicester Univ. Press, 1971.

Georges BRAM

VALIDATION

1) En un sens restreint, une conséquence est considérée comme valide (ou un argument est jugé valide) quand cette conséquence ou cet argument sont dérivés de prémisses à partir d'axiomes et de règles d'inférence. C'est donc la forme de dérivation qui distingue ce qui est valide et ce qui ne l'est pas. La vérité des prémisses, ou la vérité des propositions qu'on dérive *ex hypothesi* (en fonction des prémisses), ne doit pas être confondue avec la validité des inférences. Puisque la règle en vertu de laquelle on infère n'est ni vraie ni fausse, il peut donc y avoir des inférences inductives. Celles-ci pourront comporter des vérités empiriques parmi leurs prémisses, et conduire à ce qui est seulement « probable » par un raisonnement valide. Le syllogisme est une espèce particulière de dérivation dépendant des possibilités d'inclusion de la logique des « termes » : notre calcul des prédicats en est issu. Les règles d'inférence des stoïciens (tropes) s'appliquent au calcul des propositions. La plus primitive d'entre elles, le *modus ponens*, est une expression conditionnelle permettant de « détacher » la conclusion de l'admission supposée de prémisses. Cette inférence est un schéma de raisonnement : dans le cas du *modus ponens*, si les deux prémisses sont vraies alors la conclusion est toujours vraie. Le schéma de raisonnement est dit « valide » pour autant que la vérité de l'antécédent soit transmise au conséquent. Comme la nature intrinsèque et objective du langage, exprimant ce schéma, requiert l'usage de la structure inférentielle, nous obtenons une « expression » valide, ou tautologique (appelée aussi « loi logique »). Ainsi du *modus (ponendo) ponens* : si p alors q, et si p, alors q. La première prémisses : un conditionnel (si p alors q) ne permet pas encore d'inférer ; c'est un conditionnel matériel. Sitôt « posée » la seconde prémisses (et si p), on infère la conclusion (alors q) : il y a implication à proprement parler, quand pour la deuxième fois apparaît « alors ». Selon Quine, l'implication est « la forme de validité » du conditionnel, car l'inférence reste une « opération », et c'est d'une opération de dérivation que nous disons qu'elle est valide. De façon triviale, on voit que le fait même que nous nous servions différemment du mot « alors » prouve qu'un métalangage minimal – dans une acception non technique – est déjà

présent, dans le cadre duquel nous « décidons » qu'une expression est valide.

2) Quand nous utilisons le signe de l'implication (\supset) ou le signe du biconditionnel pour « si et seulement si » (\leftrightarrow), nous ne faisons encore qu'inscrire une procédure « opératoire » de validation, afin de rendre possibles les tests qui sont mis en œuvre au plan formel pour interroger telle ou telle formule (tables de vérité, matrices, ou autres). Mais il faut que le caractère normatif des règles d'inférence ait été circonscrit avec netteté, et qu'on se mette d'accord pour penser que des postulats de signification n'aient pas été importés dans la procédure. L'une et l'autre conditions sont loin d'être évidentes. C'est le cas, en particulier, quand on prend en compte le domaine d'assignation (ou d'interprétation) des phrases d'un langage physique : des termes observationnels – dénotant des événements ou des propriétés prédictibles de l'observation – sont régulièrement appauvris de leur référence concrète, lorsque nous devons fournir des équivalents propositionnels pour les identifier dans nos prémisses. Une distinction s'est alors imposée entre validité syntaxique et validité sémantique (notons qu'elles se superposent dans le calcul des propositions, puisque nos connecteurs sont interprétés).

a) Selon la première, sont vraies toutes les propositions ayant la même structure et pouvant être considérées comme des lois logiques ou « tautologies », parce qu'entre elles toutes les constantes non logiques d'un langage sont substituables *salva veritate*. Pour la seule syntaxe en effet, ne sont valides que des opérations sur des symboles : une fois qu'on a posé une suite « finie » de formules à titre d'hypothèses, on obtient déductivement (et mécaniquement) des théorèmes, par un usage correct des règles évoquées ci-dessus. Mais on peut aussi, et à ce niveau encore, en faire la démonstration récursive. Cette dernière demande qu'une conséquence valide soit dérivée de l'ensemble vide des hypothèses que l'on a exportées une à une à droite du conséquent. Le théorème est démontré s'il n'admet plus d'hypothèses à titre d'axiome.

b) Dans le cas de la validité sémantique, les règles d'inférence sont définies dans un métalangage L , inspiré de Tarski, pour échanger à l'idée d'une correspondance psychologique (et pseudo-intuitive) entre nos schémas de raisonnement et leur traduction matérielle. Les sémanticiens appellent « modèle » une structure constituée d'un domaine non vide (D) et d'une interprétation des termes mis en relation dans ce domaine. Le but est de circonscrire (ou de « clore ») le champ d'application d'une formule quelconque sur une distribution de valeurs de vérité. Mais l'attribution d'un sens à la formule revient à « interpréter » les symboles auxquels nous donnons un référent : que ce référent soit un particulier, un état de chose, une lettre de prédicat ou un ensemble. Ainsi cette formule est rendue vraie (ou satisfiable) si nous pouvons démontrer qu'elle est vraie pour toutes les assignations que nous lui donnons. Quand on peut assigner les mêmes valeurs aux éléments du modèle, nous pouvons la valider (ou la

déduire) de toute autre formule que circonscrit le même modèle. Il est aisé de traduire dans ce cadre le théorème de la déduction de Herbrand (1930), en remplaçant la notion syntaxique de démontrabilité par la notion de « validité » sémantique.

3) Mais la théorie des modèles (*set-theoretic logic*), qui doit beaucoup au raisonnement ensembliste, n'a que peu de prise, ou pas de prise du tout, dans les sciences de la nature. Une crise éclata dans le camp de l'empirisme logique autour des années 1930, qui sépara encore aujourd'hui les épistémologues et les défenseurs d'une rationalité restreinte à la stricte « tautologicité » de nos énoncés. Si on se préoccupe d'évaluer une théorie, ou de statuer de sa fécondité pour sa recherche, on est concerné par un autre genre de validité. Comme la validation proprement dite est une opération intellectuelle qui ne porte en principe que sur des hypothèses (non sur des formules), et qu'elle concerne des tests empiriques soigneusement contrôlés, toute « mise à l'épreuve » de la théorie déborde plus ou moins le cadre logique d'exposition des méthodes et des découvertes où elle devrait être contenue. L'actualité de la science montre aussi que des découvertes locales sont pendant longtemps inexploitable et inintelligibles. Deux réactions en découlent. D'une part, l'intégration progressive des connaissances de forme soustractive et « récurrente » – au sens que lui donnait Bachelard – désavoue la portée transhistorique de la valeur de nos théories. Le caractère « apodictique » de la démarche allant du connu à l'inconnu n'est donc plus suffisant. D'autre part, cette validation de l'information venue de l'expérience modifie le statut des énoncés observationnels. On sait depuis le XIX^e s. que les « idées nouvelles » que nous soumettons à l'expérience (comme disait Claude Bernard) ne sont recevables que si elles entraînent une intervention active de l'observateur. Ainsi la méthode hypothético-déductive, qui a eu ses heures de gloire depuis Stuart Mill, repose encore aujourd'hui sur une adaptation mutuelle des disciplines mathématiques et physiques. Que cette méthode soit faiblement consistante au sens logique importe peu au physicien. Pour lui, la procédure de vérification plus libre que la première – quoique techniquement plus sophistiquée selon les cas – relève de la démarche inductive, qui semble du reste largement naturelle.

4) Un « raisonnement » est valide, quand nous admettons qu'en principe il doit exister une affinité entre les lois de la pensée et les lois du langage (celles par exemple du langage mathématique). Cette nécessité disparaît devant l'exigence d'une compréhension des lois de la nature : elle n'est plus qu'une contrainte de la pratique qui nous impose de traduire par des équations les données de la physique. Rien ne nous interdirait sans doute de chercher dans l'adéquation de nos opérations à des « modèles mentaux » une justification sémantique : elle pourrait constituer éventuellement une échappatoire au conventionnalisme « radical », dont le représentant le plus controversé reste Wittgenstein. Ce conventionnalisme implique que les faits n'aient aucun sens en dehors des règles d'inférence qui nous

permettent de les « produire » (il n'y a pas, selon lui, de « connexions cachées » que nous pourrions découvrir). Or que se passe-t-il lorsque nous faisons une inférence sur la base de nos croyances – à supposer que ces croyances soient fondées, qu'elles aient, par exemple, une « justification épistémique » ? : nous procédons à une généralisation empirique dont nous disons qu'elle est provisoirement correcte, tant qu'elle n'a pas été invalidée par l'expérience. La cohérence est alors maintenue dans un corps de doctrines quelconque par des tests de validité, sans que nous ayons à nous préoccuper d'hypothèses auxiliaires ou implicites. Une théorie de la preuve ou de la démonstration s'oppose ici à une théorie heuristique (défendue par Imre Lakatos) qui cherche à savoir comment des vérités nouvelles peuvent être établies, indépendamment de la consistance systématique de la science instituée, par un programme de recherches relativement ouvert. La conciliation de ces deux versants du travail effectif de la science reste toutefois largement problématique. La dualité des démarches : déductive et formelle, inductive et généralisante, n'est que rarement surmontée. Seul C. Hempel a proposé une conciliation par le truchement de la notion d'« explication » : la déduction nomologique et l'induction statistique pourraient d'après lui se rencontrer sur la base de « croyances rationnelles » plutôt que sur la base d'énoncés justificatifs.

5) Pourtant, sur ce terrain, le débat épistémologique a bel et bien rebondi au XX^e s. dans trois directions principales. La première a critiqué la valeur de l'induction dans la science expérimentale. La seconde a soutenu que des progrès scientifiques sont attestés en fonction de « ruptures » invalidant (au sens non logique) les théories antérieures. Pour la troisième, il n'est même pas sûr que la réfutabilité des théories soit essentielle à leur constitution, car les faits dont elles rendent compte sont toujours interprétés.

a) Si l'idée de validation empirique semble une contradiction *in adjecto*, elle s'applique tout particulièrement au cas de l'induction. L'inférence inductive continue de fournir la matière des instructions « régulières » et des prédictions justifiées que nous appelons des « lois ». Ce qui sous-tend en pratique cette procédure est encore le déterminisme dans sa variante réaliste, plus ou moins modérée. Pour le dire sommairement, nous admettons que nos prédictions sont valides si tous les cas futurs sont supposés se conformer aux cas anciens préalablement observés. Il y a en l'espèce une « énigme » de l'induction, ainsi que l'a nommée N. Goodman. Car l'expérience (ou le test) qui s'appuie sur l'induction comme sur un fondement, en réalité, ne se fonde pas sur lui, et n'a pas de base logique effective. Les énoncés d'observation singuliers ne sont pas universalisables. La réponse classique à ce problème a été primitivement donnée par Karl Popper dans sa *Logique de la découverte scientifique* (1934). Pour expliquer que des énoncés universels soient fondés sur l'expérimentation, et non seulement sur une croyance, il nous faudrait admettre un principe synthétique (et non analytique) que Popper, après Hume, estime superflu. Toute sen-

œuvre combat en réalité l'idée que l'inférence statistique puisse fournir un équivalent de ce principe. C'est au contraire une procédure de déduction des tests – rationnellement et méthodiquement conduits – qui nous autoriserait à sortir de l'abstinence sémantique de Wittgenstein, comme de la réduction des énoncés scientifiques à des tautologies dans le programme fondationnaliste de Russell et de Carnap. Stipulant qu'il y a une « asymétrie » dans le langage entre la vérifiabilité et la falsifiabilité, Popper se propose d'exposer un système d'énoncés à sa réfutation, et de le faire par l'expérience sur une base empirique, afin de découvrir selon ses termes « la validité des lois naturelles ». Il dégagera à partir de là une « probabilité logique » pour telle ou telle théorie qui est complémentaire, selon lui, de son degré de falsifiabilité. Ainsi, selon Popper, un « énoncé d'ignorance, fût-il même interprété comme un énoncé de fréquence, peut être soumis à des tests empiriques et corroboré ».

b) Cette démarche qui consiste à « expliquer le connu par l'inconnu » sera contestée par T. Kuhn en faveur d'un critère « discontinuiste », non moins radical du reste que le critère de « démarcation » que Popper avait retenu pour cerner la question de la validité. Le *Gestalt switch* de Kuhn, présenté dans *La structure des révolutions scientifiques* (1962), repose sur une « incommensurabilité » réciproque des théories scientifiques, dont les paradigmes sont remplacés à partir de moments de crise. Ce que Kuhn conteste est que nous devions fonder l'évaluation des théories sur un contexte de justification ou de « corroboration » internes au domaine de la science instituée (dite « normale »). Il renvoie dos à dos l'héritage de l'empirisme logique : la testabilité des énoncés théoriques que réclame Carnap ; et la hiérarchie des degrés de testabilité de la théorie dans son pouvoir explicatif, qu'avait introduite Popper. L'incommensurabilité porte à la fois sur la sémantique des termes (par ex., la « masse ») et sur la fonction nomologique ou normative des règles de validation. Pour Kuhn, non seulement la science se développe sans intégrer un horizon stable de la référence, mais elle met en lumière des infractions à la rationalité des normes légales que les phénomènes sont supposés exemplifier. Ainsi, la communauté parviendrait finalement à se mettre d'accord sur un nouvel ensemble d'« exemples » qui constitueront un paradigme nouveau. Le *Gestalt switch* signifie dans ce cas que nous ne voyons plus la réalité de la même façon quand nous repérons des anomalies. La validité des paradigmes (telle la solution apportée par Fresnel au problème de la diffraction) ne s'inscrit plus que dans la perspective d'une naturalisation de la science, qui ouvre naturellement de nombreuses questions.

c) Revenant sur la critique de l'inductionnisme qu'avait menée Popper – se battant avec autant de pugnacité que lui contre le positivisme logique – P. Feyerabend a proposé une variante plus radicale encore, qui a le mérite de faire apparaître sous son vrai jour le relativisme des conceptions de Kuhn. Le débat sur l'idée de validation se déplace, en effet, à partir des

années 1970 dans le camp de la méthodologie. Alors que Lakatos et d'autres partisans d'une « heuristique positive » ne voyaient pas de raisons historiques de conserver la réfutabilité objective au sens de Popper, en insistant plutôt sur la richesse des confirmations expérimentales, Feyerabend a adopté quant à lui un parti pris descriptif et anarchiste d'invalidation des méthodes au profit des « faits » : il en donne une acception antibachelardienne, justifiant leur interprétation naturelle. La provocation salutaire, mais un peu courte, du *Contre la méthode* de Feyerabend face au dogmatisme de l'« expérience » devenue techniquement aveugle, a relancé le débat sur le réalisme et l'instrumentalisme, ou sur la vieille opposition des termes observationnels et des termes théoriques. Dans les deux dernières décennies, des auteurs comme L. Laudan, B. Van Fraassen et R. Giere sont ainsi revenus à discuter à nouveau de la possibilité de faire « converger » contre toute attente le réalisme sémantique et le conventionnalisme, le « réalisme de laboratoire » et le « réalisme constructif ». Mais le point commun de ces recherches est néanmoins de remplacer – sans prétendre l'invulnérabiliser en tant que telle – la conception toute mathématique du « modèle » des sciences formelles, qui avait conduit depuis 1945 (à cause notamment de l'impossibilité d'une présentation consistante de la théorie quantique) à des interprétations déflationnistes de la validité du programme des sciences expérimentales.

► BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1938. – BERNARD C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), Paris, Flammarion, 1984. – FEYERABEND P., *Against Method*, Londres, New Left Books, 1975 (trad. fr., *Contre la méthode*, Paris, Le Seuil, 1979). – GIÈRE R.G., *Explaining Science. A Cognitive Approach*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1988. – GOCHET P. & GRIBOMONT P., *Logique, méthodes pour l'informatique fondamentale*, Paris, Hermès, 1990. – HEMPEL C., *Aspects of scientific explanation*, New York, Free Press, 1965 (trad. fr., *Éléments d'épistémologie*, Paris, A. Colin, 1972). – KUHN T., *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1962 (trad. fr. sur la 2^e éd., 1970, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1983). – LAUDAN L., *Progress and its Problems*, Berkeley, Univ. of California Press, 1977. – POPPER K., *Logik der Forschung*, Vienne, Springer Verlag, 1934 (trad. fr. sur l'éd. de 1959, *La logique de la découverte scientifique*, Paris, Payot, 1973) ; *Objective Knowledge*, Oxford Univ. Press, 1972 (trad. fr., *La connaissance objective*, Paris, Aubier, 1991). – VAN FRAASSEN B.C., *The Scientific Image*, Oxford Univ. Press, 1980.

Jean-Maurice MONNOYER

→ Cercle de Vienne ; Découverte ; Dédution ; Expérience ; Induction ; Méthode ; Preuve ; Test ; Vérification.

VAN FRAASSEN Bas, né en 1941

Épistémologue canadien d'origine hollandaise, professeur à l'université de Princeton. Il propose une conception sémantique des théories scientifiques, qu'il appelle « empirisme constructif » et oppose au positivisme

logique. Les théories sont comprises comme construction d'ensembles de modèles, en fonction de critères de plausibilité, hérités de la tradition pascalienne ; Van Fraassen a d'ailleurs travaillé sur les fondements de la théorie des probabilités. La notion de loi, avec ses corrélat philosophiques d'universalité et de nécessité, n'y a plus de fonction centrale – elle n'a de valeur que dans les limites des modèles –, et est remplacée par l'examen des symétries, en relation au concept mathématique d'invariance. Cette idée avait déjà été partiellement développée dans une étude sur les concepts d'espace et de temps. Une expérience est un travail théorique continué par d'autres moyens. Van Fraassen se dit anti-réaliste et nominaliste, et distingue l'adéquation empiriste d'une théorie – seule requise en sciences – de sa vérité. La fonction de la science n'est pas d'expliquer, comme le croient les partisans des lois, mais de décrire. L'épistémologie s'occupe de la constitution d'une théorie générale de l'opinion : à la logique de la découverte scientifique est substituée une théorie du changement d'opinion probabiliste, qu'il oppose à toute « inférence à la meilleure explication » peircienne. Van Fraassen a exemplifié son « image de la science » dans une interprétation empiriste de la mécanique quantique.

► *Introduction to the Philosophy of Time and Space*, New York, Random House, 1969-1970. – *The scientific Image*, Oxford, Clarendon Press, 1980. – *Formal semantics and Logic*, Londres, Macmillan, 1971. – *Quantum mechanics : An Empiricist View*, Oxford Univ. Press, 1991. – *Lois et symétrie*, trad. C. Chevalley, Paris, Vrin, 1994 (trad. précédée d'une étude et d'une bibliogr. des écrits sur Van Fraassen). – VAN FRAASSEN B. & LAMBERT K., *Derivation and Counterexample*, Encino (Cal.), Dickenson, 1972. – *The empirical Stance*, Yale Univ. Press, 2002. – VAN FRAASSEN B. & BEALL J. C., *Possibilities and Paradox : An Introduction to Modal and Many-Valued Logic*, Oxford Univ. Press, 2003.

► CHURCHLAND P. & HOOKER C.A. éd., *Images of science : Essays on Realism and Empiricism, with a Reply by Bas Van Fraassen*, Chicago, Univ. Press, 1985. – LAGNEUX M., *Explanation in social sciences : Hempel, Dray, Salmon and van Fraassen revisited*, Montréal, Groupe de recherche en épistémologie comparée, Université du Québec à Montréal, 2003. – REYES I. P., NAVARRO J. S., *Hacia un nuevo empirismo : la propuesta filosófica de Bas C. van Fraassen*, Madrid, Biblioteca Nueva, 2003.

Anne-Françoise SCHMID

→ Découverte ; Fait ; Symétrie.

VAN LEEUWENHOEK Antonie, 1632-1723

Naturaliste hollandais. Amateur devenu biologiste renommé, Leeuwenhoek vécut à Delft, où il occupa un emploi municipal modeste jusqu'à sa mort. Il adressait ses comptes rendus d'expériences manuscrites, exclusivement rédigés en hollandais, à la Royal Society, qui en effectuait les traductions anglaise ou latine, elles-mêmes publiées dans les *Philosophical transactions* entre 1676 et 1714. Au cours de l'année 1677 il observa

au microscope que le sperme renferme des milliers de petits animaux (*animalcula*) nageant vigoureusement et conclut que « c'est exclusivement la semence mâle qui forme l'embryon, et [que] la seule contribution que la femme puisse apporter est de recevoir la semence et de la nourrir ». Si Leeuwenhoek admet ici le caractère « préformé » de l'embryon dans les animalcules spermatozoïques, il n'admettra en revanche jamais l'hypothèse du caractère préexistant – depuis la création du monde – de ces derniers. D'où l'opposition de la théorie animalculiste de la reproduction à celle de la préexistence des germes (*Lettre* du 25 avril 1680) et à l'ovisme (*Lettre* du 22 janvier 1683). Fidèle à la tradition philosophique identifiant la vie et le mouvement, Leeuwenhoek contredit Harvey, qui dans son *De generatione* (1651) tenait l'œuf – immobile – pour la source de toute vie nouvelle. Leeuwenhoek affirma également n'avoir observé aucun animal issu d'un œuf, entièrement formé dès l'origine. Enfin, sa découverte du caractère vivipare des anguillules du vinaigre le conforta dans sa non-acceptation de la théorie de la génération spontanée.

► *Opera Omnia, Seu Arcana Naturae* (1722). – *Arcana Naturae Detecta* (1722). – *Continuatio Epistolarum* (1715). – *Continuatio Arcanorum Naturae Detectorum* (1722). – *Epistolae ad Societatem Regiam Anglicam* (1719). – *Epistolae Physiologicae Super compluribus Naturae Arcanis* (1719). – *Collected Letters of Antoni van Leeuwenhoek*, Amsterdam, Commission de l'Académie royale des sciences d'Amsterdam, 8 vol., 1939-1967 (118 lettres écrites entre 1673 et 1692).

► DOBELL C., *Antony van Leeuwenhoek and His « Little Animals »*, Londres/Amsterdam, 1932 (2^e éd., New York, 1958). – HENIGER J., « Leeuwenhoek », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1973, t. VIII, p. 128-130. – ROGER J., *Les sciences de la vie dans la pensée française du XVIII^e siècle*, Paris, A. Colin, 1963. – SCHIERBEEK A., *Measuring the Invisible World. The Life and Works of Antoni van Leeuwenhoek*, Londres/New York.

Éric HAMRAOUI

→ Génération spontanée ; Harvey ; Micro-organisme ; Neurone.

VÉRIFICATION

Comme définition liminaire de la vérification, on peut dire, en s'en tenant au domaine des sciences, qu'elle est un procédé de confrontation d'un énoncé avec des faits ; procédé qui peut être considéré comme un critère du sens de cet énoncé.

Le Cercle de Vienne (1929) s'est rendu célèbre, entre autres, par la formulation d'un critère vérificationniste de la signification, donné par Moritz Schlick : « La signification d'une proposition est sa méthode de vérification » (« Meaning and verification », sect. 1, p. 341). Il faut ajouter à ce critère une garantie de la réalité susceptible d'être connue : l'expérience. On lit dans le *Manifeste du Cercle de Vienne* ceci : « Est réel ce qui s'inscrit dans l'édifice total de l'expérience » (A. Soulez dir., 1985, p. 118). Le critère et la garantie ensemble

valent au Cercle de Vienne l'étiquette d'empirisme logique ou de positivisme logique.

C'est le *Tractatus logico-philosophicus* de Wittgenstein qui a servi à construire la thèse de l'empirisme logique selon laquelle la signification d'une proposition est sa méthode de vérification ; mais Wittgenstein met en place dans cet ouvrage une vériconditionnalité (4.024 : « Comprendre une proposition c'est savoir ce qui arrive quand elle est vraie ») des énoncés bien plus que leur vérifiabilité. Les propositions élémentaires du *Tractatus* ne sont pas à ce titre les propositions d'observation dont parlent les logiciens positivistes du Cercle de Vienne. C'est Waissmann et Schlick qui ont opéré la dérivation de la vériconditionnalité à la vérifiabilité.

Vérification et critère du sens

L'idée essentielle de l'*Aufbau* de Carnap (1928) est celle-ci : tout énoncé pourvu de sens peut être traduit en un énoncé portant sur les faits. Sinon nous avons affaire à un simili-énoncé (les énoncés de la métaphysique) ou à une tautologie (proposition toujours vraie) ou à une antilogie (proposition toujours fausse). Les propositions métaphysiques ne sont pas douées de sens, mais elles simulent en raison de leur correction grammaticale les énoncés factuels, et les propositions analytiques ne disent rien sur les faits (voir *Tractatus*, 6.11 : « Les propositions de la logique par conséquent ne disent rien [elles sont les propositions analytiques] »). Les unes sont invérifiables parce qu'elles dépassent l'expérience (voir *Tractatus*, 6.53 : « À chaque fois qu'un autre voudrait dire quelque chose de métaphysique, lui démontrer qu'il n'a pas donné de signification à certains signes dans ses propositions »), les autres sont invérifiables parce qu'elles sont vraies en vertu du seul langage, c'est-à-dire en vertu de leurs significations seulement : « On peut ranger les énoncés (doués de sens) de la manière suivante : en premier lieu ceux qui sont vrais en vertu de leur seule forme (ou "tautologies" d'après Wittgenstein. Ils correspondent à peu près aux jugements analytiques kantien). Ils ne disent rien sur le réel. À cette espèce appartiennent les formules de la logique et de la mathématique ; elles ne sont pas elles-mêmes des énoncés sur le réel, mais servent à leurs transformations. En second, viennent les négations des premiers (ou "contradictions") qui sont contradictoires, c'est-à-dire fausses en vertu de leur forme. Pour décider de la vérité ou fausseté de tous les autres énoncés, il faut s'en remettre aux énoncés protocolaires, lesquels (vrais ou faux) sont par là même des énoncés d'expérience, et relèvent de la science empirique. Si l'on veut construire un énoncé qui n'appartient pas à l'une de ces espèces, cet énoncé sera automatiquement dénué de sens » (Carnap, *Le dépassement de la métaphysique par l'analyse logique du langage*, in Soulez, *Manifeste du Cercle de Vienne*, trad. fr., PUF, 1985, p. 173).

Les énoncés doués de sens ou de « signification cognitive » sont donc les énoncés analytiques, les énoncés contradictoires et ceux qui satisfont l'exigence de vérifiabilité.

Un vérificationnisme réducteur

Quine, pour qui l'unité de signification empirique n'est pas l'énoncé mais la totalité de la science, fait la critique de ce réductionnisme radical à partir 1) d'un holisme sémantique : une expérience ne décide jamais du sens d'un énoncé car elle n'est pas isolable ; et 2) d'un continuisme méthodologique qui refuse les frontières entre propositions analytiques et propositions synthétiques. La critique de l'analyticité repose chez Quine sur celle de la synonymie : une vérité analytique se caractérise en général par le fait qu'on peut remplacer les synonymes par les synonymes sans préjudice pour la vérité. Or, la notion de synonymie n'est pas si évidente, elle est surtout dépendante de la langue qu'on envisage ; or, les formules du lexicographe ne doivent pas être prises « pour paroles d'évangile » (Quine, *Les deux dogmes de l'empirisme*, p. 91) : la substituable *salva veritate* que la synonymie permet « n'a de sens que relative à une langue dont l'étendue est spécifiée » (*ibid.*, p. 96).

Quant au problème du réductionnisme, la difficulté provient de la croyance selon laquelle on peut soumettre les énoncés un par un à la vérification : c'est là une conception atomiste, non organique du vérificationnisme : « Le dogme du réductionnisme survit dans la supposition que chaque énoncé, isolé de ses compagnons, peut être confirmé ou infirmé. Quant à moi en m'inspirant essentiellement de la doctrine camapienne du monde physique dans l'*Aufbau*, je propose l'idée que nos énoncés sur le monde extérieur sont jugés par le tribunal de l'expérience sensible, non pas individuellement, mais seulement collectivement » (p. 107). Si Quine cite Carnap avec sympathie ici, c'est parce que celui-ci avait renoncé à réduire les énoncés du monde physique aux « énoncés concernant l'expérience immédiate ».

En effet, Carnap avait substitué au critère de vérifiabilité un critère plus souple de degrés de confirmation (article « Testability and meaning », *Philosophy of science*, vol. 3, n° 4, oct. 1936, p. 421-471, et vol. 4, n° 1, janv. 1937, p. 2-40). Il y a en effet un problème de taille avec le vérificationnisme au sens strict ; celui-ci nous dit que la signification d'un énoncé empirique dépend de tests expérimentaux qui le vérifient ou bien se déduisent de la classe finie d'énoncés observationnels. Les énoncés pour lesquels nous ne disposons pas de ces deux critères n'ont donc pas de signification. Or, celle-ci recoupe un contenu de connaissance que les énoncés ont toujours en l'absence même de leur référence ; ce que Frege avait appelé « le sens ». D'où l'idée de confirmation graduelle avancée par Carnap, et celle-ci ressortit selon Reichenbach du calcul des probabilités. On peut cependant dire que l'effort de formaliser le critère de vérifiabilité de façon satisfaisante n'a pas abouti. Ce critère ambitieux donne lieu à des difficultés quasi insurmontables résumées par A.J. Ayer ainsi : « Le principe tel que Schlick et Waissmann l'énoncèrent réunissait deux fonctions séparées : celle de décider quand une proposition particulière avait un

sens, et celle de décider quel sens elle avait » (*Le Cercle de Vienne*, in J. Sebestik & A. Soulez, 1986).

L'autre critique adressée à Carnap vient du physicalisme de O. Neurath et a trait à l'acceptation d'« énoncés protocolaires », ceux qui sont mis à la base de la science et qui sont considérés comme élémentaires. Neurath préfigure la critique de Quine car, en refusant de considérer qu'il y ait des énoncés de base, réfractaires à toute révision, il indique combien les énoncés sont relatifs les uns aux autres et combien par conséquent la science a besoin d'un langage unitaire : « Quand on formule un énoncé, on le confronte avec tous les énoncés dont on dispose. S'il s'accorde avec eux, il est ajouté à ces énoncés ; s'il ne s'accorde pas on le marque comme "non vrai" et on le laisse tomber ou, au contraire, on transforme l'ensemble des énoncés de la science de telle façon que le nouvel énoncé puisse s'y intégrer ; mais il est rare que l'on opte pour ce dernier procédé » (O. Neurath, « Physicalismus », *Scientia*, L, 1931, p. 299). Carnap, sans renoncer à la notion d'énoncés protocolaires, admet une partie des critiques qui lui sont adressées et accepte de relativiser le point de départ de ses constructions scientifiques en renonçant à articuler énoncés protocolaires et expérience immédiate mais en continuant à stipuler des énoncés protocolaires à l'intérieur de systèmes théoriques : « Chaque énoncé de la Systemsprache physicaliste peut à l'occasion servir d'énoncé protocolaire » (R. Carnap, « Über Protokollsätze », *Erkenntnis*, III, 1932-1933, p. 224).

La critique de Quine vise donc bien plus la forme dogmatique du vérificationnisme, forme qui concilie les deux dogmes de l'analyticité et du réductionnisme : « l'un sert de support à l'autre de la manière suivante : tant que l'on admet l'idée générale de la confirmation ou de l'infirmité d'un énoncé individuel il paraît naturel d'envisager le cas limite d'un énoncé confirmé *ipso facto*, en toutes circonstances, et de décréter cet énoncé analytique » (Quine, *op. cit.*).

La vérification : une possibilité logique

Bertrand Russell avait adressé une critique à ce type de réductionnisme sous une forme apparentée : elle est fondée sur la mise à jour d'une profession de foi métaphysique à l'œuvre dans le Cercle de Vienne : le critère de signification proposé est autoréfutatif, ce critère dit que ce qui n'est pas analytique ou empiriquement vérifiable est dépourvu de sens, mais ce critère lui-même n'est ni analytique ni empiriquement vérifiable. Soit l'exemple suivant : « La pluie tombe parfois dans des endroits où il n'y a personne pour la voir », le sens commun peut difficilement admettre qu'il n'y ait pas de fait correspondant à cette proposition bien qu'il n'y ait personne pour l'observer. On pourrait répondre que la proposition reste « vérifiable ». Mais cette notion de « vérifiable » a de sérieuses limites : « Nous ne pouvons connaître qu'une proposition est vérifiable car elle implique la connaissance d'un futur indéfiniment long. En fait, qu'une proposition soit vérifiable est en soi invérifiable » (*Logical papers*, p. 376). Hempel, qui est

ici visé, s'est défendu de cette interprétation erronée de « l'exigence de vérifiabilité ». Ce terme signifie « la possibilité logique » de données d'observation et non « la possibilité technique d'exécuter des tests » : « Comme l'ont souligné fréquemment les empiristes, le terme de "vérifiabilité" indique le fait de pouvoir concevoir, ou mieux la possibilité logique de données de genre observationnel qui, si elles étaient effectivement disponibles, constitueraient une preuve de l'énoncé en question. Le terme ne signifie pas la possibilité technique d'exécuter les tests requis pour obtenir les données et encore moins la possibilité de trouver effectivement les phénomènes directement observables qui constitueraient une preuve de cet énoncé » (in « Les critères empiristes de la signification cognitive : problèmes et changements », trad. fr. P. Jacob, *De Vienne à Cambridge, l'héritage du positivisme logique de 1950 à nos jours*, 1980).

De même Schlick fait remarquer que par « vérification » il faut entendre « possibilité de vérification » et non vérification réelle ; la vérifiabilité doit être considérée comme « une possibilité d'ordre logique » (1936, sect. III, p. 351). Schlick met en avant cette notion, présente chez Wittgenstein dans le *Tractatus*. Sa polémique avec Carnap porte sur la priorité ou non d'un des deux sens de la vérifiabilité : 1) la vérifiabilité est la confrontation empirique d'un énoncé avec les faits ; 2) la vérifiabilité est la possibilité logique pour un énoncé d'être soumis à l'épreuve de confrontation aux faits. De ces deux possibilités, Schlick et Waissmann donnent la priorité à la possibilité logique. « Une signification du "possible" qui a une importance particulière est celle que l'on obtient quand les règles en jeu sont celles de la grammaire logique », note Waissmann dans *Principles of linguistic philosophy* (p. 340). Il faut se défaire d'une conception cumulative de l'expérience et lui substituer une conception où les procédures logiques fondées sur les règles de l'usage d'un énoncé prennent le pas sur les observations elles-mêmes ; vérifier un énoncé, autrement dit lui attribuer un sens, c'est en réalité le déduire d'énoncés portant sur l'observation. Comme on le voit le critère est moins donné par l'expérience elle-même que par la grammaire logique qui fixe les conditions du sens. La vérification expérimentale semble en définitive dériver de conventions grammaticales.

L. Wittgenstein prend les objections de Russell au sérieux et cherche à éviter que la possibilité logique n'aboutisse à un oubli de l'expérience. Lors d'un entretien chez Schlick le 18 décembre 1929, il souligne que l'incapacité où nous sommes de vérifier complètement un énoncé peut nous faire dire en définitive qu'il n'a pas de sens : par rapport à un énoncé du type « Là-haut sur le placard se trouve un livre », « si je ne sais jamais si l'énoncé est vérifié, alors je peux aussi bien n'avoir rien voulu dire non plus en l'énonçant ; en ce cas, il ne signifie rien » (*Dictées*, p. 143). Pour sortir d'une telle situation, Wittgenstein va adopter une conception qui met au premier plan une hypothèse sur le fait vérifiable, hypothèse qui à l'instar des hypothèses en physique n'a pas, comme le note A. Soulez, « besoin d'être

complètement parcourue pour que l'énoncé conserve son sens » (1997, vol. II, p. 237).

Vérification, application, construction

Dans le domaine des mathématiques et non plus dans celui des sciences d'observation, la vérification entretient des rapports de voisinage et de similitude avec la démonstration ; elle a comme caractéristique propre d'être toujours particulière, et les conclusions auxquelles elle conduit sont tout aussi particulières que ses prémisses ; ce qui n'est pas le cas d'une démonstration où la conclusion, féconde, apporte un plus par rapport aux prémisses. On peut manquer de percevoir cette différence entre la particularité de la vérification et la généralité de la démonstration. Ainsi, comme l'a bien montré H. Poincaré (*La science et l'hypothèse*, chap. I^{er}, p. 33), la « démonstration » leibnizienne de $2 + 2 = 4$, donnée dans les *Nouveaux Essais sur l'entendement humain*, est en fait une vérification, où l'on constate par une série d'égalités et en vertu de définitions posées que $2 + 2 = (2 + 1) + 1$ et $(2 + 1) + 1 = 3 + 1$ et $3 + 1 = 4$. Poincaré conclut alors que dans ce cas « on s'est borné à rapprocher l'une de l'autre deux définitions, purement conventionnelles et on a constaté leur identité, on n'a rien appris de nouveau. La vérification diffère précisément de la véritable démonstration, parce qu'elle est purement analytique » ; faut-il pour autant dire qu'elle est « stérile » ? Reconnaissons plutôt sa fonction d'« auxiliaire de la démonstration » (G.-G. Granger, 1992, p. 96). En tant que procédé de calcul, elle ne peut certes pas remplir pleinement la fonction dévolue au raisonnement ; pourtant, dans des cas où les formes opératoires tiennent lieu de contenu, comme c'est le cas dans le calcul propositionnel, « la vérification vaut démonstration » (*op. cit.*). L'interdéfinissabilité des connecteurs logiques (conjonction, disjonction, implication, négation) permet par un calcul d'équivalences de vérifier et de démontrer tout à la fois et par le même procédé que « $p \rightarrow (q \rightarrow p)$ » est une tautologie.

En rappelant que la vérification ne concerne que le particulier, Poincaré (*op. cit.*) souligne la dépendance étroite entre ce procédé et la nature des objets considérés. L'intuitionnisme mathématique de Brouwer et Weyl relayant celui de Poincaré repose tout entier sur des procédures opérant sur des objets concrets dans une perspective finitiste : « la mathématique, science de l'infini, a pour but la compréhension symbolique de l'infini par des moyens humains, c'est-à-dire finis » (H. Weyl, 1932, p. 7). La vérification prend alors le sens d'un calcul effectif où les énoncés n'ont plus la validité absolue de la logique, mais ce sont des énoncés pour lesquels nous devons « avoir des raisons de les affirmer » (G.-G. Granger, *op. cit.*, p. 162) ; inscrire un objet mathématique dans une procédure démonstrative, c'est pouvoir l'exhiber, c'est le construire de façon opératoire, ne pas supposer donc qu'il nous est donné dans un ciel platonicien. Par l'accent mis sur les opérations, l'intuitionnisme « correspond bien à une exigence accrue de vérification » (*ibid.*, p. 169).

► CARNAP R., « Testability and meaning », in *Philosophy of science*, vol. 3, n° 4, oct. 1936. — DUMMETT M., *Truth and other enigmas*, Londres, Duckworth, 1978. — GRANGER G.-G., *La vérification*, Paris, Odile Jacob, 1992. — JACOB P., *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique de 1950 à nos jours*, Paris, Gallimard, 1980. — POINCARÉ H., *La science et l'hypothèse*, Paris, Flammarion, 1968. — QUINE W.V.O., *The Ways of paradox, and other essays*, Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1976. — RUSSELL B., *Essais philosophiques*, trad. fr., Paris, PUF, 1997. — SCHLICK M., « Meaning and verification », *Philosophical Review*, vol. XLV, 1936. — SEBESTIK J. & SOULEZ A., *Le Cercle de Vienne, doctrines et controverses*, Paris, Klincksieck, 1986. — SOULEZ A. dir., *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, Paris, PUF, 1985 ; *Dictées de Wittgenstein à Waissmann et pour Schlick*, Paris, PUF, vol. I et II, 1997. — WEYL H., *The open world, three lectures on the metaphysical implications of science*, Yale, Univ. Press, 1932. — WITTGENSTEIN L., *Tractatus logico-philosophicus*, trad. fr., Paris, Gallimard, 1993.

Ali BENMAKHOULOU

→ Cercle de Vienne ; Démonstration ; Physicalisme ; Rationalisme ; Rationalité ; Réductionnisme ; Réfutabilité ; Test ; Wittgenstein et le positivisme logique.

VÉRITÉ

LOGIQUE

L'existence de la vérité

Aristote parlait de la règle des contradictoires pour dire qu'il y a au moins une vérité : « Si la vérité n'est pas autre chose que d'affirmer le vrai et de nier le faux, il est dès lors impossible que tout soit faux, puisqu'il y a nécessité absolue pour que l'une des deux parties de la contradiction soit vraie » (Aristote, *Métaphysique*, G, 1012b10). Formulée autrement, cette règle qui dit qu'il y a au moins une vérité peut s'énoncer ainsi : la proposition « toutes les propositions sont fausses » se contredit elle-même, donc, si on veut éviter la contradiction, on est obligé d'affirmer qu'il y a aussi des propositions vraies.

Cette règle est ainsi sous-tendue par le principe de contradiction énoncé par Aristote sous la forme suivante : « Il est impossible pour une même chose d'appartenir et de ne pas appartenir à la même chose au même moment et sous tout rapport » (G, 3, 1005b19-23). Ce principe de contradiction fournit avec le principe d'identité (A = A) la base axiomatique la plus classique pour une caractérisation de la vérité. Leibniz a voulu ajouter à cette caractérisation la réciproque du principe d'identité, selon laquelle la vérité est inhérence, à savoir que le prédicat est dans le sujet ; ainsi, si toute proposition identique est vraie, toute proposition vraie est identique. Dans la *Lettre à Arnaud* du 14 juillet 1686, Leibniz écrit ceci : « Toujours dans toute proposition affirmative véritable, nécessaire ou contingente, universelle ou singulière, la notion du prédicat est comprise dans celle du sujet, *praedicatum inest subjecto*, ou bien, je ne sais ce que c'est que la vérité. »

Vérité et pensée

Avec Aristote et Leibniz, il apparaît clairement que le support des vérités est la proposition. B. Bolzano, au XIX^e s., a radicalisé ce point de vue en indiquant que la vérité était une propriété des propositions en elles-mêmes. Il distingue entre les vérités pensées et les vérités en elles-mêmes, les premières comportent des degrés, non les secondes (§ 24 de I, de la *Wissenschaftslehre*). L'opposition de la vérité à la fausseté et non à l'erreur est une indication que l'on vise les vérités en elles-mêmes, non les vérités pensées. « J'entends par vérité en elle-même toute proposition qui pose quelque chose comme ce qu'il est, je laisse indéterminé si oui ou non cette proposition est en fait pensée ou dite par quelqu'un » (§ 25). Cette disjonction entre la vérité et la pensée est une réminiscence leibnizienne : « Si les vérités sont des pensées, on sera privé non seulement des vérités auxquelles on n'a jamais pensé, mais encore de celles auxquelles on a pensé et auxquelles on ne pense plus actuellement » (chap. 1, livre 1, *Nouveaux essais*, p. 71). Cet argument de Leibniz vise à montrer que la vérité est une disposition innée ; G. Frege utilisera le même argument pour indiquer que la distinction entre l'être d'une pensée et son être vrai fonde la possibilité de la réfutation et du raisonnement indirect (*Recherches logiques*, 2, p. 195).

Vérité et être

Les vérités objectives n'ont pas d'existence effective : la proposition « une vérité n'est pas quelque chose qui existe » ne pose pas que quelque chose existe et est pourtant une vérité. Ainsi on ne peut comprendre le *Verum et ens convertuntur* de Thomas d'Aquin qu'en précisant qu'une vérité est une proposition qui établit qu'une chose est telle qu'elle est et non qu'une telle chose existe. Les vérités en elles-mêmes ne dépendent ni du temps ni du lieu par distinction d'avec les vérités reconnues ou pensées ; la vérité en elle-même n'est dépendante ni du sujet pensant ni de l'objet pensé : la constance d'une relation exprimée dans une proposition n'est pas propriété de la vérité de cette proposition ; « la ligne droite est la plus courte ligne entre deux points » ne nous parle pas d'une vérité éternelle mais d'une relation durable ou éternelle, de même la proposition « il pleut » ne nous parle pas d'une vérité passagère mais d'une relation passagère.

Conditions de vérité et critère de vérité

Le critère traditionnel donné par les philosophes pré-kantiens est celui de l'adéquation de la chose et de l'esprit, *veritas adaequatio rei et intellectus*. C'est une thèse d'allure aristotélicienne car elle stipule que la représentation mentale et l'objet extérieur ont une relation de similitude fondée sur le fait que la représentation partage une forme avec l'objet extérieur. Nier cette relation de similitude comme le fait Kant, dans la mesure où les objets pour nous n'ont pas de similitude avec les

choses en soi, revient à réfuter la théorie de la vérité-correspondance.

Kant montre que derrière ce critère (la vérité est adéquation de la chose et de l'esprit), c'est bien une connaissance qui est engagée car pour que je puisse dire s'il y a accord ou non, il faut que je puisse comparer l'objet avec ma connaissance donc il faut « que je le connaisse ». Dans ce cas, « ma connaissance doit se confirmer elle-même ; mais c'est bien loin de suffire à la vérité. Car puisque l'objet est hors de moi et que la connaissance est en moi, tout ce que je puis apprécier c'est si ma connaissance de l'objet s'accorde avec ma connaissance de l'objet. Les anciens appelaient diallèle un tel cercle dans la définition » (*Logique*, VII, p. 54). L'impuissance à produire une justification de la connaissance est en même temps une impuissance à définir la vérité. Kant donne ici raison aux sceptiques contre les logiciens ; les sceptiques ont toujours mis en avant l'impossibilité à définir la vérité à travers l'impossibilité à donner une théorie cohérente du jugement. « Ils remarquaient qu'il en est de cette définition de la vérité comme d'un homme qui ferait une déposition au tribunal et invoquerait comme témoin quelqu'un que personne ne connaît, mais qui voudrait être cru en affirmant que celui qui l'invoque comme témoin est un honnête homme » (*ibid.*, p. 55).

Il y a, en dehors de ce cercle ou de cette impossibilité, une réelle contradiction entre la recherche d'un critère universel de la vérité et la définition de la vérité comme accord de la connaissance avec son objet car cet accord devrait permettre de distinguer un objet des autres ; autrement dit il devrait être particulier, « en effet une connaissance qui est vraie si elle est rapportée à un objet, peut être fautive si elle est rapportée à un autre » (*ibid.*) ; or, un critère demande à s'appliquer à tous les cas, donc « il est tout à fait impossible et absurde de demander un caractère de la vérité de ce contenu des connaissances » si bien qu'« une marque suffisante et en même temps universelle de la vérité ne peut être donnée » (I, 2^e partie, III, trad. fr., p. 81). Le critère de vérité ne pourra donc s'appliquer qu'à la forme de connaissance.

Du point de vue du contenu du savoir, il n'y a donc pas de « signe distinctif et universel de la vérité » (*ibid.*, p. 148). Il faut donc regarder du côté de la forme et voir ce que les logiciens proposent. Kant reconnaît à la logique générale le mérite de donner une réponse à la recherche du critère mais il ajoute que cette réponse est incomplète car elle n'est que négative ; elle nous dit : la connaissance ne doit pas se contredire elle-même. Le concept formel de la vérité est donc le principe de contradiction qu'Aristote avait posé dans le livre G de la *Métaphysique* (voir *supra*).

Pour Kant, un tel principe est incomplet parce qu'il ne prémunit pas contre l'erreur : « Le critère simplement logique de la vérité, savoir l'accord d'une connaissance avec les lois universelles et formelles de l'entendement et de la raison, est certes la condition *sine qua non*, par conséquent la condition négative de toute vérité ; reste que la logique ne peut aller plus loin, et que

l'erreur qui porte non sur la forme, mais sur le contenu, la logique ne peut la découvrir à l'aide d'aucune pierre de touche » (trad. fr., p. 149). User de façon abusive de la logique, c'est selon Kant penser que les lois logiques sont effectivement productrices d'un savoir, qu'elles sont plus qu'un canon, un *organon*. Cet abus donne lieu à une apparence de savoir ajoute Kant, qui nous place d'emblée dans une logique de l'apparence, c'est-à-dire dans une dialectique.

Théories correspondantistes et pragmatistes de la vérité

Dire que la vérité est utile, c'est certes donner un critère qu'il est difficile de remettre en question car « il y a certainement peu de cas, s'il y en a, pour lesquels il est clairement utile de croire ce qui est faux » (B. Russell, *William James conception of truth*, in *Philosophical essays*, p. 120). Mais si l'utilité est un critère du vrai, il ne s'ensuit pas qu'elle « signifie » le vrai, la signification étant entendue ici en un sens référentiel comme le montre l'exemple du catalogue de la bibliothèque donné par Russell : si le catalogue est un bon critère, un critère utile pour ne pas perdre de temps dans les rayons d'une bibliothèque, il ne saurait se substituer aux livres de la bibliothèque. Même s'il est parfait, il ne rend pas compte de la vérité de la proposition : « le livre est dans la bibliothèque » ; « quand vous dites que le livre est dans la bibliothèque, vous ne voulez pas dire (mean) par là qu'il est mentionné dans le catalogue. Vous voulez dire que le présent livre est à trouver quelque part dans les rayons » (*ibid.*). Cet aspect proprement référentiel du *meaning* permet à Russell de défendre la thèse selon laquelle ce sont des faits (le livre recherché se trouvant ou non dans les rayons, et non sa simple mention ou non dans le catalogue) qui sont condition de la vérité ou de la fausseté de nos propositions. En mettant l'accent sur les notions de « condition ou circonstance de vérité » pour les propositions atomiques et sur celle de « fonctions de vérité » pour les propositions moléculaires, Russell vise ce qui « constitue » la vérité ou la fausseté de nos croyances, non ce qui peut en être le « critère » (« On the nature of truth », *Philosophical Essays*, p. 149). En reprenant l'exemple de Russell, on peut donc dire qu'en réduisant la recherche de la signification du vrai à la recherche d'un critère, le pragmatiste se donne un libre accès au catalogue mais se condamne à ne lire aucun livre.

Il y a pour Russell des « conditions » concernant les faits qui déterminent leur vérité. Si je dis « il pleut » ; il y a une « condition de temps qui rend mon jugement vrai (ou faux selon le cas) » et qui prend le nom de « fait » (*Philosophie de l'atomisme logique*, I, p. 182). Le pragmatiste, selon Russell, ne rapporte pas la vérité à des « conditions » mais à une théorie causale, à la faveur d'une confusion sur la notion de signification. Le pragmatiste, en particulier W. James, dont il est beaucoup question dans l'article « Pragmatism » (*Philosophical Essays*, p. 79-111), passe subrepticement d'une notion inférentielle de la signification à une notion d'usage. Quand le pragmatiste dit qu'une croyance est

vraie, cela « signifie » que cette croyance est utile ; il établit « une connexion causale » entre croyance et utilité. Mais le mot de « signification » est utilisé ici de façon ambiguë, car le pragmatiste attend de lui aussi qu'il remplisse une fonction d'usage et non seulement cette fonction causale. Or, si le mot « vrai » signifie utile au sens causal, c'est à la faveur d'une ambiguïté qu'il peut avoir encore cette signification au sens d'une signification-usage. En reprenant l'exemple de Russell, il apparaît en effet que l'ambiguïté est manifeste : quand nous disons « nuage signifie pluie » et « rain signifie pluie » ; c'est bien « ce second sens qu'on espère trouver dans un dictionnaire. Quand nous demandons « que signifie tel ou tel mot ? » ce que nous voulons savoir c'est ceci : « qu'y a-t-il dans l'esprit d'une personne qui l'utilise ? » (*ibid.*) ; or, « "vrai" ne signifie pas "favoriser nos buts" au sens où "rain signifie pluie" ». Le pragmatisme ne répond donc pas au « second sens » qu'on attend. Il « ne répond pas à la question : qu'y a-t-il dans nos esprits quand nous jugeons qu'une certaine croyance est vraie ? » (*ibid.*).

Reste que la signification-causale répond à un objectif de taille : montrer qu'une des dimensions de l'assertion est d'induire des croyances. La force du pragmatisme est de ne pas dissocier ces deux phénomènes que Russell appelle la signification-causale et la signification-usage. Le lien entre ces deux significations est problématisé par C.S. Peirce (1839-1914) par la notion d'indexicalité : une proposition assertée est une proposition qui comprend des index. La fonction de l'index est à la fois de rapporter la proposition à quelque chose de réel (signification-usage) et de rappeler que l'assertion est un acte effectif du discours cherchant à produire certains effets : « Quand on utilise des symboles tels que les mots pour construire une assertion, cette assertion se rapporte à quelque chose de réel. Elle doit non seulement déclarer le faire, mais le faire réellement, sinon elle n'est ni vraie ni à plus forte raison fautive. Un témoin peut bien jurer en respectant les formalités légales que Jean Dupont a commis un meurtre, si "Jean Dupont" ne dénote aucune personne existante, il n'a fait aucune assertion » (4.500).

Mais une proposition assertée ne fait pas que dire quelque chose, elle effectue un acte en le disant : « elle est passible de conséquences réelles » (5.547). Le locuteur à la fois assume ce qu'il dit, c'est-à-dire doit pouvoir en rendre compte, et cherche à produire certains effets. L'assertion, en ce sens, s'apparente à un serment : « Un acte d'assertion suppose qu'une personne exécute, en formulant une proposition, un certain acte qui la rend passible de peines devant la loi sociale (ou du moins la loi morale) si cette proposition n'est pas vraie, à moins qu'elle n'ait une excuse définie et suffisante » (2.315).

Asserter, c'est s'exposer à un contrôle public de ses croyances et prendre le risque d'encourir les conséquences si l'assertion est fautive. Asserter, c'est s'exposer à rendre des comptes dans la mesure où cet acte s'accompagne d'une induction de croyance.

Le pragmatisme, en refusant la théorie correspondantiste, rend impossible, selon Russell, la reconnaissance

d'une croyance comme vraie ou fautive. Il pense qu'une croyance doit être tenue vraie si certaines conditions, qu'il appelle faits, se produisent. Il y a une question de fait totalement indépendante de ma croyance et qui rend celle-ci vraie ou fautive : « Il me semble que si "Shakespeare a écrit Hamlet" est vrai, il y eut un temps où Shakespeare s'est assis la plume à la main pour écrire certains mots » ; il y a donc bien dans ce cas des conditions qui déterminent la vérité ou la fausseté de la croyance. Ce procès fait à James ne peut concerner tout le pragmatisme ; en particulier Peirce n'a jamais défendu une liberté de croire comme base de la vérité, ni donc l'idée que la validité d'une connaissance pourrait être limitée à un groupe de chercheurs. Bien au contraire, il utilise l'expression française « c'est plus fort que moi » (5.419) pour indiquer que rien ne permet d'échapper à la vérité : « Ce qu'on ne peut s'empêcher de croire n'est pas, à proprement parler, une croyance erronée. Pour nous c'est la vérité absolue » (5.419).

La conception peircienne de l'indexicalité de l'assertion, et la conception deweyenne de l'assertibilité garantie reconnaissent toutes deux qu'il y a des conditions de la vérité, des contraintes sans lesquelles il est difficile de continuer à parler de croyances vraies. Simplement ces contraintes sont de nature inférentielle et non comme le croit Russell de nature non inférentielle : relevant d'une connaissance directe ou par accointance. Si nos croyances sont bien plus inférentielles que ne le dit Russell, alors nos connaissances sont beaucoup plus sujettes à caution, autrement dit beaucoup plus faillibles que ne le dit Russell. L'évidence et l'immédiateté ne sont que le signe d'un argument d'autorité accompagné de la prétention à l'absoluité et à l'infailibilité. Dans la mesure où toute pensée est signe, elle est toujours plus ou moins soumise au doute, doute que lève partiellement la théorie pragmatiste de la vérité ; une telle théorie, comme le note Dewey, « efface des difficultés, enlève des obscurités, elle met les individus dans des relations plus expérimentales, moins dogmatiques et moins arbitrairement sceptiques avec la vie » (J. Dewey, *A short catechism concerning truth*, *Middle Work*, p. 5-6, vol. 6). « Le vrai est ce vers quoi tend l'enquête » (5.557) ; cette phrase permet de jeter un éclairage nouveau sur la satisfaction qui procure une vérité. Dire que le vrai est ce qui est satisfaisant de croire, cela ne signifie pas un quelconque confort personnel ; c'est plutôt l'idée que la méthode scientifique a réussi à écarter le doute. En ce sens, être satisfait d'une croyance, c'est ne pas être gêné par un doute ; mais ce n'est pas disposer d'une certitude absolue : « trois choses sont impossibles à atteindre par le raisonnement : la certitude, l'exactitude, l'universalité absolue » (1.141). En revanche, à défaut de certitude absolue, il peut y avoir une recherche asymptotique de la vérité où les hommes, loin de faire prévaloir leurs intérêts privés, s'identifient les uns aux autres comme membres d'une communauté de recherche. On parvient alors à des caractérisations de la vérité mais non à une définition.

La définition sémantique de la vérité

Si on se place du point de vue d'une langue naturelle, il y a en effet une indéfinissabilité de la vérité pour une langue dans cette même langue car il faut pouvoir nommer la proposition vraie et dire en même temps qu'elle est vraie. Dans un même langage cette double exigence aboutit à une antinomie : « Tout langage auquel appartient à côté d'une quelconque de ses propositions le nom de cette proposition » (A. Tarski, *Logique, sémantique, métamathématique*, chap. VIII, trad. fr. A. Colin, p. 170) est un langage contradictoire. Russell avait déjà indiqué que sans une théorie du symbolisme on ne peut sortir des contradictions du langage. Il avait proposé une hiérarchie dans l'usage des symboles ; Tarski va plus loin : il faut hiérarchiser les langages eux-mêmes. Notre propension à vouloir tout nommer ne peut être neutralisée que par une distinction de langages.

La recherche d'une définition sémantique de la vérité doit pouvoir éclaircir l'intuition suivante déjà présente chez Aristote (Aristote, *Métaphysique*, G, 1011b26) : « Est proposition vraie la proposition disant que les choses se présentent de telle et telle manière, lorsque les choses se présentent de cette manière » (Tarski, *op. cit.*, chap. VIII, § 1, trad. fr., p. 162). De même, dans son article de 1933 sur *Le concept de vérité dans les langages formalisés*, Tarski note qu'il ne va s'occuper que « des intentions contenues dans la conception classique de la vérité ("vrai : correspondre avec la réalité)", par opposition avec la conception utilitariste ("vrai : utile d'un certain point de vue") ».

Que faut-il entendre par sémantique ? « Nous entendons par sémantique, la totalité des considérations qui concernent les concepts qui, en gros, expriment certaines connexions entre les expressions d'un langage et les objets et les états de choses auxquelles ces expressions réfèrent. Comme exemples typiques de concepts sémantiques, nous pouvons mentionner les concepts de dénotation, de satisfaction, et de définition [...] Nous devons également inclure le concept de vérité – ce qui n'est pas toujours reconnu – tout au moins dans son interprétation classique conformément à laquelle "vrai" signifie la même chose que "correspondant avec la réalité" – (Tarski, « The establishment of Scientific Semantics », in *Logic, semantics, metamathematics*, trad. angl. J.H. Woodger, Hackett Publ. Co., Indiana, 1956, p. 401).

La référence à la définition classique de la vérité ne signifie pas que Tarski va reconduire une définition correspondantiste de la vérité ; cette référence est seulement indicative d'une intuition de départ ; la définition sémantique de la vérité est en réalité neutre à l'égard d'une quelconque des caractérisations de la vérité (cohérence, assertibilité, correspondance).

Pour définir le concept de vérité ou de satisfaction d'une forme d'énoncé, Tarski a montré qu'il était nécessaire de disposer de deux langages. L'énonciation de vérité doit être bien séparée de l'énoncé lui-même, autrement la définition de la vérité donne lieu à une

antinomie ; par exemple le langage-objet peut être le français et le métalangage l'anglais, ou bien la même langue mais en sériant les éléments qui s'y trouvent : dans le langage-objet on mettra toutes les propositions qui ne contiennent pas les concepts sémantiques, dans l'autre on mettra les concepts sémantiques. Ce qui est présupposé pour le langage-objet, c'est la cohérence et la possibilité de le comprendre. Cependant la difficulté d'une définition sémantique de la vérité dans le cadre des langues naturelles, une fois ôtée la clause d'universalité, demeure : en effet on ne peut engendrer par récursion les propositions du langage-objet ; on ne peut pas non plus donner tous les termes primitifs. Construire une sémantique du langage naturel supposerait une réforme de ce langage ; « tâche ingrate » consistant à « définir sa structure », « dépasser l'ambiguïté des termes qui y figurent », « scinder le langage dans des séries de langages de plus en plus étendus, dont chacun est dans la même relation avec le suivant que celle qui existe entre un langage formel et son métalangage » (Tarski, cité par Davidson, 1993, p. 57) ; autant faire perdre au langage naturel son caractère naturel sans garantie assurée de parvenir à satisfaire ces clauses. C'est pourquoi Tarski, dans « Le concept de vérité dans les langages formalisés » publié en 1935, parle de « vrai dans un domaine d'individus », domaine en relation avec un langage formalisé. La définition sémantique ne sera donnée que pour les langages formels. Cet article donne deux résultats majeurs : 1) vrai, c'est vrai dans une structure ; il s'agit d'éviter l'usage universel du terme vrai dans la langue ordinaire car il est responsable des antinomies comme celle du menteur ; il faut donc que la langue-objet n'ait pas d'expression pour les notions sémantiques de vrai et de faux dans L. Si nous avons à dire qu'un énoncé du langage-objet est vrai, nous formons un nom de cet énoncé et nous attachons à ce nom le prédicat « est vrai ». Le nom ainsi que le prédicat appartiendront au métalangage. 2) La vérité d'une formule est récursivement définie à partir de la vérité de ses sous-formules car on ne peut donner une liste énumérative de toutes les propositions vraies que dans le cas des langages finis ; il suffit de se donner un lexique et des opérations de passage des expressions composantes à des expressions composées ; autrement dit recourir à un algorithme d'engendrement qui est la récursivité. Cet algorithme consiste à indiquer les conditions de vérité des énoncés atomiques (les énoncés les plus simples) et d'énoncer les conditions de vérité qui correspondent aux constructions de négation, de disjonction, et de quantification existentielle.

La convention T de Tarski résume ces deux résultats, elle dit ceci : « La neige est blanche » est vrai si et seulement si la neige est blanche ou encore N est vraie si et seulement si M. M est la traduction dans le métalangage de la proposition du langage-objet dont le nom est N. C'est ce que Tarski appelle la condition d'adéquation matérielle ; elle suppose que ce qui est à gauche est compris ; la convention traduit ce qui est compris ; elle n'est pas instrument de compréhension ;

mais un élément fixateur de vérité. Appliquer la convention T, c'est pouvoir engendrer dans le métalangage une proposition vraie à chaque fois qu'on énonce une proposition dans le langage-objet.

La théorie correspondantiste interprète la partie de droite comme un état de choses, un fait : mais ce n'est pas ce qu'effectue la convention T. Dans cette convention, à gauche il y a des entités linguistiques, à droite leurs conditions de vérité. Considérer les conditions de vérité comme une référence à des faits suppose un engagement métaphysique. Autrement dit, la définition sémantique lue comme un critère correspondantiste convertit la sémantique en métaphysique. Une chose est de relier sémantiquement un langage au monde, une autre est d'articuler une proposition à des faits. L'intérêt sémantique de la définition de Tarski est qu'on est dispensé de rechercher des entités correspondantes à la propriété de vérité.

Vérité-redondance

Cette convention rend compte de l'usage consistant du mot « vrai ». Tarski opère, comme on le voit, une décitation mais cette décitation n'implique pas que le terme « vrai » est éliminable ; ce n'est pas une théorie de la vérité-redondance ; celle-ci interprète les deux parties de la convention comme essentiellement identiques, ne différant que par la notation ; le prédicat « vrai » dans cette perspective est éliminable : selon la théorie de la vérité-redondance, on ne parle pas de la proposition « la neige est blanche », mais de la neige elle-même. Mais l'élimination du prédicat vrai pose problème quand le prédicat porte sur une variable et non sur une citation : soit le cas des énoncés universels du type « toutes les conséquences d'énoncés vrais sont vraies » ; dans de tels énoncés, le mot « vrai » ne peut être supprimé, il s'applique alors à quelque chose « qui ne se trouve pas explicitement sous notre nez » (Quine, *Quiddités*, trad. fr., Le Seuil, 1992, p. 266). De même, par exemple, l'énoncé « tout ce que dit Pierre est vrai » ne peut pas donner lieu simplement à la répétition de ce que Pierre a dit. Énoncer des vérités ne consiste pas à répéter les vérités ; pour la simple raison qu'une vérité est assumée quand elle est énoncée ; « dire la vérité toute la vérité rien que la vérité » est le meilleur exemple de l'insuffisance de l'approche décitationnelle ou de l'approche de la vérité-redondance. On peut, comme le souligne Stephen Read (1995, p. 29), reconnaître à la théorie de la vérité-redondance un mérite : montrer que la vérité n'est pas une propriété réelle ; mais on peut aussi constater qu'elle manque la dimension assertive de la vérité : « Ce qui est important cependant est la nature anaphorique de la prédication de vérité. Dire "ceci est vrai" ou "Ce que John dit est vrai" c'est essentiellement se référer à une autre assertion – mais ce n'est pas prédiquer d'elle une réelle propriété » (*ibid.*).

L'intérêt de la « fonction décitationnelle » (Quine, 1970) n'est donc pas d'éliminer le prédicat vrai mais plutôt de ne pas succomber à la tentation de la théorie

linguistique de la vérité qui nous dit que vrai, c'est vrai en vertu d'un langage ; ici, c'est plutôt vrai en vertu d'un monde, sans pour autant, comme on l'a vu, supposer un engagement métaphysique à l'égard du monde.

Vérités normatives et vérités descriptives

Pour le Wittgenstein du *Tractatus logico-philosophicus*, il y a des propositions dont la vérité ou la fausseté dépend de réalités non linguistiques, et il y a des propositions qui ne doivent leur vérité qu'à des constantes logiques comme « ou », « ne pas ». La formule « Brutus a tué César ou Brutus n'a pas tué César » doit sa vérité à « ou » et à « ne pas » et non à un fait ; et certaines règles ont fixé l'usage de ces constantes, des règles qui sont donc des normes et non des descriptions de faits. Pour Quine, il n'y a pas de différence entre normes et hypothèses sur les faits. Il y a une continuité de la physique à la logique. La thèse essentielle défendue ici est que toutes les vérités sont descriptives et qu'il y a toujours une ontologie sous-jacente aux vérités logiques ; Quine cherche, à partir d'une épistémologie naturalisée, à combattre « la doctrine linguistique de la vérité logique » (Quine, 1976, p. 108), celle selon laquelle les vérités logiques ne dépendent que de transformations d'expressions effectuées au sein du langage. Même des vérités comme « p ou non p », considérées par Wittgenstein comme des tautologies qui ne décrivent pas le monde, sont dépendantes à l'égard de celui-ci. La vérité de « Brutus a tué César ou Brutus n'a pas tué César » dépend-elle oui ou non de l'action de tuer et des personnes ici envisagées ? Le raisonnement consiste à montrer que de telles vérités logiques dépendent d'une attribution des valeurs de vérité à p même si elles ne dépendent pas des valeurs elles-mêmes. La confusion dénoncée par Quine est celle qui consiste à assimiler l'attribution des valeurs aux valeurs elles-mêmes : il faut que p ait une valeur de vérité pour que « p ou non p » en ait une ; l'indifférence de p à l'égard du vrai et du faux dans la vérité logique « p ou non p » ne signifie pas que p ou non p ne dépend pas de la vérité de p. P. Gochet a bien montré ce point : « De ce que "p ou non p" est vrai quelle que soit la valeur de "p", on ne peut pas conclure que "p ou non p" soit vrai indépendamment de la valeur de p, pas plus qu'on ne peut dire que si un moteur consomme indifféremment n'importe quel combustible, il fonctionne indépendamment de tout combustible » (P. Gochet, 1978, p. 152).

Si donc le concept de vérité logique présuppose celui de vérité et que la vérité suppose la prise en compte d'une référence à un domaine d'individus, alors les vérités logiques ont une portée ontologique. En général nous considérons les vérités logiques comme des phrases éternelles, c'est-à-dire déliées des circonstances de l'élocution, mais cela ne vient que du besoin de construire une théorie et de ne plus s'en tenir aux phrases observationnelles. En vérité les phrases éternelles, « dépositaires de la vérité elle-même », ne sont

que des projections simplifiées de phrases observationnelles. C'est en ce sens qu'il faut comprendre la simplicité des axiomes logiques ; cette simplicité est une simplification ; elle ne correspond à rien de primitif en soi ; elle ne l'est que pour les besoins de la construction théorique. Plus une discipline scientifique gagne en rigueur, moins elle se rend dépendante du monde : « Ce qui était considéré comme une théorie à propos du monde devient reconstruit comme une convention de langage » (Quine, *Truth by convention*, 1935, in *The ways of paradox and other essays*, p. 77) ; c'est ainsi que nos définitions prennent l'allure de principes analytiques.

Assertion et assertabilité

L'analyticité peut être définie comme une doctrine de la vérité en vertu de la seule signification. Il est vite apparu, à la suite des travaux de Frege, Russell, Carnap, Quine, Davidson, qu'une théorie de la vérité était en même temps une théorie de la signification. Le concept de vérité ne peut pas venir après le concept de sens. En revanche il est possible de donner des conditions de vérité sans donner une définition de la vérité (Frege).

Dummett considère le concept de vérité comme un concept second, plus fin que celui de justifiabilité : « Pour une maîtrise de la partie la plus simple de la pratique linguistique, une saisie du concept de vérité, quoique implicite, n'est pas requise mais seulement un concept plus grossier de justifiabilité ; ainsi un concept plus fin est nécessaire pour maîtriser l'usage de moyens de former les énoncés complexes à partir des plus simples » (M. Dummett, 1996, p. 195). Pour disposer d'un système sémantique qui interprète des propositions d'un langage donné, il faut un terme sémantique primitif pour la vérité. Dummett choisit celui de « justifiabilité » pour les langages parlés, Church celui de « dénote » ou « a pour valeur », pour les langages formels. Dans les deux cas, il semble difficile de donner les propriétés sémantiques d'un langage, c'est-à-dire les conditions de vérité de ses énoncés, sans disposer d'un sens transcendant du mot « vrai ».

Il y a un moment où il faut disposer d'un concept normatif de vérité, un concept qui nous indique que nous avons avantage à la vérité et inconvénient à la fausseté. Autrement dit, la sémantique des propositions demande à être évaluée. Cette condition d'évaluation de la sémantique est ce que des philosophes comme M. Dummett appellent « l'assertabilité ». C'est elle qui justifie en dernier lieu l'interprétation des locuteurs d'un langage L.

Cette justification passe par la recherche de la place du concept de vérité dans notre langage bien plus que par l'usage du mot « vrai ». Pour comprendre cet usage le principe d'équivalence entre un jugement A et « il est vrai que A » suffit. Le concept de vérité en revanche ne se réduit pas à ce principe d'équivalence ; « Il est profondément ancré dans notre saisie implicite de

l'usage de notre langage » (Dummett, *op. cit.*, p. 199), saisie qui demande un saut conceptuel. Ce saut conceptuel, apparenté à ce qui est demandé quand on parle d'une « infinité d'entiers naturels ou d'une infinité d'étoiles », ne peut jamais se donner comme une « réfutation contraignante » à ceux qui, partisans d'un finitisme radical, disent ne pas comprendre des propositions concernant une « infinité de choses d'une certaine nature » (*ibid.*).

Pour Spinoza, le concept normatif de la vérité devait permettre de confondre le sceptique. Pour Dummett, ce concept qu'il nomme « justifiabilité » nous fait côtoyer l'abîme bien plus que le fondement ferme : « En général un concept dont l'acquisition demande un saut conceptuel est vulnérable à l'attaque sceptique » (*ibid.*).

La difficulté est la suivante : soit on met l'accent sur le principe d'équivalence et on manque quelque chose de l'avantage à dire et à assumer les vérités, soit on met l'accent sur l'avantage à dire et à assumer les vérités (assertabilité et justifiabilité) et on manque la stabilité et l'absoluité du vrai.

► ARISTOTE, *Métaphysique*, trad. fr., Paris, Vrin. – BOLZANO B., *Die Wissenschaftslehre*, 1, 1837, in *Grundlegung der Logik*, Hamburg, 1963. – DAVIDSON D., « Vérité et signification », trad. fr. in *Enquêtes sur la vérité et l'interprétation*, Nîmes, J. Chambon, 1993. – DUMMETT M., *The source of the concept of truth, in The seas of language*, New York/Oxford, Clarendon Press, 1996. – FREGE G., *Recherches logiques*, 1. *La pensée* 2. *La négation*, trad. fr., Paris, Le Seuil, 1971. – GOCHET P., *Quine en perspective*, Paris, Flammarion, 1978. – KANT E., *Critique de la raison pure*, trad. fr., Paris, PUF ; *Logique*, trad. fr., Paris, Vrin. – LEIBNIZ, *Nouveaux essais*, Paris, Flammarion, 1978. – PEIRCE C.S., *The collected papers* (Les passages cités de C.S. Peirce donnent dans l'ordre le numéro du volume puis celui du paragraphe), vol. 1-6, Harvard Univ. Press, 1958. – QUINE W.V.O., *Carnap and logical truth* (1954), in *The ways of paradox and other essays*, 2^e éd., Cambridge (Mass.), Harvard Univ. Press, 1976 ; *Quiddités*, trad. fr., Paris, Le Seuil, 1992. – READ S., *Thinking about logic*, Opus, Oxford Univ. Press, 1995. – RUSSELL B., *William James conception of truth, in Philosophical Essays*, trad. fr., Paris, PUF, 1997 ; *Philosophie de l'atomisme logique*, trad. fr., Paris, PUF, 1992. – TARSKI A., *Logique, sémantique, métamathématique*, chap. VIII, trad. fr., Paris, A. Colin, 2 vol., 1972 et 1974.

Ali BENMAKHLOUF

→ A priori ; Criticisme ; Fait ; Logicisme ; Nécessité ; Pragmatisme ; Preuve ; Rationalisme ; Vérification.

VIE

Au début de l'article « Vie » rédigé par Georges Canguilhem pour l'*Encyclopaedia Universalis*, le philosophe attribue à Aristote « la première esquisse d'une définition générale de la vie ». Il cite le *Traité de l'Âme* (II, 1) : « Nous entendons par vie le fait de se nourrir, de croître, et de dépérir par soi-même. » Il s'agit bien, en effet, d'une esquisse. Elle repose sur l'identité de la vie et de l'animation, et convient à toute forme de vie, y compris la plus fondamentale, celle des végétaux. Il

en résulte que, comme le remarque Canguilhem, la partie de l'œuvre d'Aristote qui traite de la vie peut être appelée indifféremment biologie ou psychologie. Les phénomènes de la vie qui viennent d'être mentionnés par Aristote sont fondamentaux en ce sens qu'ils forment la condition nécessaire d'autres caractères, la sensation et le mouvement local, auxquels il s'est également intéressé, ainsi qu'à la reproduction ou génération. L'œuvre de Stagire est fondatrice pour la biologie par de nombreux aspects, et tout particulièrement par la classification des animaux. La classification donne lieu à des discussions méthodologiques sur les limites de la méthode platonicienne de la dichotomie, qui ne sont pas sans intérêt également pour la conception aristotélicienne de la logique des genres et espèces. Les problèmes principaux posés par la connaissance de la vie sont discutés par Aristote.

Par la suite, et jusqu'à une époque récente, la vie semblera toujours échapper, d'une manière ou d'une autre, à sa connaissance. Elle paraîtra un phénomène en quelque sorte autofondé, ne relevant donc pas d'une connaissance générale, mais au contraire tout à fait singulière, d'un régime de rationalité qui lui est propre, et pour certains philosophes, comme Kant, d'une connaissance « réfléchissante » plutôt que « déterminante », connaissance qui ordonne le divers de la nature à un principe unique, celui de la finalité, qui rend la nature intelligible bien que ce principe n'appartienne pas à l'entendement proprement dit, lequel connaît les causes mais non les causes finales. Le fait que la connaissance biologique puisse, à la fin du XVIII^e s., être considérée comme d'un ordre si particulier, être vue sous l'angle d'une finalité interne irréductible à toute connaissance de type physique, s'il est vrai que dans la connaissance des êtres organisés, « l'idée du tout détermine la forme et la liaison de toutes les parties ; non comme cause – car ce serait alors un produit de l'art, mais pour servir, à celui qui juge la chose, de fondement pour la connaissance de l'unité systématique de la forme et de la liaison des éléments divers contenus dans la matière donnée » (Kant, *Critique du Jugement*, § 65) – ce fait peut nous éclairer sur bien des épisodes ultérieurs de la philosophie des sciences en général et des sciences de la vie et de la médecine en particulier. La « réflexion » philosophique, qui fournit un « fondement de connaissance » d'un type particulier n'a pas été sans répercussions sur la pensée des biologistes et des médecins qui y ont eu recours pour tenter de mieux aborder les phénomènes vitaux, longtemps restés extrêmement obscurs.

C'est ainsi que le neurologue Kurt Goldstein, auteur de la *Structure de l'organisme* (1934), ouvrage d'inspiration fortement holistique, reconnaît comme ses inspirateurs les philosophes Kant, Husserl et Cassirer. Georges Canguilhem lui-même, auteur de la célèbre théorie de la « normativité » du vivant, être capable de créer des normes de vie et de les modifier en fonction des variations du milieu, a écrit dans son ouvrage *La connaissance de la vie* (1952, 2^e éd., Paris, Vrin, 1965, p. 11) : « La vie est formation de formes, la

connaissance est analyse des matières informées. Il est normal qu'une analyse ne puisse jamais rendre compte d'une formation et qu'on perde de vue l'originalité des formes quand on n'y voit que des résultats dont on cherche à déterminer les composantes. Les formes vivantes étant des totalités dont le sens réside dans leur tendance à se réaliser comme telles au cours de leur confrontation avec leur milieu, elles peuvent être saisies dans une vision, jamais dans une division. Car diviser c'est, à la limite, et selon l'étymologie, faire le vide, et une forme, n'étant que comme un tout, ne saurait être vidée de rien. » Et de citer Kurt Goldstein : « La biologie, dit Goldstein, a affaire à des individus qui existent et tendent à exister, c'est-à-dire à réaliser leurs capacités du mieux possible dans un environnement donné. » Les accents bergsoniens de la pensée de Canguilhem (qui pourtant ne cite guère Bergson) sont assez manifestes, mais sa dette à l'égard de la pensée allemande l'est aussi, quoique d'une manière plus cryptique. L'idée que les formes vivantes ne peuvent être saisies que dans une vision, jamais dans une division, rappelle Goethe et la Naturphilosophie. Quant à Goldstein, avec lequel Canguilhem s'accorde à partir d'une évolution différente, il adopte une démarche à la fois philosophique et biologique, lorsqu'il écrit (*La Structure de l'organisme*, Paris, Gallimard, 1951, p. 313) : « La connaissance biologique est l'acte créateur durablement continué, par lequel l'idée de l'organisme devient de plus en plus une expérience vécue, une sorte de vue, à peu près dans le sens de Goethe, qui se tient toujours sur le sol de faits très empiriques. » Goldstein donne comme exemple de tels actes créateurs l'apprentissage de performances motrices, ces performances engageant une coordination d'ensemble de l'organisme nécessitant une représentation ou une idée à réaliser.

Si la connaissance de la vie est vision plus que division, le statut de l'expérimentation animale devient méthodologiquement douteux. Canguilhem conclut ainsi le chapitre « L'expérimentation en biologie animale » de *La connaissance de la vie* (p. 39) : « Nous voudrions demander à une image de nous aider à mieux approcher le paradoxe de la biologie. » Il s'agit de « la faute originelle du hérisson qui le pousse à la traversée des routes ». « Les hérissons, en tant que tels, ne traversent pas les routes. Ils explorent à leur façon de hérisson leur milieu de hérisson, en fonction de leurs impulsions alimentaires et sexuelles. En revanche, ce sont les routes de l'homme qui traversent le milieu du hérisson... Or, la méthode expérimentale – comme l'indique l'étymologie du mot méthode – c'est aussi une sorte de route que l'homme biologiste trace dans le monde du hérisson, de la grenouille, de la drosophile, de la paramécie et du streptocoque. Il est donc à la fois inévitable et artificiel d'utiliser, pour l'intelligence de l'expérience qu'est pour l'organisme sa vie propre, des concepts, des outils intellectuels, forgés par ce vivant savant qu'est le biologiste. On n'en conclura pas que l'expérimentation en biologie est inutile ou impossible, mais, retenant la formule de Claude

Bernard : la vie, c'est la création, on dira que la connaissance de la vie doit s'accomplir par conversions imprévisibles, s'efforçant de saisir un devenir dont le sens ne se révèle jamais si nettement à notre entendement que lorsqu'il le déconcerte. » C'est la vie qui dicte son rythme à la connaissance. Le savant est d'abord un vivant. Le phénomène précède la science et d'une certaine façon la déborde, la créativité étant du côté de la vie avant d'être du côté de la connaissance. La connaissance, dans cette situation philosophique, est faite d'artifices. L'artifice doit épouser son sujet autant que possible. La connaissance de la vie est comme la vie elle-même imprévisible et déconcertante.

Il est de fait que la vie a longtemps opposé à sa connaissance des obstacles infranchissables. De ce fait, les phénomènes vitaux paraissaient régis par des lois propres, sans doute descriptibles mais apparaissant comme singulières et délimitant un royaume, des « règnes » situés à l'intérieur du monde physique mais faisant exception à ses lois. Le jugement de philosophes sur la connaissance de la vie est porté par une longue tradition philosophique méfiante à l'égard de la méthode analytique en biologie et portée à insister sur le fait que les organismes sont des totalités insaisissables autrement que par une sorte d'intuition. Canguilhem, en un certain sens, nous l'avons vu, retrouve la *Naturphilosophie*. La polémique ne cessera de rebondir, prenant des formes modernisées par les données scientifiques mais restées identiques dans les termes mêmes dans lesquels elle se pose. Cette problématique est héritée du milieu du XIX^e s., des physiciens allemands comme Helmholtz, de Claude Bernard, le physiologiste, de Louis Pasteur, le chimiste microbiologiste. Elle naît des progrès de la chimie organique, de l'apparition de disciplines nouvelles comme la biochimie et la biophysique. Elle s'énonce selon les termes de la « réduction », et donc du « réductionnisme » et de l'« antiréductionnisme », s'agissant du rapport entre les sciences de la vie, la physique et la chimie. Cette problématique continue d'occuper les philosophes, qui ont certes renoncé aux théories vitalistes d'irréductibilité de la matière vivante à des processus physicochimiques mais continuent à s'interroger, comme les neurobiologistes, sur l'émergence de l'activité mentale, de la conscience et de la subjectivité, chez les mammifères supérieurs. La controverse philosophique posée dans les termes du XIX^e s. s'est donc déplacée des phénomènes vitaux aux phénomènes mentaux. Derrière les déplacements des disciplines scientifiques, il y aurait un invariant philosophique, dont il conviendrait d'analyser l'essence, un invariant peut-être exprimé dans la représentation aristotélicienne d'une « animation » propre à la vie, animation vécue avant d'être connue.

Il est bien connu que le terme de biologie apparaît, chez plusieurs auteurs, Lamarck, Treviranus, et d'autres au tout début du XIX^e s., pour désigner une science particulière et unifiée des phénomènes vitaux. Cette science, au XIX^e s., ne va cesser de se différencier et de se subdiviser, avec le développement

remarquable de disciplines comme l'embryologie, la physiologie, l'anatomie comparée, la classification, et la fondation de disciplines nouvelles comme la génétique. En même temps s'établissent des liens toujours plus étroits avec des disciplines voisines, physique, chimie d'un côté, médecine, psychologie, sociologie de l'autre. Ce mouvement de différenciation, allant de pair avec la création de disciplines frontières comme la biochimie, la biophysique ou la psychophysique, s'accompagne d'un mouvement d'approfondissement théorique remarquable qui, partant du transformisme lamarckien, aboutit à la théorie darwinienne de l'évolution par sélection naturelle. Trois pièces maîtresses de la théorie biologique, la théorie de l'évolution (Darwin), l'embryologie, la génétique (Mendel) sont mises en place au XIX^e s. À la fin du XIX^e et au début du XX^e s., la biologie n'est plus un programme mais un domaine scientifique en pleine évolution, animé d'un sentiment d'ouverture et d'inconnu que l'on retrouve à nouveau aujourd'hui, après un siècle de progrès ininterrompus.

Au cours du XX^e s., la situation épistémologique de la biologie a profondément évolué. Des doutes, issus de la crise profonde de la rationalité ouverte par la mécanique quantique et portant sur la connaissance expérimentale du vivant, ont cédé la place à des hypothèses fulgurantes, qui sont devenues des réalités. En 1933, le physicien Niels Bohr, l'un de ceux qui ont réfléchi le plus profondément à la signification des faits et relations découverts dans la mécanique quantique, expose dans sa conférence « Lumière et vie » les raisons qui font que l'interaction entre dispositif expérimental et système étudié n'est pas plus déterminable en biologie qu'en mécanique quantique. Ses arguments restent teintés de vitalisme. En 1943, dans ses conférences sur le thème « Qu'est-ce que la vie ? », le physicien Erwin Schrödinger, en profond désaccord avec Niels Bohr sur l'interprétation de la mécanique quantique, propose l'hypothèse que le vivant recèle une structure génétique analogue à un « cristal aperiodique » qui en assure la stabilité. L'influence de Schrödinger sur le devenir ultérieur de la biologie a été souvent reconnue. La découverte de la structure en double hélice de l'ADN par James Watson et Francis Crick en 1953 peut être considérée comme une confirmation de l'hypothèse de Schrödinger.

La biologie du XX^e s. a donc évolué tant du côté des structures et fonctions des organismes que de la théorie de l'évolution. Structures et fonctions : la chimie organique, la biochimie, la biophysique ont permis de réaliser le programme du XIX^e s. finissant, celui d'une physiologie moléculaire et d'une génétique moléculaire, éclairée par l'événement majeur de la structure de l'ADN et par les études sur la structure des protéines menées à partir de 1938, et pendant un demi-siècle, par Max Perutz bientôt accompagné par John Kendrew. Évolution : au milieu du XX^e s., avec les œuvres de généticiens comme Théodosius Dobzhansky et de zoologistes comme Ernst Mayr, la « théorie synthétique de l'évolution » réunit les données de la génétique et de la

paléontologie. Cette théorie est fondée sur l'idée de mutations ponctuelles graduelles à la source du processus évolutif, idée qui sera pourtant bientôt contestée, l'évolution étant faite aussi de sauts brusques. La « biologie moléculaire », programme d'étude systématique des problèmes de la biologie par les techniques de la physique et de la chimie, lancé à la fin des années 1930, allait fournir dans les années 1950 et 1960 des résultats fondamentaux permettant de rapprocher plus encore génétique et évolutionnisme : le code génétique, les relations entre ADN, ARN et protéines (Francis Crick), les modèles de régulation de l'expression génétique (Jacques Monod et François Jacob), les modèles de fonctionnement « allostérique » des protéines qui manifestent des propriétés de régulations physiologiques fondées sur des changements de conformation moléculaire (Jacques Monod, Jeffries Wyman, Jean-Pierre Changeux), les enzymes de restriction capables de couper l'ADN sur des sites spécifiques (Werner Arber), la transcriptase reverse qui retranscrit l'ARN en ADN (Howard Temin, David Baltimore), cette impressionnante moisson de résultats de la biologie moléculaire va permettre, au début des années 1970, le développement des biotechnologies. Outre de considérables conséquences pratiques, la biologie moléculaire possède une implication philosophique forte, dégagée par François Jacob lorsqu'il écrit : « On n'étudie plus la vie aujourd'hui dans les laboratoires. »

Devenue moléculaire, la biologie va donc pouvoir emprunter la voie déjà tracée par la chimie organique du XIX^e s., celle de la synthèse artificielle. Les premiers résultats des biotechnologies sont ceux de Paul Berg en 1973. Ce chercheur fabrique une molécule hybride contenant de l'ADN de la bactérie *Escherichia coli*, du virus SV 40 cancérogène du singe, et du bactériophage lambda. Il décide d'arrêter provisoirement ses travaux en vue d'en examiner les risques potentiels. Le processus d'Asilomar, consacré à l'examen de la technologie de l'ADN recombinant, est ainsi lancé. Il aboutira à l'interdiction d'expériences trop dangereuses, à la définition d'une échelle des risques correspondant à une échelle des degrés de confinement, physique et biologique, des laboratoires de recherche. La technologie de l'ADN recombinant aboutit plus rapidement que prévu à des résultats de grande portée médicale, avec la synthèse d'insuline humaine par la bactérie *Escherichia coli* en 1978, qui assure les besoins des diabétiques. Une seconde génération de biotechnologies voit bientôt le jour, portée par les techniques de clonage ou de séquençage de gènes déjà existantes, et surtout par la technique dite PCR (réaction en chaîne de la polymérase) qui permet d'accélérer considérablement la synthèse de matériel génétique. La technique des puces, microlaboratoires permettant de travailler à très petite échelle, joue également un rôle important dans la deuxième génération des biotechnologies, qui ont pour enjeu non plus l'introduction de gènes étrangers dans des organismes qui ne les possèdent normalement pas (plantes et animaux transgéniques), mais véritablement la modification des gènes et des

protéines correspondantes en vue de leur imprimer telle ou telle modification de vitesse d'action, de stabilité, ou de spécificité d'activité. De nombreuses applications industrielles de ces biomolécules modifiées sont attendues ou déjà existantes. En outre, les thérapies géniques, qui relèvent de la première génération des technologies de l'ADN recombinant, entrent désormais dans une phase de réalisation chez l'homme, avec certains succès obtenus par l'équipe d'Alain Fischer à l'hôpital Necker à Paris en 2000. Les nouvelles technologies biomédicales posent de nombreux problèmes d'éthique, chaque fois différents selon les situations dans lesquelles elles sont utilisées. D'un point de vue philosophique plus large, les biotechnologies illustrent et prolongent la conception de l'évolution biologique proposée par François Jacob en 1977, dans une inspiration parfaitement darwinienne : l'évolution ne procède pas à la manière d'un ingénieur, mais d'un bricoleur qui fait flèche de tout bois et réutilise dans des combinaisons nouvelles des matériaux antérieurs. En un certain sens, le « bricolage évolutif » de François Jacob, et le « bricolage biotechnologique » s'accordent, le second est fondé sur le premier. Les biotechnologies sont permises par les procédés et produits de l'évolution biologique qu'elles réutilisent pour créer de faibles variations sur ces produits eux-mêmes.

L'évolution biologique est généralement considérée comme un phénomène contingent, et cela en plusieurs sens : au sens où elle a été marquée par l'influence de causes extérieures indépendantes, de phénomènes cosmiques comme la chute d'une comète, explication la plus probable de l'extinction des dinosaures ; au sens corrélatif où son cours aurait pu prendre des directions différentes (argument de Stephen Jay Gould) ; au sens de Jacques Monod qui, dans son ouvrage *Le hasard et la nécessité* a insisté sur le fait que les mutations sont des événements aléatoires, et que la vie transforme, provisoirement, le contingent en nécessaire. De nombreux biologistes, relayés par des philosophes, considèrent que l'évolution biologique est une histoire et que la biologie est une science historique. Certains biochimistes, comme Christian De Duve, refusent cette conception et insistent au contraire sur la causalité physicochimique à l'œuvre dans les structures biologiques. Il y a là un profond conflit de rationalité, qui ressurgit en biologie comme ailleurs, entre une conception causaliste, déterministe classique de la science, et une conception non entièrement déterministe. Il est relativement aisé de transformer la contingence en une vue métaphysique. D'autres esprits philosophiques peuvent considérer le déterminisme comme une vision de la nature à laquelle l'homme doit se soumettre et qui a sa grandeur propre. D'un autre côté, la contingence est confirmée par la technologie : les produits d'une évolution contingente sont plus aisément modifiables que les éléments d'un monde nécessaire.

La biologie moléculaire n'a pas été le seul domaine de la biologie du XX^e s. à révolutionner notre conception de la vie. L'immunologie, science du soi et du non-soi, s'est développée comme théorie de la défense de

l'organisme ainsi que de l'identité de chaque être individuel, dont on sait depuis les travaux de Jean Dausset sur le système HLA de l'homme qu'il n'est semblable, sur le plan tissulaire, à aucun autre. Ces travaux ont apporté des données nombreuses et permis d'améliorer considérablement les pratiques médicales (de greffe, notamment), ainsi que la connaissance de nombreuses maladies. La nouvelle biologie du développement a découvert les mécanismes du contrôle génétique du développement (vision anticipée par Schrödinger qui pensait que les gènes gouvernaient à la fois le fonctionnement physiologique et la construction morphologique des organismes). Enfin, les neurosciences sont une des grandes conquêtes de la biologie du XX^e s., surtout développées dans la deuxième moitié de celui-ci. Elles donnent une vision de plus en plus précise des corrélats cérébraux de l'expérience consciente ainsi que des fonctionnements inconscients. Elles permettent de voir fonctionner, par les nouvelles techniques d'imagerie cérébrale, l'esprit-cerveau à un degré de résolution macroscopique utilement complété par les enregistrements de l'activité de neurones isolés ou de groupes de neurones, et par des renouvellements techniques de l'électro-encéphalographie et de la magnéto-encéphalographie. Les neurosciences d'aujourd'hui sont devenues « cognitives », elles rejoignent la psychologie. Elles donnent aussi une nouvelle vision de problèmes psychiatriques, en identifiant mieux, par exemple, des déficits spécifiques et les lésions ou malformations cérébrales correspondantes dans une maladie grave comme la schizophrénie. Elles permettent de nouvelles thérapeutiques, non seulement pharmacologiques, mais aussi d'électrostimulation, par l'implantation à demeure d'électrodes destinées à stimuler une région lésée, traitement utile pour la maladie de Parkinson. Les conséquences des sciences biologiques d'aujourd'hui sur la vie individuelle et collective commencent seulement à se faire sentir. Le clonage reproductif, qui n'est pas encore réalisé chez l'homme, mais l'est depuis un certain temps chez nombre d'animaux y compris de mammifères, a suscité des polémiques violentes, menées entre autres par le philosophe Jürgen Habermas. Le prélèvement et la mise en culture de cellules souches embryonnaires pour des besoins thérapeutiques est loin de faire l'unanimité.

La vie sur la terre est vraisemblablement frappée, aujourd'hui, par une crise d'extinction d'espèces analogue à celles qui ont jalonné dans le passé le cours de l'évolution biologique, à la différence que cette crise est largement due à l'expansion de l'espèce humaine. La vie est déjà, et sera modifiée par l'homme. La vie sur la terre est promise à une fin certaine. La vie humaine pourra-t-elle se poursuivre ailleurs ? La question de l'avenir de la vie rejoint celle de ses origines. Les origines de la vie sur la terre sont-elles exclusivement terrestres ? Nombreux sont les chercheurs qui en doutent sérieusement. Si la vie est un processus gouverné par les causalités physicochimiques, le principe de causalité impose que les mêmes causes produisent

les mêmes effets dans des conditions appropriées. L'observation de molécules organiques dans l'espace indique l'existence de synthèses chimiques de ces molécules ailleurs que sur notre planète. L'exobiologie étudie actuellement les scénarios possibles de la vie en dehors de la terre. D'autres niches écologiques attendent peut-être l'humanité, ou les successeurs de l'humanité actuelle.

► CANGUILHEM G., *La connaissance de la vie*, Paris, Vrin, 1965 ; « Vie », in *Encyclopaedia Universalis*, Paris, 1973, vol. 16, p. 764-769. — DE DUVE C., *À l'écoute du vivant*, Paris, Odile Jacob, 2002. — DEBRU C., *Le possible et les biotechnologies*, Paris, PUF, 2003. — DICK S. J., *The biological universe. The twentieth century extraterrestrial life debate and the limits of science*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1996. — GOLDSTEIN K., *La structure de l'organisme*, trad., Paris, Gallimard, 1951. — HABERMAS J., *L'avenir de la nature humaine. Vers un eugénisme libéral ?*, trad., Paris, Gallimard, 2002. — JACOB F., *Le jeu des possibles. Essai sur la diversité du vivant*, Paris, Fayard, 1981. — KANT I., *Critique du jugement*, Paris, Vrin, 1960. — MONOD J., *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Paris, Le Seuil, 1970.

Claude DEBRU

→ ADN ; Biotechnologies ; Canguilhem ; Cellule ; Espèce ; Plasma germinatif ; Régulation moléculaire ; Télégénétique ; Vitalisme et mécanisme ; Vivant (Théorie du).

VIRTUEL

PHYSIQUE

« C'est l'introduction du virtuel qui, finalement, caractérise le théorique », écrit René Thom en 1988 (« Le rationnel et l'imaginaire », *Traverses*, 44-45). On voit bien quelle est la cible visée par R. Thom : une conception qu'il est convenu d'appeler « positiviste » de la science, selon laquelle celle-ci a pour tâche de décrire le « réel », le réel tangible, celui qu'on tient là sous la main ou sur l'écran d'un ordinateur intégrant les résultats d'une mesure (de ce point de vue, la courbe qui apparaît sur l'écran de l'ordinateur n'a rien à voir avec la « réalité virtuelle », celle qui fascine le gamin accroché à sa console ; c'en est même l'opposé). Dans cette conception « positiviste » de la science, la théorie serait la servante (mais aussi l'inspiratrice) de l'expérience, les mathématiques un outil de description « des choses telles qu'elles sont ». Thom, au contraire, proclame que la théorie n'existe qu'à partir du moment où elle ne s'en tient plus aux « choses telles qu'elles sont » et introduit des virtualités auxquelles elle confère un rang égal, voire même supérieur, à celui qu'elle accorde au « réel ». On ne saurait mieux dire que le physicien doit se faire métaphysicien.

Métaphysicien. Horrible gros mot aux yeux de tant de physiciens pratiquants qui, précisément, se piquent de ne pas faire de métaphysique, d'être au plus près des « faits », *matter of fact*. C'est contre la métaphysique

qu'en son temps a tonné Pierre Duhem (philosophe certes, mais avant tout physicien, on ne saurait l'oublier). Son *Essai sur la théorie physique*, mieux connu sous le titre *Σωζειν τα φαινόμενα* (Sauver les apparences) est à cet égard exemplaire. Car sauver doit être entendu comme rendre compte (des apparences) au moyen de termes géométriques sans se préoccuper de l'essence des choses ; entre les apparences et les concepts mathématiques il n'y a place pour rien ; les concepts mathématiques sont hétérogènes aux choses en elles-mêmes et ne peuvent prétendre à mieux que la description des phénomènes. Pour Duhem, la séparation entre les natures mathématiques (éternelles, immobiles, n'ayant d'autre existence que celle que leur prête notre pensée) et les natures physiques (mobiles, jouissant d'une existence en dehors de notre pensée) est au fondement même de l'activité du physicien, d'Aristote à nos jours. C'est pourquoi il s'écrie, parlant de Kepler et Galilée, qui sont censés avoir voulu, contre toute raison selon Duhem, parler des choses en elles-mêmes en termes mathématiques : « Ils croyaient renouveler Aristote ; ils préparaient Newton. »

Or, c'est bien cette opposition entre Aristote et Newton que R. Thom a en tête lorsqu'il prêche pour l'introduction du virtuel. R. Thom, en effet, s'est fait le chantre d'un retour à Aristote, retour qui lui est suggéré par sa propre pratique de mathématicien-physicien-biologiste, et qui de ce fait apparaît comme la conséquence logique des développements de la science moderne qui se heurte aux limites de la conception newtonienne de la nature et de la philosophie naturelle. Autrement dit : si Galilée a éprouvé le besoin de s'opposer à Aristote, de bâtir sa physique (celle de Newton à la génération suivante et la nôtre jusqu'à présent) contre celle d'Aristote, il est temps de prendre conscience des limites d'une telle réaction.

À y regarder de plus près, on s'aperçoit que la catégorie aristotélicienne qui semble avoir disparu avec la révolution galiléo-newtonienne est celle de puissance, au sens de potentialité, de virtualité. On connaît la fameuse formule aristotélicienne : « Le mouvement est l'acte en puissance en tant qu'il est en puissance » (*Physique*, III, 1, 201a). On sait également que la conception galiléo-newtonienne du mouvement, en faisant des mobiles des êtres indifférents à l'espace, soumis à des forces extérieures, a rendu inutile la notion de puissance. Telle est du moins la vulgate. Car l'idée n'a jamais complètement disparu du panorama conceptuel de la physique : l'insistance d'Aristote, qui précise « en tant qu'il est en puissance », a continué à produire des effets (plus ou moins) souterrains dans l'histoire des sciences. De Leibniz à la philosophie de la nature allemande, l'idée de puissance a survécu auprès de ceux qui ont perçu qu'il n'était pas possible de se passer entièrement de cette notion, contrairement à ce que proclamaient les dévots du newtonianisme – ou du moins de la version reconstruite au fil des ans par ses admirateurs. Tout prouve en effet que Newton, lui, avait conscience des lacunes de sa théorie qu'il laissait aux générations futures le soin de remplir ;

mais les générations futures avaient transformé son fameux *hypothesis non fingo* en « je me contente de décrire les choses telles qu'elles sont ». C'est donc à renouer avec cette tradition parallèle, rendue clandestine par l'énorme efficacité de la méthode newtonienne, que nous invite Thom.

L'indifférence des choses à l'espace qui les entoure est au fondement de la doxa du newtonianisme. Elle est rendue nécessaire (ou du moins semble l'être) par la nécessité d'avoir à parler en termes mathématiques : un point physique doit pouvoir être traité comme un point mathématique, et il en va de même de tous les concepts mathématiques, géométriques ou non. Pour cela, il est nécessaire de procéder à une double opération : 1) dépouiller le point physique de toutes ses propriétés physiques pour n'en conserver que la « carcasse » mathématique (on suppose implicitement que cette opération est possible ; or, on ne voit pas bien pourquoi ce déshabillage devrait conduire à un être mathématique car rien ne prouve qu'un point physique ne soit rien d'autre qu'un point mathématique vêtu de propriétés physiques qui lui sont totalement hétérogènes) ; 2) lui rendre une nature physique simplifiée, en quelque sorte, en l'affectant d'un ou plusieurs coefficients censés rendre compte des interactions possibles de ce point physique avec d'autres points physiques ayant subi le même traitement ; à ces coefficients on donne le nom de charge : charge matérielle (ou masse inertielle), charge électrique, charge d'interaction universelle (ou masse gravitationnelle), etc. En dépit de l'admiration dont on est saisi devant l'époustouflante virtuosité intellectuelle de ceux qui ont « inventé » un tel processus de déshabillage – réhabillage partiel, on est en droit de se demander si c'est bien là la seule manière de rendre compte mathématiquement de la nature physique des choses ; en particulier, on peut se poser la question de savoir ce qui justifie d'établir entre êtres mathématiques et êtres physiques une distinction dont l'« évidence » doit être prise comme l'indication d'une difficulté.

C'est précisément sur ce point que porte, entre autres mais aussi surtout, la critique que Leibniz adresse à la doctrine newtonienne. « Je ne laisse pas de croire [...] que les principes mêmes de la mécanique, c'est-à-dire les premières lois du mouvement, ont une origine plus sublime que celle des pures mathématiques [...] Il y a dans la matière quelque autre chose que ce qui est purement géométrique [...] On s'aperçoit qu'il y faut joindre quelque notion supérieure ou métaphysique, savoir celles de substance, action et force : et ces notions portent que tout ce qui pâtit doit agir réciproquement, et que tout ce qui agit doit pâtir quelque réaction [...] Il ne faut pas [...] confondre les notions du lieu, de l'espace, ou de l'étendue toute pure, avec la notion de la substance, qui, outre l'étendue, renferme aussi la résistance, c'est-à-dire l'action et la passion » (« Lettre sur la question si l'essence du corps consiste dans l'étendue », 18 juin 1691). Le problème est posé : est-il légitime de séparer « l'action et la passion » de l'étendue, ou plus exactement de simplement orner

l'étendue d'un équivalent de l'action et la passion ? Ne sont-elles pas indissolublement liées ?

On voit bien que la réponse newtonienne à la question ainsi formulée, à savoir un corps est agi par une force extérieure et agit lui-même sur les autres corps par une force qui leur est extérieure, ne va pas de soi. « La notion de force, écrit Leibniz, à laquelle j'ai consacré une science spéciale, la dynamique, apporte beaucoup de lumière à l'intelligence de la vraie notion de substance [autrement dit, force et substance sont enchevêtrées et non pas séparées comme chez Newton] [...] La force active comprend une sorte d'acte ou d'*entelecheia* ; elle est le milieu entre la faculté d'agir et l'action même [alors que chez Newton ces catégories sont séparées] et implique l'effort ; ainsi elle est portée par elle-même à l'action et n'a besoin pour agir que de la suppression de l'obstacle » (« De philosophiae emendatione et notione substantiae », cité par G. Châtelet in *Les enjeux du mobile*, 1993).

C'est ici que s'introduit la virtualité : la force ne devient action que si l'on supprime l'obstacle, c'est-à-dire les contraintes qui l'empêchent d'agir. Une telle phrase n'a aucun sens si l'on adopte la conception newtonienne de la nature. Pour Newton, les contraintes sont des forces extérieures à l'objet et si ce dernier est immobile, c'est parce que l'ensemble des forces qui agissent sur lui de l'extérieur a une résultante nulle : une brique posée sur une table est immobile parce qu'elle est soumise (comme on dit !) à son poids (force à distance d'attraction par la Terre) et à la résistance que le support exerce sur elle (force de contact d'origine moléculaire) et que ces deux forces s'annulent (il suffit d'avoir essayé d'enseigner la mécanique newtonienne à de jeunes esprits pour savoir que ce n'est nullement là une idée intuitive, naturelle). Pour Leibniz, une brique sur une table est une force, force contenue, impatiente, qui n'attend que la suppression de l'obstacle pour agir ; la table n'agit pas sur la brique (« La matière ne voltige pas hors des substances »), non plus que la Terre d'ailleurs ; la brique, la Terre et la table font partie d'un tout coordonné par le principe d'harmonie en vertu duquel un état donné ne résulte pas d'une annulation des forces, mais, au contraire serait-on tenté de dire, de ce que le pouvoir d'agir des forces s'actualise toujours au maximum. Il suffit d'enlever la table pour que le pouvoir d'agir de la brique s'actualise.

Il serait faux de croire que la mécanique s'est, au cours de l'histoire, développée indépendamment du mode de pensée leibnizien. En effet, comme le problème que soulève Leibniz et que la tradition newtonienne bien pensante a tenté de glisser sous le tapis est bien réel, ce problème ne pouvait manquer de resurgir, sous des formes acceptables pour la tradition newtonienne, tout au long de l'histoire de la physique mathématique. Au point même que le mot virtuel n'a jamais cessé de faire partie du vocabulaire de la physique, mais sur le mode mineur : principes des vitesses ou des travaux virtuels, image virtuelle, processus virtuels, particules virtuelles. Le mot est donc bien là, mais à

chaque fois à titre d'adjectif, comme s'il convenait d'affirmer que le virtuel n'existe pas, adjectif qui n'acquiert même pas une cohérence d'ensemble puisqu'il s'applique à des objets totalement différents et souvent pour désigner des qualités différentes : ainsi une image virtuelle n'a-t-elle rien de virtuel, au sens de possibilité d'une réalisation. Là encore il suffit d'avoir vu des étudiants essayer de recueillir une image virtuelle sur une feuille de papier blanc pour savoir qu'une image virtuelle n'a aucune chance de s'actualiser sous forme d'éclairement, que ce qui l'empêche de devenir une image réelle n'a rien à voir avec une quelconque contrainte.

C'est précisément par la question du relâchement des contraintes que le mot virtuel est entré dans le vocabulaire de la physique mathématique, introduisant comme une touche leibnizienne au sein de la mécanique classique. Le principe des vitesses virtuelles, ou des travaux virtuels, énoncé et mis en œuvre par Lagrange et d'Alembert, part d'une réflexion sur le statut de la force dans le cas d'un système matériel en équilibre. Lagrange remarque que « Dans l'état d'équilibre, la force n'a pas d'effet actuel : elle ne produit qu'une simple tendance au mouvement ; mais on doit toujours la mesurer par l'effet qu'elle produirait si elle n'était pas arrêtée » (*Mécanique Analytique*). Ce conditionnel laisse ouvertes toutes les possibilités, toutes les potentialités. C'est en effet en imaginant quel serait l'effet d'une force extérieure si elle n'était pas entravée que le principe des travaux virtuels permet de connaître la force, laquelle est toujours là, même si elle ne produit aucun déplacement, ne demandant qu'à s'actualiser si on lui en laisse la possibilité, même en imagination. Le théorème s'énonce alors : pour qu'un ensemble de forces appliquées tiennent un système matériel en équilibre, il faut et il suffit que tout déplacement virtuel infiniment petit imposé au système fasse prendre la valeur zéro à la somme des travaux virtuels des forces. La force est donc connue par ses effets virtuels dans diverses directions imaginées. Ou encore, comme se plaît à le formuler G.-G. Granger « Ce qui n'a pas lieu explique ce qui a lieu » (*Le probable, le possible et le virtuel*). Belle formule qui ne rend pourtant pas complètement justice à la virtualité, car le virtuel ne se réduit pas à ce qui n'a pas lieu (pas plus que le réel ne se réduit à ce qui a lieu), alors même que G.-G. Granger prend soin de définir le virtuel comme le non-actuel par opposition au possible qui, lui, s'oppose tout simplement à l'actuel.

Quoi qu'il en soit, le point important ici est que la force apparaît comme une puissance d'agir, « le milieu entre la faculté d'agir et l'action même », tout aussi bien caractérisée par ses virtualités que par ses effets réalisés. À l'image d'une force imposée de l'extérieur par un corps à un autre corps qui la subit passivement se mêle celle d'une force contenue, prête à surgir dès lors qu'on lui en laisse la possibilité. On retrouvera cette même idée du caractère double de ce qu'on n'appellera déjà plus une force mais une interaction, à la fois « action et passion », dans les concepts de

processus virtuels et de particules virtuelles développés entre 1925 et 1945.

En physique classique (on entendra par là la physique pré-quantique, jusqu'en 1927), la force à distance, force qu'exerce un corps sur un autre corps qui n'est pas en contact matériel avec lui – et dont le prototype est la force de gravitation appelée attraction universelle par Newton –, avait été rendue plus compréhensible, plus acceptable, par l'introduction du concept de champ : un corps émet un champ (c'est-à-dire une certaine énergie) là où il se trouve ; ce champ et l'énergie qui lui est associée se propagent dans l'espace jusqu'à atteindre un autre corps situé ailleurs ; celui-ci « reçoit » le champ (comme un télégraphiste reçoit un message), c'est-à-dire absorbe une certaine énergie – ce qui a pour effet de le mettre en mouvement, dans la direction stipulée par l'image de la force à distance (car le champ est porteur non seulement d'énergie mais aussi de quantité de mouvement). Lorsqu'au début du siècle on prit peu à peu conscience du fait que les concepts de la physique classique – et au premier chef ceux de particule et de champ – n'étaient plus opérants dans l'infiniment petit (au niveau des atomes), l'image élaborée par le XIX^e s. dut être adaptée à cette découverte. C'est alors que le virtuel revint au galop, tout d'abord sous la forme vulgaire de quelque chose qui n'a pas d'existence matérielle et dont l'existence est impossible (comme c'est le cas pour une image virtuelle), puis ensuite sous la forme noble de quelque chose qui a tout autant de réalité que le prétendu réel, même si on ne peut pas l'appréhender, s'en saisir pour l'enfermer.

La première réapparition du mot virtuel date de 1924. Dans un article, célèbre dans l'histoire des sciences mais que le physicien pratiquant aura tendance à considérer comme du « laïus » dans la mesure où il ne contient que du texte et aucune équation, Bohr, accompagné de deux autres physiciens de moindre renom, Kramers et Slater, imagina de rendre compte de l'interaction entre matière et rayonnement, là où le champ classiquement est supposé être créé ou absorbé, à l'aide d'un « champ virtuel », sans énergie (ce qui du point de vue classique est une hérésie) mais capable de produire statistiquement le passage d'un niveau d'énergie atomique à un autre. L'idée fut vigoureusement combattue par Einstein (entre autres), qui refusa (avec raison, comme l'a montré la suite) d'abandonner l'idée de conservation de l'énergie violée par le champ virtuel de Bohr. La tentative avortée de Bohr eut pour effet de lui faire prendre conscience de façon décisive de la nécessité d'abandonner les concepts de la physique classique ; de là est née la mécanique quantique, qui, ayant effacé la distinction entre champs et particules, traite d'objets qui ne sont ni des champs ni des particules mais des objets propres au domaine quantique.

Cet abandon de la distinction entre champs et particules, remplacés par un concept unique, obligea à revoir l'image de l'interaction à distance considérée comme la création par une particule d'un champ qui est

ensuite absorbé par une autre particule. L'image moderne, quantique, de l'interaction est celle d'un échange de « particules » (les guillemets sont là pour indiquer qu'il ne s'agit pas des particules de la physique classique mais de ce que l'on peut appeler des quantons) d'une particule à l'autre. Encore faut-il prendre garde de ne pas considérer ces dernières comme des particules classiques ; ce sont elles aussi des quantons. Si bien qu'à première vue il n'y a guère de différence entre les quantons échangés (on dit encore intermédiaires ou vecteurs de l'interaction) et les quantons entre lesquels s'effectue cet échange. Il existe pourtant une différence ; c'est que la création (et l'absorption) d'une particule intermédiaire est un processus qui viole la conservation de l'énergie (la particule émettrice ne peut se désintégrer en elle-même et une autre). C'est en ce sens qu'on qualifie les particules échangées de virtuelles. Mais en réalité, du fait des corrélations établies par les inégalités de Heisenberg entre le spectre en énergie d'un processus et sa durée, ces particules n'ont qu'une existence temporaire : les inégalités de Heisenberg autorisent en effet une violation de la conservation de l'énergie si celle-ci est limitée dans le temps. En ce sens les particules échangées « virtuelles » ne le sont ni plus ni moins que les particules entre lesquelles s'exerce l'interaction qui ne sont elles-mêmes pas éternelles, même si leur durée de vie est immense au regard de celle des particules virtuelles.

Il va de soi que la particule virtuelle, vecteur de l'interaction électromagnétique, est le photon. Il est facile de voir à partir des inégalités de Heisenberg que sa masse nulle lui assure une durée de vie infinie – contrairement à toutes les autres particules intermédiaires qui en ce sens sont plus virtuelles que les photons. Qu'elles soient virtuelles ne signifie pas qu'elles ne peuvent être détectées. C'est ainsi que le méson π , postulé en 1935 par le physicien japonais Yukawa pour expliquer la faible portée des interactions nucléaires, et dont il avait même prévu la masse, fut « réellement » découvert en 1947 au cours d'expériences de collisions effectuées auprès des accélérateurs de particules. Il ne faudrait surtout pas en conclure que le méson π est de la sorte devenu réel, sous prétexte qu'il a été attrapé entre les fils d'un détecteur. Sa « réalité » est tout aussi effective, sinon plus, dans les processus virtuels auxquels il participe et qui sont responsables de l'existence du noyau des atomes.

► BOHR N., KRAMERS H.A. & SLATER J.C., « The quantum theory of radiation », *Philosophical Magazine*, 47, 1924, 785-802, repris dans *Collected works-Gesammelte Werke*, éd. L. Rosenfeld, J. Rud Nielsen, E. Rüdinger & F. Aaserud, Amsterdam, North-Holland, et New York, American Elsevier, vol. 5, 199. – CHATELET G., *Les enjeux du mobile. Mathématique, physique, philosophie*, Paris, Des travaux/Le Seuil, 1993. – COHEN-TANNOUDJI G. dir., *Virtuel et réalité dans les sciences*, Paris, Diderot Éditeur, 1997. – DUHEM P., *La théorie physique. Son objet, sa structure* (Paris, 1906), rééd., Paris, Vrin, 1981 ; *Szwejn ta fainomena, Essai sur la théorie physique, de Platon à Galilée*, rééd., Paris, Vrin, 1990.

– GOLDSTEIN H., *Classical Mechanics*, Reading (Mass.), Addison-Wesley, 2^e éd., 1980. – GRANGER G.-G., *Le probable, le possible et le virtuel*, Paris, Odile Jacob, 1995. – LAGRANGE J.L., *Mécanique Analytique* (1788), rééd., Paris, Blanchard, 1965. – LEIBNIZ G.W., *Die philosophischen Schriften*, Gerhardt, t. IV, p. 464 ; *Opusculs philosophiques choisis*, Paris, Boivin, 1954. – THOM R., *Esquisse d'une sémio-physique, Physique aristotélicienne et théorie des catastrophes*, Paris, InterÉditions, 1988.

Françoise BALIBAR

→ Champ ; Constantes physiques ; Controverse Bohr-Einstein ; Duhem ; Énergie ; Force ; Quantique.

VIRUS

Virus est un mot latin qui signifie « poison ». La première mention du terme dans son sens biologique moderne remonte à la fin du XIX^e s. Le virus est alors caractérisé par sa capacité à passer même à travers un filtre aux mailles très fines (quelques dixièmes de micron) qui retiennent les bactéries. Pour cette raison, les virus sont parfois nommés « agents ultrafiltrables » (Pasteur parlait d'« infrabactérie » au sujet de l'agent responsable de la rage).

C'est d'abord l'agent d'une maladie des plants de tabac, la mosaïque du tabac, qui fut identifié comme « virus ». L'agent responsable de la maladie passait à travers les filtres ultrafines, cependant il demeurait invisible au microscope optique, et surtout, il ne donnait lieu à aucune croissance propre se distinguant par là des bactéries. Toutefois, l'agent en question ne s'apparentait pas non plus à ce qui était alors connu sous le nom de « toxine » (le terme avait le sens général de produit toxique) puisqu'il s'avérait capable de se multiplier dans la plante qu'il infectait comme le montrait le fait que des inoculations en série (une première plante inoculée à partir d'un isolat, puis une seconde à partir d'un isolat réalisé à partir de cette plante, etc.) conservaient le caractère toxique de l'agent initialement isolé.

Les virus occupent ainsi une place particulière dans le monde vivant : ni plante, ni animal, ni bactérie, ni cellule eucaryote, ils sont généralement considérés dans une catégorie propre et séparée : ils ne disposent pas d'une autonomie de réplication. Ils sont des parasites essentiels : ils dépendent des cellules qu'ils infectent pour toutes les fonctions biochimiques nécessaires à leur réplication (synthèse protéique et réplication du matériel génétique).

Les virus sont constitués de protéines et d'un acide nucléique conservant l'information génétique du virus (gènes codant pour les protéines proprement virales) qui est soit de l'ADN soit de l'ARN, soit linéaire soit circulaire (la molécule d'acide nucléique est alors fermée sur elle-même), soit simple brin soit double brin (les acides nucléiques ont la propriété de pouvoir s'apparier lorsqu'ils sont complémentaires : ils se présentent alors en double brin comme dans la double hélice d'ADN ; lorsqu'une chaîne d'ADN ou d'ARN n'est pas appariée à

une chaîne complémentaire, elle est dite « simple brin »). Certains virus disposent d'un ADN double brin circulaire (comme les papovirus), d'autres d'un ADN double brin linéaire (comme les adénovirus), d'autres encore d'un ARN double brin (comme les réovirus), ou bien d'un ADN simple brin (comme dans de nombreux phages, nom donné aux virus bactériens) ou d'un ADN simple brin linéaire (comme les parvovirus) ou d'un ARN simple brin (comme les picornavirus ou les rhabdovirus). À chaque fois, le virus dispose de l'équipement enzymatique qui permet la réplication de la forme particulière d'acide nucléique dont il est doté et qui vient en complément des éléments qu'il emprunte à la cellule pour cette opération. Les rétrovirus par exemple, dont le matériel génétique est constitué d'ARN, disposent d'une enzyme qui convertit cet ARN en ADN et d'une enzyme permettant l'intégration d'un fragment d'ADN dans la cellule infectée, le reste des opérations nécessaires à la réplication complète (en particulier, la conversion de l'ADN en ARN redonnant le génome viral sous la forme qui est la sienne dans la particule virale) étant assuré par les enzymes cellulaires.

Il existe ainsi plusieurs types de virus, de taille, de structure, de composition variées. Chaque type de virus a en outre un mode de réplication propre dans la cellule. Si le principe de cette réplication est toujours d'utiliser la machinerie cellulaire aux fins de reproduire sa propre structure, les modalités de cette opération varient d'un type de virus à l'autre.

► BURNET F.M. & STANLEY W.M., *The viruses (biochemical, biological and biophysical properties)*, New York, Academic Press, 1959 (3 vol. : I, *General Virology* ; II, *Plant Virology* ; III, *Animal Viruses*). – CHASTEL C., *Histoire des virus, de la variole au SIDA*, Paris, Boubée, 1992. – FLEURY H.J.A., *Virologie humaine*, Paris/Milan/Barcelone, Masson, 1992. – GIRARD M. & HIRTH L., *Virologie générale et moléculaire*, Paris, Doin, 1980. – LÉPINE P., *Les virus*, Paris, PUF, 1984. – TERZIAN H., *Les virus, de la structure aux pathologies*, Paris, Diderot éditeur « Art et sciences », 1998.

Pascal NOUVEL

→ ADN ; Bactériophage ; Immunologie ; Micro-organisme ; Rétrovirus ; Sida.

VISION

Voir, dans la Grèce archaïque, c'était appartenir au monde clair des vivants, et la cécité donnait aux grands visionnaires, poètes comme Homère ou devins comme Tirésias, l'accès à un ailleurs parfois terrifiant. C'est sans doute que voir est aussi immédiat que vivre, et une expérience aussi incommunicable. On doit abstraire pour expliquer la vision, mais sa richesse concrète risque toujours d'être appauvrie et réduite à ce qu'on sait ou croit savoir de la nature, et des causes ou des conditions de la perception. Ce besoin et ce refus de l'abstraction sont repérables à travers les problématiques et les antagonismes qui ont caractérisé les

grandes étapes successives de l'analyse, qu'il s'agisse des théories antiques et de la vieille optique du rayon visuel, de l'optique du rayon lumineux et des controverses de l'âge classique, ou de la tension moderne entre recherches psycho-physiologiques et interprétations philosophiques.

Les théories antiques et la géométrie du regard

Les théories antiques de la vision. — Comme tout phénomène concernant la nature, la vision chez les Grecs relevait d'une explication philosophique. Avec bien des variantes, on peut relever trois types de théorie. Un premier groupe faisait provenir quelque chose de l'objet jusqu'à l'œil ; pour Démocrite (v^e s. av. J.-C.), il s'agissait d'une pression s'exerçant par l'entremise de l'air, comme l'atteste l'image qui s'imprime sur la pupille ; plus tard, Épicure (iii^e s. av. J.-C.) expliquera la vision par la réception dans l'œil de simulacres, fines enveloppes d'atomes se détachant de l'objet et convoyant sa forme dans toutes les directions. Un second groupe estimait au contraire qu'un flux visuel jaillissait de la pupille pour aller au contact de l'objet ; Empédocle (v^e s. av. J.-C.) comparait l'œil à une lampe dont sourd la lumière ; une solution mixte fut adoptée par Platon, pour qui le feu du flux visuel, entretenu par la clarté du jour, se mêle aux émanations provenant de l'objet pour provoquer la sensation ; plus tard, les stoïciens, que suivra le médecin Galien (ii^e s.), adopteront également l'idée d'un flux visuel chaud (*pneuma*) entretenu par la chaleur de l'air ambiant. Enfin, c'est sur la transparence des milieux intermédiaires (eau ou air) qu'insistait Aristote (iv^e s. av. J.-C.) : sous l'effet d'un feu comme celui du soleil, celle-ci passe à l'acte, alors que dans les ténèbres elle existe seulement en puissance. Aucune de ces idées ne s'imposa jamais exclusivement : au iii^e s. de notre ère, Plotin pouvait encore adopter une interprétation magique, où l'action à distance impliquée par la vue était attribuée à la sympathie entre les différentes parties de ce grand vivant qu'est le monde.

Quelle que soit la théorie adoptée, elle relevait donc d'une conception philosophique d'ensemble, où intervenaient les éléments reconnus comme fondamentaux dans la physique du système concerné — le plus souvent l'eau, l'air ou le feu (la terre étant exclue à cause de son opacité), ou encore les atomes dans le cas des épicuriens. On estimait avoir rendu compte de la sensation quand on avait pu, en privilégiant certaines données usuelles d'observation (image reflétée par la prunelle, transparence du milieu intermédiaire, clarté d'un astre ou d'un feu, saisie d'une forme globale, etc.), établir une connexion entre le sens (la vue) et le sensible (le visible). La lumière n'était pas comme pour nous la cause, ni encore moins le stimulus de la sensation, mais seulement une de ses conditions, au même titre que le bon état de l'œil et du nerf. En fait, le visible et la vue étaient pensés solidement dans une indistinction dont on ne se rendait pas compte. Aristote, suivi par la plupart de ses successeurs, distinguait entre les

sensibles propres, comme le son pour l'ouïe, le lisse et le rugueux pour le toucher, et les sensibles communs accessibles à plusieurs sens, comme la direction, la forme ou la distance. Le sensible propre de la vue était pour lui la couleur ; on y adjoignit plus tard la luminosité à cause de la sensation d'éblouissement. Le cercle était là : la vue est ce qui donne à voir le visible, et le visible est ce qui se donne à la vue. Ils se pensaient l'un par l'autre ; cela se vérifie même des épicuriens, pour qui l'âme sentante était, comme les simulacres, composée d'atomes.

Le rayon visuel et la géométrie du regard. — De toutes les théories antiques, une seule se prêtait à une interprétation géométrique, celle de l'émission d'un flux de rayons à partir de l'œil. Ce flux (quelle qu'en soit la nature) forme un cône, dont le sommet est au milieu du globe oculaire, et la génératrice s'appuie sur la circonférence de la pupille ; ce cône se prolonge tant qu'il ne rencontre pas d'obstacle. Chacun des rayons qui le composent (réellement pour Euclide, abstraitement pour Ptolémée) se propage en ligne droite jusqu'à ce qu'il entre en contact avec un point de l'objet et le donne à voir. Ainsi, à un élément et un seul du regard, le rayon visuel, répond un élément et un seul de l'objet, le point sur lequel il tombe. C'est assez pour qu'Euclide, dont nous possédons une *Optique*, et une *Catoptrique* d'attribution discutée, analyse géométriquement la vision. La situation d'un point est normalement donnée par la direction initiale du rayon correspondant ; la grandeur de l'objet, par l'angle sous lequel on le voit ; son éloignement, par la diminution de cet angle ; sa forme, par sa silhouette dans le cône visuel ; son mouvement, par la variation des points sur lesquels tombe un même rayon visuel... Avec ce vocabulaire, il est possible de rendre compte de phénomènes comme les déformations perspectives, et d'entamer l'étude de la réflexion et de la réfraction des rayons visuels.

Quatre à cinq siècles plus tard, Ptolémée donne de la vision une description beaucoup plus complète, dans une *Optique* qui ne nous est parvenue qu'en latin, à partir d'une version arabe déjà mutilée. Il y inclut les sensations de couleur et de lumière, la considération des maxima et des minima sensibles, l'étude expérimentale de la vision binoculaire, et le respect du principe de constance. Chez Euclide, rien ne permettait pour une chose qu'on voit sous un angle de plus en plus petit de dire si elle s'éloigne ou si elle rapetisse ; Ptolémée remédie à cette absence de constance en supposant que la longueur de nos rayons visuels nous est connue, pourvu qu'elle ne soit ni trop grande ni trop petite. Dès lors, la vue devient un calcul inconscient et immédiat : nous estimons les formes et les reliefs à partir de la distance de chacun des points de l'objet. De plus, pour les mouvements, quand nous les suivons du regard, il faut adjoindre aux calculs du sens visuel les données du sens tactile qui nous rend conscients de la rotation de nos yeux ou de notre tête ; cette collaboration de différentes facultés suppose l'intervention d'un

sens commun qui synthétise l'apport de tous les autres, puis d'un entendement qui interprète l'information obtenue. Ainsi, dès Ptolémée se met en place une théorie du jugement naturel liée à une première psychologie des facultés.

Ptolémée peut dès lors rendre compte des erreurs de la vue. Il s'agissait alors de tout ce qui empêche le flux visuel d'appréhender ce qui est vraiment, que ce soit sa faiblesse congénitale ou acquise rendant la vision floue, les limites de sa sensibilité nous trompant sur la distance et la forme des objets trop lointains, des obstacles déviant son cours comme les miroirs ou les surfaces réfléchissantes, ou enfin d'une collaboration déficiente de nos facultés nous donnant parfois une fausse impression de mouvement ou, comme les peintres et leur perspective chromatique, de relief. Ptolémée range donc dans la même catégorie d'erreur ce qui résulte pour nous de défauts anatomiques de l'œil (myopie ou presbytie), de seuils physiologiques de perception, de la réflexion ou de la réfraction de la lumière, ou d'illusions d'optique proprement psychologiques. Sa focalisation sur le flux visuel qui nous est extérieur le dispense d'examiner ce qui se passe à l'intérieur de notre corps. Les médecins anciens pratiquaient pourtant une ophtalmologie active et connaissaient bien l'anatomie des globes oculaires et des nerfs optiques ; Galien put conclure de cette dernière contre Aristote que le siège de la sensation et de la pensée est l'encéphale et non le cœur. Mais pour les galénistes comme pour Ptolémée, la vision restait un sens externe et à distance, conception qui fut reprise par les Arabes jusqu'à al-Kindi (ix^e s.).

L'optique de la lumière et le sujet voyant

La réception de la lumière et l'inversion du cône visuel. — Une étape essentielle fut franchie par Ibn al-Haytham (965 ?-1039 ?), connu dans l'Occident latin sous le nom d'Alhazen, où son *Traité d'Optique* fut traduit à la fin du xii^e ou au début du xiii^e s. Il s'agit d'une œuvre capitale, où pour la première fois fut amorcée une physique de la lumière, et où la vision était expliquée par l'entrée dans l'œil de rayons lumineux. Après une étude expérimentale de la propagation rectiligne de la lumière (non traduite dans la version latine), menée de manière méthodique en chambre noire, Ibn al-Haytham justifie l'idée de l'intromission par la douleur qu'une lumière intense produit dans l'œil ; en ce dernier, il n'y a donc pas émission, mais réception. Du coup s'abolit le cercle antique de la vue et du visible ; on se trouve dans un système à trois termes, source lumineuse, objet, organe sentant. Chaque point-source jette ses rayons en sphère dans toutes les directions ; tout objet opaque les renvoie, soit de manière ordonnée s'il est lisse (cas du miroir), soit à nouveau dans les directions qui lui font face s'il est rugueux (cas général) ; ces rayons pénètrent dans l'œil par la pupille et produisent sur le cristallin, tenu pour l'organe sensoriel, une sensation de luminosité et de couleur, la

lumière ayant convoyé la couleur des objets jusqu'à l'œil.

Ce schéma oblige à résoudre une difficulté. Il entre par la pupille une infinité de rayons, sous toutes les incidences : en un même point sensible du cristallin parviennent donc les rayons d'une multitude de points-objets, ce qui devrait rendre la vision irrémédiablement floue. Ibn al-Haytham suppose alors que seuls sont perçus les rayons arrivant perpendiculairement à la cornée et à la face antérieure du cristallin, supposées concentriques : c'est conserver le vieux cône visuel en en inversant simplement le sens ; à un point de l'objet répond sur le cristallin un point sensible et un seul. Une optique géométrique redevient possible. Il se projette sur le cristallin une « forme », quasi-image sensorielle qui reproduit l'ordre des points de l'objet. Cette quasi-image poursuit son chemin après réfraction sur la face postérieure du cristallin, et s'engouffre en restant droite dans le nerf optique, supposé creux et dans l'axe de l'œil. De là elle passe dans le chiasma, où elle fusionne avec celle de l'autre œil, et se présente dans l'encéphale devant une faculté suprême qui l'interprète. Au livre VII, Ibn al-Haytham établira expérimentalement que des rayons réfractés concourent aussi à la vision ; mais il n'en modifiera pas pour autant sa conception d'ensemble. Pour la première fois le traitement géométrique de la vision prend en compte ce qui se passe à l'intérieur du corps, en synthétisant très consciemment les connaissances des physiciens, des médecins et des mathématiciens.

Un second problème inédit se pose. Si l'organe sensoriel est le cristallin, nous devrions sentir les objets en nous, à l'intérieur de l'œil. Or, il n'en est rien. La vision ne se réduit donc pas à la sensation pure, il faut qu'intervienne aussi le jugement. De là une conception très largement intellectualiste de la perception. Nous concluons que l'objet est hors de nous parce que, quand nous fermons les yeux, nous cessons de le voir. Et puisqu'il faut bien désormais se passer de la longueur des rayons visuels, nous estimons sa distance de proche en proche, par plans successifs ; ou s'il nous est connu, par sa grandeur apparente. La reconnaissance de l'objet joue donc un très grand rôle, ce qui est nouveau, et explique que le jeune enfant ait à apprendre à voir. Il faut aussi distinguer les manières dont on regarde, distraitement, attentivement, ou en scrutant : un coup d'œil trop bref peut nous induire à de fausses reconnaissances ou à de mauvais raisonnements. Enfin, les visées (*intentiones*) sur le visible se multiplient ; à la lumière, la couleur, la position, la forme, la grandeur et le mouvement de l'optique antique s'en ajoutent une quinzaine d'autres, dont le nombre, la continuité, le lisse ou le rugueux, la beauté ou la laideur. La lumière nous fait connaître non les choses, mais des indices les concernant : de là la possibilité de saisir par la vue et ses déductions implicites un sensible propre au toucher comme le lisse et le rugueux. Ibn al-Haytham sera connu en Occident non seulement par la traduction de son traité, mais par les travaux qu'il inspira à Roger Bacon, John Pecham et surtout Vitellion (fin du xiii^e s.).

Toutefois, s'il devint une autorité sous le nom d'Alhazen, on ne pratiqua pas la méthode expérimentale qui lui avait permis d'établir ses résultats. Une optique du rayon visuel, autorisée elle aussi par Euclide et Ptolémée, resta donc en concurrence avec la sienne, mais on cessa d'admettre une sensibilité des rayons à leur propre longueur.

De l'image rétinienne au rapport de l'âme et du corps. — La naissance d'une perspective picturale douée d'une cohérence systématique, que ne respectaient pas les perspectives chromatiques ou angulaires de l'Antiquité, modifia à partir du XV^e s. la conception de la vision et de sa valeur de vérité. L'évaluation des distances et des grandeurs reposait depuis Alhazen sur l'interprétation d'indices ; ces indices devinrent désormais pour l'essentiel des rapports géométriques, et la perspective linéaire inventée au Quattrocento fut tenue moins pour un système de représentation que pour le fondement naturel de toute vision. Elle donna une conscience aiguë de la variabilité réglée du visible selon la position de l'observateur. Les astronomes du XVI^e s. spéculèrent sur elle, que ce soit Copernic et le rôle essentiel attribué dans son système à la relativité optique du mouvement, ou Tycho Brahé et sa recherche méthodique des parallaxes, ainsi que sa prise en compte de la réfraction atmosphérique. La mesure des éclipses conduisit en outre à un regain d'intérêt théorique pour la chambre noire, qui donnait des résultats discordants avec ceux de l'observation directe. La révolution astronomique appelait un renouveau de l'optique.

Kepler s'en chargea dans ses *Paralipomènes à Vitellion, ou partie optique de l'astronomie* (1604). Il fit la théorie de la chambre noire et des images qu'on y recueille, expliqua la distorsion rencontrée, et montra qu'on obtient une image beaucoup plus nette en plaçant devant l'étroite ouverture, servant de diaphragme pour obtenir de faibles incidences, un dioptre sphérique faisant converger les rayons lumineux vers des foyers quasi ponctuels. Du coup il disposait d'un modèle pour l'œil, assimilé à une chambre noire dont l'iris serait le diaphragme, le cristallin le dioptre convergent, et la rétine, l'écran où se forme une image réelle inversée. Il en conclut que la rétine est le véritable récepteur sensoriel. L'œil tout entier, jusqu'à son fond, devenait un système optique régi par les seules lois physiques de la propagation de la lumière. Kepler put dès lors expliquer l'effet des verres correcteurs de la presbytie et de la myopie, incompris malgré trois siècles d'utilisation : ils ont pour fonction de diminuer ou d'augmenter le pouvoir de convergence du système oculaire, de manière à obtenir sur la rétine une image parfaitement stigmatique — idée tout à fait nouvelle. Et dans la foulée, quand en 1610 Galilée lui fit parvenir quelques semaines pour examen de lunettes qu'il venait de fabriquer, Kepler put donner la théorie de son pouvoir agrandissant et jeter les bases de l'optique instrumentale (*Dioptrique*, 1611). Ces découvertes capitales ruinaient la conception traditionnelle de la vision.

La lunette dévoilait un univers de visibilité radicalement différent de ce qu'on voit à l'œil nu. Et si l'image rétinienne, bientôt observée en chambre noire par Scheiner (1625), donnait raison définitivement aux tenants de la réception dans l'œil de rayons lumineux, elle soulevait un redoutable problème posé d'emblée par Kepler : image visible, lumineuse et colorée, se formant autour du débouché du nerf optique, comment pouvait-elle s'y engouffrer, et cheminer intacte jusqu'à l'encéphale par les détours obscurs du nerf et du chiasma ? La réception mentale ne pouvait plus être pensée comme un doublet de la réception optique.

Il appartient à Descartes, dans sa *Dioptrique* (1637), de trancher le nœud gordien : voir ne consiste pas pour l'âme à recevoir une image ou une « forme » semblable à l'objet externe. La vision comporte trois phases distinctes, l'une lumineuse jusqu'à la rétine, l'autre nerveuse jusqu'au cerveau, et la dernière proprement mentale, la seule consciente ; pour donner à voir, il suffit que le nerf transmette à l'âme des signes lui permettant de distinguer les unes des autres les propriétés du monde extérieur. Car la fonction des sens n'est pas de nous faire connaître l'essence des choses, mais d'avertir notre âme de ce qui peut préserver ou menacer notre intégrité physique. Les différentes impressions de couleur, par exemple, sont autant de signes des diverses manières dont la lumière agit mécaniquement sur le nerf, sans qu'on ait à supposer que les couleurs existent hors de nous telles que nous les sentons. Le fossé ira se creusant entre le phénomène physique qui excite le nerf optique et l'impression qu'il induit. En 1664, Newton décomposera à l'aide d'un prisme la lumière blanche en plusieurs rayonnements colorés, et montrera ensuite que chacun est réfrangible à un degré différent des autres (*Philosophical Transactions*, 1672-1676). De propriété des choses, la couleur devenait réaction psychique à la lumière, et paradoxalement aux rayonnements que les choses n'absorbent pas. Entre le sujet voyant et le monde visible s'intercale désormais l'espace obscur de son corps.

Une première question se pose, celle des rapports de l'âme et du corps. Du côté des cartésiens, ce fut la conception qu'avait Descartes de leur union qui fut critiquée. Comment deux substances, l'une étendue et qui ne pense pas (le corps), l'autre inténdue et qui pense (l'âme), pourraient-elles ne faire qu'un (le sujet psychophysique) et interagir l'une sur l'autre ? Pour échapper à la difficulté, Spinoza développa sa théorie d'un parallélisme psychophysique, Leibniz celle d'une harmonie préétablie dès la Création, Malebranche sa conception de la vision en Dieu, avec qui notre âme serait substantiellement unie, alors qu'elle ne peut être directement affectée par les corps. Du côté des empiristes, la critique fut plus radicale encore. Locke, au nom de la seule expérience qui nous soit accessible, celle de nos sensations immédiates (idées simples) et de nos opérations sur elles (idées de réflexion), insista sur notre ignorance de ce que sont réellement les corps et l'âme : la notion de substance n'est qu'un nom sous lequel nous unifions pour les corps les sensations du

divers externe, et pour l'âme celles du divers interne. On comprend qu'à partir de pré-supposés différents de ceux de Malebranche les signes visuels aient pu pour un Berkeley aussi provenir directement de Dieu, et le conduire à l'immatérialisme. Le sujet voyant se fait lourd de toutes les controverses doctrinales de la métaphysique classique.

Le sujet voyant et son étude

Le développement d'une neuro-physiologie de la vision. — La critique empiriste de l'idée de substance avait pour fondement le refus de l'innéisme cartésien, présupposant l'existence en tout être rationnel de semences de vérité : toutes nos connaissances, y compris les fondements de la logique et de la géométrie, étaient au contraire censées provenir de nos sens et de nos habitudes acquises. Cela impliquait que l'espace perspectif qui confère aux objets leur forme et leur position fût le résultat d'un apprentissage. La question fut posée concrètement par Molyneux en 1686 : si un aveugle-né recouvrait la vue, serait-il capable de distinguer d'emblée, rien qu'à les voir, une sphère d'un cube de même matière et de même grosseur, ce qu'il sait fort bien faire par le toucher ? Le problème, repris par Locke en 1687 dans son *Essai philosophique concernant l'entendement humain*, devait nourrir les discussions sur la vision jusqu'à la fin du XVIII^e s. Molyneux, Locke, Berkeley, Voltaire répondirent par la négative, mais Leibniz (innéiste), Condillac ou Diderot (sensualistes) par l'affirmative. Un chirurgien, Cheselden, avait pourtant pratiqué dès 1728 l'abaissement des cataractes d'un aveugle-né de quatorze ans, dont les réactions donnaient plutôt raison aux premiers ; mais les conditions d'une réponse probante n'étaient pas claires. Les enjeux étaient multiples. Les signes donnés par la vue sont-ils homologues à ceux fournis par le toucher, et peut-on abstraire des uns ce qu'on abstrait des autres ? De tous nos sens, quel est le sens primordial, la vue, sens de la distance et de la simultanéité, ou le toucher, sens de la réalité du contact et de la successivité ? Ou encore (argument innéiste retenu par Kant), s'il n'y a qu'une seule géométrie, n'y a-t-il pas qu'une seule forme d'appréhension de l'espace, accessible indifféremment à plusieurs contenus sensibles ? En fait l'aveugle-né, tel l'Adam primitif ou la statue de Condillac, n'était qu'une des variantes de l'incarnation d'une âme conçue comme une tablette vierge, et l'expérience tenait encore de l'expérience de pensée.

Au XIX^e s., on allait passer à l'expérimentation véritable. L'analyse de la vision fut dominée par la naissance et les progrès spectaculaires de la psychophysologie, dont nous ne pouvons noter ici que quelques dates repères. Des astronomes avaient déjà ouvert la voie à la quantification, en notant la plus petite différence lumineuse perceptible (Bouguer, 1760) ou en différenciant les temps de réaction (Bessel, 1820). Mais bientôt on sut mesurer les excitations grâce à une instrumentation spé-

cifique. Weber fit de premières expériences sur le rapport entre excitations et sensations tactiles, acoustiques et visuelles, et énonça en 1829 une loi, à laquelle Fechner donna la forme selon laquelle la sensation croît comme le logarithme de l'excitation (*Éléments de Psychophysik*, 1860). Il s'ensuivit une longue polémique sur l'homogénéité et la mesurabilité des sensations, à laquelle Bergson consacra son *Essai sur les données immédiates de la conscience* (1889). Parallèlement, Johannes Müller énonçait à propos de la vue sa loi de l'énergie spécifique des nerfs (*Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes des Menschen und der Thiere*, 1826), en pratiquant déjà la physiologie comparée. Dès lors l'analyse des récepteurs sensoriels devait se faire de plus en plus fine. Après avoir mesuré la vitesse de l'influx nerveux (1850), Helmholtz expliqua la sensation colorée en redécouvrant et développant les théories de Thomas Young supposant trois couleurs fondamentales, le rouge, le vert et le violet, et en leur faisant correspondre trois sortes de terminaisons nerveuses (*Handbuch der physiologischen Optik*, 1856-1866). Le visible n'était donc qu'un décryptage du donné externe dépendant de la nature de l'organisme voyant, idée qui ne fut pas sans influence sur Ernst Mach et son empirio-criticisme.

Les progrès conjugués de l'anatomie pathologique, de la vivisection animale et des techniques expérimentales (dont celle de l'excitation électrique du cortex) conduisirent également à une meilleure connaissance du système nerveux central et périphérique. Dès les années 1870, Ferrier découvrait le rôle du lobe occipital dans la vision et amenait Munk à localiser précisément un premier centre sensoriel. L'antique concept d'un siège de l'âme ou d'un organe du sens commun, après avoir suscité tant de conjectures sur sa localisation, se démembrait. Une fois qu'on eut isolé le neurone (Ramon y Cajal, 1888) et ses synapses (Sherrington, 1897), les découvertes du XX^e s. accentuèrent ces tendances. À partir des années 1930 s'imposa le caractère chimique de la transmission nerveuse. Le cycle de la rhodopsine, premier pigment visuel connu (1876), fut peu à peu élucidé. La rétine se révéla de plus en plus un organe complexe, où il faut distinguer entre la *fovea*, où se concentrent des cellules en cônes permettant de distinguer les couleurs et les détails des objets (vision diurne), et la périphérie, composée surtout de cellules en bâtonnets sensibles à des intensités lumineuses beaucoup plus faibles et permettant de distinguer les directions de l'espace et des mouvements. L'analyse fine des voies nerveuses à partir des années 1960 (Hubel et Wiesel) montra la sélectivité fonctionnelle des structures détectant les caractéristiques du stimulus et l'organisation du cortex visuel en réseaux de neurones extrêmement spécialisés. À la vieille réception centrale d'une forme visuelle accompagnée d'un jugement perceptif se substitua aujourd'hui le recueil d'informations de plus en plus nombreuses concernant l'image fournie par le système optique de l'œil, informations captées et combinées par un équipement

neurologique diversifié, organisé en modules et réseaux. On comprend l'importance des modèles informatiques dans les recherches contemporaines des neurosciences sur la vision (D. Marr, 1982). Mais quoique l'équipement anatomique soit préformé, il ne peut devenir pleinement fonctionnel, comme le montrent les expériences sur l'enfant ou le jeune animal, qu'au cours d'une période critique d'apprentissage postnatal.

Le retour au fait perceptif et la critique phénoménologique. — L'étude physiologique de la vision implique une attitude méthodologique dominée par l'analyse. Elle sert de modèle à Wundt, qui créa le premier laboratoire de psychologie expérimentale à Leipzig en 1879. Il y dissociait les processus conscients en éléments et tentait de déterminer les lois régissant leur mise en connexion. Il consacra environ le quart de ses travaux au domaine visuel, en y distinguant la sensation élémentaire, simple excitation de l'organe sensoriel, et la perception, prise de connaissance d'objets ou d'événements extérieurs. Il faisait appel à l'introspection de ses sujets pour interpréter les résultats obtenus, et une première critique porta sur la notion de sensation élémentaire et sur l'associationnisme qui lui est lié. Dans les années 1910-1920, Wertheimer, Koehler, Koffka fondèrent à Berlin l'école gestaltiste, revenant au concret du fait perceptif, où l'opposition de la figure et du fond s'impose de manière immédiate, et où à travers des figures très diverses ce sont régulièrement des formes prégnantes qui sont saisies. La sensation pure devenait un artefact de laboratoire, oubliant l'organisation du champ visuel qui en réalité lui préexiste. De nombreuses expériences, portant sur la reconnaissance des formes et des objets, l'apprentissage visuel, les illusions d'optique ou le comportement animal, confirmèrent la justesse de cette nouvelle approche, qui implique qu'on distingue avec soin le phénomène visuel conscient, ou induisant le comportement, des processus physiologiques de son élaboration.

Cette dissociation fut reprise et approfondie par les phénoménologues. Husserl donnait pour consigne de décrire, et non pas d'expliquer ou d'analyser : ce retour « aux choses mêmes » était dû au refus de réduire le sujet, foyer de ses propres vues sur le monde, à l'entre-croisement des causalités déterminant son corps ou son psychisme. Contre toute objectivation liée à une psychologie de laboratoire, l'Ego méditant devait revenir à l'élucidation de son expérience intime. Pour la vision, Maurice Merleau-Ponty sut donner à ce programme toute sa portée. Plus encore que la *Phénoménologie de la Perception* (1945), l'aboutissement en fut *Le Visible et l'Invisible* (1964, inachevé) : « Le monde est cela même que nous voyons (avec une invincible foi perceptive), il est en moi qui le vois comme je suis en lui (le "chiasme") », la profondeur est son épaisseur ontologique et non une troisième dimension, l'invisible — la face cachée des choses, leur sens, etc. — est

consubstantiel au visible, je suis moi-même être dimensionnel et de même chair que celle des choses et du monde (réversibilité)... » Par une série de concepts inédits, tels que foi perceptive, chiasme, chair, réversibilité, Merleau-Ponty s'efforçait de dépasser l'opposition réflexive cartésienne du sujet et de l'objet et toutes les dichotomies telles que conscience-corps qui en sont issues. Il retrouvait ainsi des accents précartésiens et même antiques, en redonnant au visible sa valeur d'être et au regard sa densité charnelle. Le fossé ainsi creusé entre une science expérimentale de la vision et une élucidation philosophique du voir est sans doute caractéristique de notre culture.

► ANDLER D. dir., *Introduction aux sciences cognitives*, Paris, Gallimard « Folio-Essais », 1992. — BERKELEY G., *Cahier de notes* (1707), *Pour une Nouvelle théorie de la vision* (1709), trad. fr. G. Brykman, *Œuvres de G. Berkeley*, Paris, PUF, 1985. — BRAZIER M.A., *A History of Neurophysiology in the 19th Century*, New York, Raven Press, 1988. — BUSER P. & IMBERT M., *Vision, Neurophysiologie fonctionnelle IV*, Paris, Hermann « Méthodes », 1986. — CANGUILHEM G., *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 3^e éd., 1975. — CONDILLAC E. BONNOT DE, *Traité des sensations* (1754), Paris, Fayard « Corpus des ph. fr. », 2 vol., 1981. — DAUMAS M. dir., *Histoire de la science*, Paris, Gallimard « Encyclopédie de la Pléiade », 1957. — DESCARTES R., *Dioptrique* (1637), *Œuvres*, t. VI, Paris, Vrin, 1965. — DIDEROT D., *Lettre sur les aveugles à l'usage de ceux qui voient* (1749), *Œuvres philosophiques*, Paris, Garnier, 1967. — EUCLIDE, *L'Optique et la Catoptrique*, trad. Ver Eecke, Bruges, Desclée de Brouwer, 1938, nouv. tirage, Paris, Blanchard, 1959. — HELMHOLTZ H. VON, *Optique physiologique* (1^{re} partie 1856 ; 2^e 1860 ; 3^e 1866), trad. fr. E. Javal & N.Th. Klein, Paris, Masson, 1867. — HUBEL D.H. & WIESEL T.N., « Receptive Fields of single Neurons in the Cat's striate Cortex », *Journal of Physiology*, 1959, n° 148, p. 574-591 ; « Receptive Fields and functional Architecture of Monkey striate Cortex », *ibid.*, 1968, n° 195, p. 215-243. — IBN AL-HAYTHAM (Alhazen), *Alhazeni Arabis libri septem*, trad. lat. in *Opticae Thesaurus*, éd. Risner, Bâle, 1572, réimpr., New York, Johnson reprint corp., 1972 ; *Ibn al-Haytham's Optik*, trad. angl. et comm. A.I. Sabra, Londres, Warburg Institute, 2 vol., 1989. — KEPLER J., *Paralipomènes à Vitellion* (1604), 5 premiers livres, trad. C. Chevalley, Paris, Vrin, 1980. — LINDBERG D.C., *Theories of Vision from al-Kindi to Kepler*, Chicago Univ. Press, 1976. — LOCKE J., *Essai philosophique concernant l'entendement humain* (1690), trad. Coste, 5^e éd., 1755, réimpr., Paris, Vrin, 1972. — MACHAMER P.K., TURNBULL R.G. et al., *Studies in Perception*, Columbus, Ohio State Univ. Press, 1978. — MALEBRANCHE N., *De la Recherche de la vérité*, Paris, Vrin, 2 vol., 1962. — MARR D., *Vision*, San Francisco, W.H. Freeman, 1982. — MERLEAU-PONTY M., *Phénoménologie de la Perception*, Paris, Gallimard, 1945 ; *Le Visible et l'Invisible*, Paris, Gallimard, 1964. — PTOLEMÉE C., *L'Optique de Claude Ptolémée dans la version latine d'après l'arabe de l'émir Eugène de Sicile*, éd., trad. et comm. A. Lejeune, Leyde, Brill, 1989. — REUCHLIN M., *Histoire de la psychologie*, 16^e éd. corr., Paris, PUF « Que sais-je ? », 1994. — SIMON G., *Le Regard, l'être et l'apparence dans l'optique de l'antiquité*, Paris, Le Seuil « Travaux », 1988. — VITELLION, *Vitellionis Thuringopoloni libri septem*, in *Opticae Thesaurus*, éd. Risner, Bâle, 1572, réimpr. New York, Johnson reprint corp., 1972.

Gérard SIMON

→ Couleur ; Image ; Immatérialisme ; Lumière ; Phénoménologie.

VITALISME ET MÉCANISME

La science moderne, pour naître sous les espèces de la théorie mathématisée du mouvement, et conférer son sens moderne au « principe de causalité », avait dû repousser non seulement les cosmologies antiques qui expliquaient l'ordre de l'univers selon le jeu de « causes finales » (Aristote), mais aussi celles qui, d'une façon ou d'une autre, assimilaient le monde à un vivant (comme Platon dans le *Timée* et les stoïciens). Elle avait dû se démarquer de l'« animisme » qui avait envouté les esprits durant la Renaissance et inspirait les pratiques de la « magie naturelle ». Theophraste Bombastus von Hohenheim (1493-1541), dit Paracelse, représente, avec plus d'éclat qu'aucun autre, l'exemple d'un médecin qui peut passer, à bon droit, pour l'un des pères de la chimie pharmaceutique, mais qui continue de voir dans l'organisme humain un « microcosme », miroir infime du macrocosme ; il pense ainsi que chaque viscère s'associe à un astre et entretient avec lui des rapports réciproques : le cœur répond au Soleil, le foie à Jupiter. Paracelse voit des « signatures » partout : les fleurs jaunes conviennent à la jaunisse, les terres rouges à l'hémorragie, etc.

La physique mathématisée parvenait, de Descartes à Newton, à formuler le principe d'insertion comme l'une de ses lois fondamentales : « Un corps abandonné à lui-même persiste dans son état d'immobilité ou de mouvement aussi longtemps que quelque chose ne vient pas modifier celui-ci. » Il s'ensuivait qu'une distinction nette semblait devoir être établie entre les corps « inertes » et les corps vivants. Mais comment renoncer à appliquer aux êtres vivants une démarche intellectuelle qui réussissait si bien par ailleurs ? Comment ambitionner de se « rendre comme maîtres et possesseurs de la nature » (Descartes) si les êtres vivants se trouvaient exclus du champ de la science nouvelle ? Comment y renoncer, surtout, dès lors que parmi ces vivants se trouve l'être humain qui souffre de se trouver affecté par les maladies, le vieillissement et la mort ?

Descartes conçut donc le projet de réformer la médecine en suivant la voie qui lui avait été favorable en géométrie et en mécanique ainsi qu'il l'explique dans la *Lettre Préface à ses Principes de Philosophie* (1644). Il en vint même à considérer que cette application devait devenir sa tâche principale. C'est ainsi qu'il rédigea son *Traité de l'Homme*, ouvrage qui a été publié pour la première fois en latin à Leyde en 1662, puis en français en 1664, et qui comporte les éléments essentiels de la physiologie cartésienne. Il use, par prudence, d'une fiction. « Je suppose, écrit-il, que le corps n'est autre chose qu'une statue ou machine de terre que Dieu forme tout exprès pour le rendre plus semblable à nous qu'il est possible. En sorte que non seulement il lui donne au-dehors la couleur et la figure de tous nos membres, mais aussi qu'il met au-dedans toutes les pièces qui sont requises pour faire qu'elle marche, qu'elle mange, qu'elle respire et enfin qu'elle imite toutes celles de nos fonctions qui peuvent être

imaginées procéder de la matière et ne dépendre que de la disposition des organes. » Cette fiction étend à l'organisme humain la célèbre théorie de l'« animal-machine » telle qu'elle se trouvait notamment exposée dans une lettre de mars 1638 : « La ressemblance qui est entre la plupart des actions des bêtes et les nôtres, nous a donné, dès le commencement de notre vie, tant d'occasions de juger qu'elles agissent par un principe intérieur semblable à celui qui est en nous, c'est-à-dire par le moyen d'une âme qui a des sentiments et des passions comme les nôtres, que nous sommes tous naturellement préoccupés de cette opinion. Et pour savoir ce que l'on doit croire de celle-ci, on doit, ce me semble, considérer quel jugement en ferait un homme, qui aurait été nourri toute sa vie en quelque lieu où il n'aurait jamais vu aucuns autres animaux que des hommes, et où, s'étant fort adonné à l'étude des mécaniques, il aurait fabriqué ou aidé à fabriquer plusieurs automates, dont les uns auraient la figure d'un homme, les autres d'un cheval, les autres d'un chien, les autres d'un oiseau, etc, et qui marchaient, qui mangeaient et qui respiraient, bref qui imitaient, autant qu'il était possible, toutes les autres actions des animaux dont ils avaient la ressemblance, sans omettre même les signes dont nous usons pour témoigner nos passions, comme de crier lorsqu'on les frappait, de fuir lorsqu'on faisait quelque grand bruit autour d'eux, etc., en sorte que souvent il se serait trouvé empêché à discerner, entre des vrais hommes, ceux qui n'en avaient que la figure. » La conception « mécaniste » de Descartes visait, au premier chef, à éliminer les conceptions magiques des rapports de l'âme et du corps chez l'homme.

Bien des physiologistes s'engagèrent à sa suite sur cette voie, au prix d'analogies pour le moins audacieuses. C'est ainsi que Baglivi (1668-1706) dans un ouvrage alors célèbre intitulé *Praxis medica* (1696) pouvait écrire à l'intention des médecins : « Examinez avec quelque attention l'économie physique de l'homme : qu'y trouvez-vous ? Les mâchoires armées de dents, qu'est-ce autre chose que des tenailles ? L'estomac n'est qu'une corne ; les veines, les artères, le système entier des vaisseaux, ce sont des tubes hydrauliques ; le cœur est un ressort ; les viscères ne sont que des filtres, des cribles ; le poumon n'est qu'un soufflet ; qu'est-ce que les muscles ? Sinon des cordes. Qu'est-ce que l'angle oculaire ? Si ce n'est une poulie, et ainsi de suite. » Et il s'en prend aussitôt aux disciples de Paracelse, ceux qu'il appelle les « chimistes », et que nous appellerions les « alchimistes ». « Laissez les chimistes avec leurs grands mots de "fusion", de "sublimation", de "précipitation" vouloir expliquer la nature et chercher ainsi à établir une philosophie à part ; ce n'est pas moins une chose incontestable que tous ces phénomènes doivent se rapporter aux lois de l'équilibre, à celles du coin, de la corde, du ressort et des autres éléments de la mécanique. » L'école à laquelle appartient Baglivi est ainsi désignée sous le nom de « iatromécaniciens ».

Plus généralement, de tous ceux qui voudront

réduire les phénomènes vitaux aux lois de la mécanique on dira qu'ils sont des « mécanistes ». Le sens du mot se renouvella lorsque Newton eut posé les bases de la théorie de la gravitation universelle. Les « newtoniens » prirent à tort la force d'attraction pour modèle de toute « loi de la nature ». Et l'on vit ainsi des esprits éminents comme Buffon dans sa fameuse *Histoire de la nature* ou Maupertuis dans la *Vénus physique* tenter d'expliquer les traits essentiels du vivant – organisation, développement, reproduction et hérédité – à partir d'une structure analogue de la matière vivante : « molécules organiques », particules vivantes conçues sur le modèle des « atomes » et reliées par des forces newtoniennes et se transmettant par hérédité.

Georges Canguilhem a fait remarquer que cette orientation de la physiologie moderne trouvait en fait ses racines théoriques lointaines dans la pensée antique et le motif de son succès dans la construction, contemporaine de Descartes, de machines « automates ». La notion même d'organisme, avancée par Aristote, suppose déjà en effet l'assimilation du corps vivant à une machine : *organon* désigne, en grec, l'outil. Et Aristote décrit les organes du mouvement animal comme les parties d'une machine de guerre, par exemple le bras d'une catapulte qui va lancer un projectile... Platon, avant lui dans le *Timée*, définissait le mouvement des vertèbres comme celui de charnières ou de gonds. Descartes, pour sa part, s'intéressa particulièrement à ces machines nouvelles de son temps que sont les montres, les horloges, les machines à eau... Et s'il croit pouvoir appliquer les lois de la mécanique à l'organisme, c'est grâce à l'analogie qu'il établit entre leur auto-mouvement et celui des êtres vivants.

Était-on donc condamné à nier la spécificité du vivant en le « mécanisant » ainsi pour en faire la science ? Ou fallait-il renoncer à en faire la science, au sens moderne, si l'on voulait préserver cette spécificité, et, tout particulièrement, la finalité qui semblait caractériser le rapport des structures à ses fonctions ?

Ce dilemme philosophique a empoisonné l'histoire de la physiologie et plus généralement de la biologie modernes jusqu'au milieu du siècle dernier. La plupart de ceux qui ont voulu se préserver du « mécanisme » ont, en définitive, eu tendance à ressusciter l'animisme magique de l'Antiquité ou de la Renaissance. C'est ainsi qu'on voit le chimiste allemand Georg Stahl (1660-1734), théoricien du « médecin de soi-même », chercher la cause de la vie dans une « âme sensible » (*anima*) qui réglerait tous les échanges à l'intérieur du corps et empêcherait la mort. Théorie qui connut un succès considérable dans les pays piétistes protestants du nord de l'Europe. Pourtant, ceux-là mêmes qui s'affirmaient les plus résolument « mécanistes », comme Descartes, devaient en fait admettre implicitement le caractère essentiel de la finalité du vivant. L'assimilation de l'organisme à une machine supposait qu'on admit l'existence de quelque mécanicien (ou horloger) pour en assembler les pièces et régler le fonctionnement. Descartes, comme la plupart de ses contemporains, se réfère explicitement au Dieu

créateur. Ils devaient admettre de surcroît, lorsqu'il s'agissait d'expliquer la construction de la machine elle-même, que le mécanicien disposait d'un modèle donné par l'organisme lui-même.

C'est peut-être Emmanuel Kant (1724-1804) qui, dans sa *Critique de la Faculté de Juger* (1790), a le plus nettement marqué les limites du mécanisme ainsi conçu. On le voit aussi reprendre l'exemple cartésien de la montre et écrire : « Dans une montre, une partie est l'instrument du mouvement des autres, mais un rouage n'est pas la cause efficiente de la production d'un autre rouage ; une partie est certes là pour l'autre, mais elle n'est pas là par cette autre partie. C'est pour cette raison que la cause qui produit celles-ci et leur forme n'est pas contenue dans la nature (de cette matière)... C'est la raison pour laquelle également, dans une montre, un rouage ne peut en produire un autre, pas plus qu'une montre ne peut produire d'autres montres en organisant pour cela d'autres matières ; c'est la raison pour laquelle elle ne remplace pas non plus d'elle-même les parties qui lui ont été enlevées, et ne compense pas leur défaut dans la première formation en faisant intervenir les autres parties, ni ne se répare elle-même lorsqu'elle est déréglée : or, tout cela, nous pouvons l'attendre en revanche de la nature organisée. » Kant caractérise donc la finalité de l'organisme comme « une finalité sans fin », c'est-à-dire sans but fixé de l'extérieur comme dans l'activité technique.

La physiologie expérimentale est née avec Claude Bernard (1813-1878) d'un effort pour dépasser ce dilemme. La pensée de l'auteur des *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux végétaux et aux animaux* s'inscrit, pour sa part, dans une lignée de pensée qu'on peut qualifier de « vitaliste », et qui procédait d'un double refus : celui de l'« animisme » et celui du mécanisme. Tel avait été le cas du médecin Théophile De Bordeu (1722-1776), le premier grand théoricien de l'École de Montpellier, que Diderot mit en scène dans *Le rêve de D'Alembert*, mais aussi celui de Paul Joseph Barthez (1734-1806), qui se référerait à Hippocrate pour écrire dans ses *Nouveaux éléments de la science de l'homme* (1778) : « J'appelle principe vital de l'homme la cause qui produit tous les phénomènes de la vie dans le corps humain. Le nom de cette cause est assez indéfini et peut être pris à volonté. Si je préfère celui de principe vital, c'est qu'il présente une idée moins limitée que le nom d'*impetum faciens* (*enormôn*) que lui donnait Hippocrate, ou autres noms par lesquels on a désigné la cause des fonctions de la vie. » Tel avait été enfin celui de Marie François Xavier Bichat (1771-1802) lorsque, dans ses *Recherches physiologiques sur la vie et la mort* (1800), il avait donné sa célèbre définition : « La vie, c'est l'ensemble des fonctions qui s'opposent à la mort », et avait cru devoir invoquer une « force vitale » pour l'expliquer. Il ajoutait : « La physique, la chimie se touchent parce que les mêmes lois président à leurs phénomènes. Mais un immense intervalle les sépare de la science des corps organisés, parce qu'une énorme différence existe entre leurs lois et celles de la vie. Dire que la physiologie est

la physique des animaux, c'est en donner une idée extrêmement inexacte ; j'aimerais autant dire que l'astronomie est la physiologie des astres. » Bichat retourne ainsi l'accusation de « magie naturelle » contre les mécanistes...

Claude Bernard, qui découvre la fonction glyco-génique du foie à la faveur de ses célèbres expériences du « foie lavé », forme le concept inédit de « milieu intérieur » qui lui permet définitivement d'affirmer que les lois ordinaires de la physique et de la chimie s'appliquent au vivant, mais dans des conditions qui sont spécifiques. Rejetant toute idée de « principe vital » ou de « force » mystérieuse, il peut ainsi affirmer ce qu'il appelle le « déterminisme » – mot qu'il introduit dans la langue philosophique française – et donner une double définition de la vie : « la vie, c'est la mort » ; « la vie, c'est la création ». Autrement dit : la création au prix de la mort. D'une certaine façon, on peut dire que Claude Bernard justifiait, un siècle plus tard, la critique que Leibniz avait adressée au mécanisme de Descartes et à celui de Newton, sans pour autant verser dans l'animisme. Le développement d'un être n'obéit-il pas à une « formule » qu'il déploie comme une série, mais selon un mouvement d'actualisation, une dynamique, qui « ne peut que tenir compte » du déploiement des autres êtres ? Telle était la thèse essentielle de la *Monadologie*.

En droit, la guerre entre mécanisme et vitalisme trouvait son terme dans l'œuvre de Claude Bernard. Les travaux de l'embryologie moderne sont d'ailleurs venus au même moment infliger une nouvelle défaite au mécanisme. L'Allemand G.F. Wolff (1733-1794), qui la fonde, puis le Russe Karl von Baer (1792-1876), qui avance la théorie des feuilletés germinatifs, soulignent l'un des caractères propres du vivant : le développement, la « morphogénèse ». De même la théorie cellulaire, telle qu'elle se trouve résumée par Rudolf Virchow dans une formule qui fera fortune : « Omnis cellula e cellula » (Toute cellule provient d'une autre cellule), impliquait que l'on renonçât à réduire le vivant à l'inerte, la « finalité sans fin » à la causalité mécanique. La balance semblait d'autant plus pencher en faveur du « vitalisme » que la théorie darwinienne – telle qu'elle était présentée dans *L'Origine des espèces* (1859) – établissait pour la première fois l'unité du vivant et abolissait la distinction traditionnelle entre règnes (végétal et animal), tout en faisant apparaître le lien généalogique qui, de variations individuelles en variations individuelles triées par la « sélection naturelle », reliait toutes les formes vivantes, et permettait de les distinguer de toute autre réalité « physique ».

Il se trouve cependant que de nouvelles batailles n'ont cessé au cours du siècle sur ce front. La question garde aujourd'hui toute son actualité. Cette situation s'explique certainement par des motifs qui n'ont pas de rapports directs avec les recherches biologiques elles-mêmes. Il se trouve, en effet, d'abord que du « vitalisme » de certains physiologistes allemands, les idéologues du nazisme se sont emparés – comme ils

s'emparaient du « darwinisme » – pour défendre une philosophie mystique de la Vie comme base d'une conception « totalitaire » de la société. D'où, aux lendemains de la Seconde Guerre mondiale, une réaction en faveur du matérialisme mécaniste. Mais il faut ajouter à ce motif la naissance, dans le sillage de la génétique mendélienne, de la biologie moléculaire. Ne pouvait-on pas espérer réduire intégralement les lois du vivant – y compris de son développement – à des lois physiques ? La vie ne s'avèrait-elle pas susceptible de se plier au nombre ? Des modèles physiques – informatiques – ne livrent-ils pas une voie d'accès à l'intimité du matériel génétique et aux « commandes » de l'organisme ? Un des plus illustres des créateurs de la mécanique quantique, Erwin Schrödinger, n'avait-il pas donné le branle en 1944 dans son petit livre manifeste *Qu'est-ce que la vie ?*

On a vu ainsi renaître et s'affirmer l'ambition mécaniste, sous les espèces d'un « physicisme » renouvelé. Revenons donc une dernière fois à Descartes. Lorsqu'il prend les « automates » comme modèles du vivant, dans les conditions qu'on vient de rappeler, il admet, sans le dire, une certaine idée de ce qu'est l'activité de construction des machines. Cette idée que le XIX^e s. industriel a largement popularisée veut que l'activité technique – on dira ensuite « technologique » – se résume à l'application de connaissances scientifiques préalablement données. Auguste Comte, qui était polytechnicien, a inscrit cette idée au cœur de son *Cours de philosophie positive* (1830-1842). Les ingénieurs l'ont reprise comme une véritable « philosophie spontanée ». Mais c'est oublier que l'activité technique s'enracine dans un autre mode de pensée que celui de la science, celui de la lutte de l'homme contre son « milieu » – nous dirions aujourd'hui son « environnement » –, et que cette lutte n'a jamais attendu la science pour s'engager. L'invention et la mise au point de la machine à vapeur par les ingénieurs anglais du siècle dernier représentent un exemple éclairant de cette antériorité de la technique sur la science. La théorie de la machine à vapeur – la thermodynamique – n'a trouvé ses (deux) premiers principes théoriques que cinquante ans après la mise en fonction des premières machines à l'entrée des mines... Ladite « application » des sciences aura certes eu pour effet d'en augmenter la puissance sur une échelle qui a décidé du succès de la « révolution industrielle ». Ce n'est pas rien ; mais cela n'autorise pas à inverser les termes et à faire de cette révolution le fruit d'une révolution scientifique.

Ce qui s'affirme dans cette vue de la technologie n'est-il pas une ambition de maîtrise et de contrôle intégral des processus techniques ? Si l'on assimile les êtres vivants à des machines pour mieux leur « appliquer » des connaissances scientifiques, elles-mêmes structurées selon les lois « causales » au sens mécaniste, n'est-ce pas selon la même perspective, le même objectif de s'assurer un contrôle absolu sur ces êtres ? Il se pourrait que les actuelles analogies électroniques du vivant – soutenues par toute une industrie à l'échelle planétaire – participent de la même ambition. Ce qui ne

saurait aller sans une certaine menace pour la liberté de chacun, surtout lorsque la cible se trouve être comme aujourd'hui le cerveau, et par là, croit-on, la pensée...

► BERNARD C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), rééd., Paris, Garnier-Flammarion, 1966. — BICHAT M.F.X., *Recherches physiologiques sur la vie et la mort*, Paris, Garnier-Flammarion, 1996. — CANGUILHEM G., *Le normal et le pathologique*, Paris, PUF, 1966 ; « Vie », *Encyclopaedia Universalis*, Paris, Encyclopaedia Universalis Éd., 1974 ; *Ideologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, Paris, Vrin, 1977. — COMTE A., *Cours de philosophie positive*, Paris, Hermann, 1990. — DARWIN Ch., *Théorie de l'évolution*, textes choisis par Y. Conry, Paris, PUF, 1969 ; *Voyages d'un naturaliste. De la Terre de Feu aux Galapagos*, Paris, Maspéro, 1979. — DESCARTES R., *Œuvres*, Paris, Vrin, 11 vol., 1974. — DIDEROT D., *Le rêve de D'Alembert*, in *Œuvres*, t. I. Philosophie, Paris, R. Laffont, 1994. — HUNEMAN Ph., *Bichat, la vie et la mort*, Paris, PUF, 1998. — KANT E., *Critique de la Faculté de Juger*, Paris, Gallimard, 1980. — LAPLACE P.-S., *Œuvres Complètes*, Paris, Gauthier-Villars, 14 vol., 1878-1912. — LEIBNIZ, *Monadologie*, Paris, PUF, 1954. — PARACELSE, *Œuvres Complètes*, trad. Grillot de Grivy, Paris, 1913-1914 (rééd., Paris, Éd. Traditionnelles, 1984) ; *Œuvres médicales choisies*, trad. B. Gorceix, Paris, PUF, 1968. — PROCHIANZ A., *Claude Bernard. La révolution physiologique*, Paris, PUF, 1990. — SCHRÖDINGER E., *Qu'est-ce que la vie ?*, Paris, Christian Bourgois, 1986.

Dominique LECOURT

→ Automate ; Bichat ; Cartésianisme ; Cellule ; Déterminisme ; Leibniz ; Vivant (Théorie du).

VIVANT (Théorie du)

Depuis l'avènement de la biologie moléculaire, il a pu sembler qu'on disposait enfin d'une « théorie du vivant » dont la dignité épistémologique serait comparable à celle des grandes théories physiques contemporaines (relativité, mécanique quantique...). La mise en œuvre du « génie génétique » ces dernières années a pu renforcer cette idée : la biologie, longtemps restée science d'observation, devenait susceptible d'applications dirigées, contrôlées et efficaces. Le rêve d'une médecine intégralement scientifique auquel Claude Bernard (1813-1878) avait attaché son nom semblait devoir se réaliser. Il se trouve cependant que plusieurs lignées de recherches viennent de bousculer les termes dans lesquels on posait ainsi la problématique du vivant, et d'attirer l'attention sur les dangers de modèles « physiciques » en biologie. La question de la spécificité d'une « théorie du vivant » se trouve ainsi remise à l'ordre du jour, mais d'une façon très prometteuse puisqu'elle semble dépasser l'opposition traditionnelle entre « mécanisme » et « vitalisme ». Une telle théorie ne trouvera sans doute ses bases et ses perspectives philosophiques qu'en élaborant une nouvelle conception de la causalité.

La biologie moléculaire s'est constituée d'une rencontre entre plusieurs types de recherches qui depuis le milieu du XIX^e s. ne trouvaient pas à s'accorder. Le

premier type concernait la classification des espèces — ce que nous appelons la « systématique », et qu'on désignait comme « taxinomie » (littéralement : mise en ordre). Depuis Aristote, cette activité constituait une part essentielle de ce qu'on appelait « histoire naturelle » : il s'agissait de déterminer des caractères qui permettent de distinguer les êtres observés et de les ranger en espèces distinctes selon une hiérarchie correspondant à ce qu'on appelait depuis le XVII^e s. une « économie naturelle ». L'apogée de cette discipline date assurément de l'œuvre du Suédois Carl von Linné (1707-1778). Au prix d'une inlassable activité de collectionneur, il était arrivé à inventorier six mille espèces de plantes. Prenant la sexualité des organismes comme critère de classement, il avait élaboré une nomenclature et une terminologie latine qui se sont imposées. Il en résultait un *Système de la Nature*, selon quatre niveaux : la classe, l'ordre, le genre et l'espèce. Comme l'indique le titre de son ouvrage majeur, Linné était convaincu non d'avoir mis au point une méthode commode de classement mais de retrouver ainsi l'ordre même de la nature, les plans secrets du Créateur. Ce qui l'amenait à une conception « fixiste » des espèces.

Cette conception s'accordait fort bien avec le récit biblique de la Création, où il est dit (Genèse I) que chaque « espèce » a été créée séparément par Dieu « selon son type ». Ce fixisme, où la science rejoint la théologie, est resté très puissant tout au long du XVIII^e s. Le premier à en ébranler les bases fut sans doute le comte Georges Louis Leclerc de Buffon (1707-1788), directeur du Jardin du Roy (l'actuel Jardin des Plantes) depuis 1739, dans sa très fameuse *Histoire naturelle* publiée à partir de 1749. Le naturaliste français, né la même année que Linné, faisait apparaître des parentés entre espèces et défendait une conception « continuiste » de la nature en désaccord avec l'idée d'espèces « séparées » par essence les unes des autres.

Jean Baptiste Monet de Lamarck (1744-1829) peut être considéré comme le continuateur de Buffon. À partir d'études portant d'abord sur les « animaux sans vertèbres » il en vint à considérer que les espèces se transformaient sous l'empire des « circonstances » qui les obligeaient à « s'adapter ». À ce nouveau type de pensée on a donné le nom de transformisme. L'opposition virulente d'un jeune rival, Georges Cuvier (1769-1832), le fondateur de l'anatomie comparée, qui défendit contre lui l'idée de fixité des espèces, a conduit bien des historiens à voir en Lamarck le précurseur calomnié de Charles Darwin (1809-1882). À tort, aux dires de Darwin lui-même, car Lamarck conservait l'idée qu'il existe une « économie naturelle » ; il se contentait — si l'on peut dire — de la mettre en mouvement. Les espèces n'avaient pas, pour autant, perdu leur caractère « essentiel », fondé dans l'ordre de la nature.

Avec Charles Darwin, naturaliste de terrain qui observa dans sa jeunesse la faune et la flore des côtes de l'Amérique du Sud et des îles Galapagos au cours de son fameux voyage sur le *Beagle*, c'est ce mode de pensée lui-même qui se trouve remis en question. En

s'appuyant sur les travaux de géologie de Charles Lyell (1797-1875) et sur la conception de la nature défendue par l'économiste britannique Thomas Robert Malthus (1766-1834), puis en étudiant attentivement les procédés de sélection mis en œuvre par les horticulteurs et les éleveurs, Darwin en vient à proposer en 1859 une théorie de la « descendance avec modifications ». Cette théorie, exposée dans *L'Origine des Espèces*, récuse l'idée d'un ordre harmonieux de la Nature qui témoignerait de la Providence divine. Il montre qu'il y a bien transformation des « espèces », mais que cette transformation doit être imputée à l'apparition de petites variations insensibles dans les organismes individuels. Comme ces individus se trouvent tous en lutte les uns contre les autres pour s'emparer des moyens de subsistance et assurer leur reproduction, celle des variations qui confère à son porteur un avantage dans cette lutte s'impose et se transmet aux descendants. Par analogie avec le travail des éleveurs, Darwin désigne ce processus comme « sélection naturelle ». Mais il précise bien que cette sélection est un fait, le résultat d'un « tri » mécanique, qui ne suppose aucun « choix » de la Nature.

Cette conception du vivant s'imposa non sans mal et non sans incompréhensions diverses. On peut aujourd'hui en retenir au moins deux thèses essentielles : celle de l'unité du vivant ; celle d'un mécanisme de « descendance » qui n'est guidé par aucune finalité préalablement donnée.

Mais l'auteur de *L'Origine des Espèces* laissait expressément grandes ouvertes plusieurs questions décisives posées par sa propre théorie : comment rendre compte de l'apparition des dites « petites variations » et de la transmission héréditaire des caractères retenus par la sélection ? Comment expliquer l'origine du vivant ? La biologie moléculaire se constituera du jour où la théorie darwinienne de la descendance sera « complétée » par une théorie adéquate de l'hérédité. Mais ce complément ne fut acquis qu'en surmontant de graves difficultés.

C'est ici qu'il faut invoquer un tout autre type de recherches : celles qui concernaient la constitution du vivant comme tel. Le moment qui marqua un pas décisif sur cette voie se trouve être strictement contemporain des travaux de Darwin : la constitution de la « théorie cellulaire ». Les premiers éléments de cette théorie, qui supposait l'usage du microscope, ont été posés par un botaniste J.M. Schleiden (1804-1881), étendus par T. Schwann (1810-1882), puis rassemblés par Rudolf Virchow (1821-1902). Le premier avançait que les plantes étaient intégralement constituées de cellules et que tous leurs éléments structuraux étaient des cellules ou des produits cellulaires ; le second étendit cette thèse aux animaux et montra que même des tissus comme ceux de l'os ont une origine cellulaire. Dès 1852, R. Remak (1815-1865) établissait que l'œuf de grenouille était une cellule, et que les nouvelles cellules de l'embryon au cours de son développement se formaient par division de cellules préexistantes. Rudolf Virchow énonça l'aphorisme : « Toute cellule provient

d'une cellule. » De là, l'idée ardemment défendue par le disciple allemand de Darwin, Ernst Haeckel (1834-1919), que l'on allait, grâce à la théorie cellulaire, découvrir les bases physico-chimiques de l'hérédité et ainsi pouvoir intégrer la théorie darwinienne dans une vaste « théorie de l'évolution » qui associerait la sélection naturelle, une théorie cellulaire de l'hérédité et une théorie du développement de l'embryon dans le prolongement de l'embryologie réformée par Karl von Baer au début du siècle.

Vues prophétiques, en un sens, mais qui égarent les esprits pour commencer. Les recherches cytologiques activement menées de 1860 à 1900 se portèrent en effet, en toute cohérence, sur les processus de la fécondation et de la reproduction. Elles aboutirent en 1883 à l'imposante théorie d'August Weismann (1834-1914) selon laquelle il existait dans le noyau un « plasma germinal » qui se transmettait de génération en génération selon une lignée continue, sans influence aucune des circonstances de la vie des organismes. Weismann se flattait d'avoir résolu le vieux problème de la poule et de l'œuf : la poule est le moyen que l'œuf a trouvé pour se reproduire.

Mais comment accorder cette théorie avec le schéma darwinien de la sélection naturelle qui supposait des « variations » dans le matériel héréditaire ? La difficulté fut aggravée en 1900 par la redécouverte du *Mémoire* (1856) de Gregor Mendel (1822-1884) sur l'hérédité des petits pois par les botanistes De Vries, Correns et Tschermack. Ce mémoire, qui n'avait pas attiré l'attention du monde savant lorsqu'il avait été divulgué un demi-siècle plus tôt, faisait apparaître une distribution statistique dans la transmission de caractères discrets d'organismes individuels. Dès 1910, le biologiste américain Thomas Morgan (1866-1945), travaillant sur la drosophile, confirmait amplement les vues de Mendel et avançait le concept de « mutation » comme central dans la théorie de l'hérédité.

On ne put se tirer d'embarras qu'en déterminant la base chimique de l'hérédité. C'est un autre type de recherches qu'il faut invoquer ici : celles qu'avait ouvertes en 1850 l'avènement de la chimie organique, lequel est dû aux progrès de la cristallographie. C'est ainsi qu'Auguste Laurent (1807-1853) ouvre la voie dans sa thèse en 1837 intitulée *Recherches diverses de chimie organique*. Justus von Liebig (1803-1873) proclame que l'objectif prioritaire de la chimie consiste dans la production artificielle de composés chimiques... Le moment décisif avait sans doute été marqué par les recherches cristallographiques du jeune Louis Pasteur (1822-1895), qui fondait en quelque manière la stéréochimie — la chimie de l'espace : il allait devenir possible d'identifier les arrangements d'atomes dans une molécule et de construire des molécules aux arrangements déterminés.

C'est ainsi que l'on put entre 1910 et 1950 faire apparaître que la base matérielle de l'hérédité était formée de molécules complexes, et que la seule façon de progresser était d'en apprendre un peu plus au sujet de la constitution chimique du gène... On put ainsi

donner son sens à une découverte réalisée en 1869 par le chimiste suisse Friedrich Miescher (1844-1895), qui avait identifié dans le noyau une substance non protéique que l'on devait identifier comme « acide désoxyribonucléique » (ADN). La mise au jour de la structure en double hélice de l'ADN par Watson et Crick en 1953 allait conférer une célébrité immense à cet acide, et occulter pour une part les patientes recherches des chimistes et des cytologistes qui l'avaient rendue possible.

Commençait le temps de la biologie moléculaire proprement dite. Voici en quels termes le biologiste Ernst Mayr, l'un des promoteurs de la « théorie synthétique de l'évolution », le célèbre dans son *Histoire de la Biologie* : « La découverte de la double hélice et de sa fonction eut un profond impact, non seulement sur la génétique, mais sur l'embryologie, la physiologie, la théorie de l'évolution et même la philosophie (Delbrück, 1971). Le problème du phénotype et du génotype pouvait maintenant être formulé en termes clairs, et la théorie de l'hérédité des caractères acquis n'avait désormais plus aucune crédibilité. Même si l'on avait soupçonné, à de nombreuses reprises depuis les années 1880 et 1890, que la nature du matériel génétique pouvait bien être différente de celle des autres matériaux de construction de l'organisme, et même si l'on avait introduit en 1908 les termes de "génotype" et de "phénotype", on ne réalisa pas avant 1944 la différence qu'il y avait entre ces deux données. On a compris, en 1953 seulement, que l'ADN constituant le génotype n'intervenait pas lui-même dans le processus de développement, mais qu'il y jouait le rôle d'un répertoire d'instructions. La percée de la biologie moléculaire, dans les années 1940-1950, coïncida avec la naissance de la science de l'information, et certains des mots-clés de cette discipline passèrent dans la génétique moléculaire. »

Il pouvait sembler qu'enfin la théorie cellulaire, la théorie de l'évolution et la théorie de l'hérédité se trouvant raccordées, les sciences du vivant avaient trouvé leur théorie générale dans un cadre qu'on s'accordait à qualifier de « néodarwinien ». On vit ainsi dès le début des années 1960 quelques-uns des plus éminents biologistes publier les esquisses d'une telle théorie. L'attention se porta sur les notions de « programme » et de « code » et sur la théorie de l'information qui soutenait ces métaphores. Il ne manqua pas de penseurs pour prendre ces métaphores au pied de la lettre et bâtir, en guise de théorie, une véritable philosophie du vivant : si la vie est structurée comme un langage, le langage n'est-il pas structuré comme la vie ? La boucle paraissait bouclée qui de la biologie allait à la linguistique, et inversement.

En réalité, plusieurs questions se trouvaient ainsi laissées en suspens, qui n'ont pas tardé à faire retour. La première affectait la théorie darwinienne elle-même. Elle concernait les « formes intermédiaires » qui manquaient dans le registre fossile pour justifier le schéma darwinien d'une transformation continue et progressive des espèces. Darwin lui-même n'avait

cessé de déplorer l'absence de ces chaînons manquants, et d'espérer qu'on en fit un jour la découverte. Les paléontologues Stephen Jay Gould et Niels Eldredge relancèrent la discussion en 1972 en proposant leur modèle dit de l'« équilibre ponctué », lequel fait apparaître que la question était mal posée parce que marquée par une philosophie du progrès continu. Au lieu d'invoquer de telles formes hypothétiques, ne convient-il pas d'attribuer un sens positif aux brusques lacunes qui se manifestent parmi les fossiles ? Ne dispose-t-on pas de moyens de les expliquer grâce à la génétique en faisant valoir que les « nouvelles » formes naissent toujours dans une situation d'isolement géographique et climatique, et que leur avantage ne se manifeste qu'à compter du jour où ces conditions d'isolement se trouvent rompues au détriment de la forme jusque-là dominante ? On expliquerait ainsi le rythme syncopé de l'évolution, avec de longues « stases » conservatrices et de brutales explosions. La contingence fait ainsi son entrée dans le processus d'évolution, sans remettre en question pour autant le mécanisme de la sélection naturelle...

À une autre question posée du vivant même de Darwin, la biologie moléculaire n'apportait pas une réponse satisfaisante en dépit des apparences : celle du rapport entre phylogénèse et ontogénèse. Comment expliquer à partir de la génétique le développement de l'embryon ? Comment expliquer qu'à partir de tel œuf se développe tel organisme selon un « plan » prédéterminé ? Ernst Haeckel, de son temps, avait tenté de répondre à cette question par la « loi biogénétique fondamentale » qui posait que l'« ontogénèse récapitule la phylogénèse », c'est-à-dire que l'embryon d'un organisme donné repasse en accéléré par toutes les formes qu'ont prises ses ancêtres.

Malgré l'extraordinaire adhésion qu'elle a pu susciter, bien au-delà de la biologie (Freud, Lombroso...), cette loi apparaissait plus comme l'énoncé d'une difficulté que comme sa solution puisqu'elle revenait à aligner le temps du développement sur celui de l'évolution. Mais quel rapport existe-t-il entre ces deux processus : celui selon lequel, à partir d'un œuf indifférencié, le développement individuel se fait dans chaque cas – sauf anomalie – d'après le patron de l'espèce et celui de la transmission héréditaire du patrimoine génétique ? Or, il se trouve que l'utilisation de la biologie moléculaire pour étudier le système nerveux central vient d'apporter une réponse.

Depuis que l'on a découvert, d'abord sur la drosophile, l'existence de « gènes de développement » responsables de ce patron – et que l'on sait agir sur eux par exemple en faisant pousser une patte à la place d'une antenne – la question se trouve pour l'essentiel réglée. On peut désormais dans un même cadre théorique cohérent relier ces trois processus fondamentaux qui sont le développement, la reproduction et l'hérédité. Et dans ce cadre se dessinent les progrès des neurosciences qui remettent en perspective l'ensemble de l'évolution en y montrant à l'œuvre une « sélection des groupes neuronaux » (G. Edelman) susceptible de

rendre compte des différentes formes d'existence que revêt cette propriété que nous appelons la « conscience », laquelle ne s'explique que « par l'émergence, au cours de l'évolution, de nouvelles sortes de morphologies, à la fois dans le corps et dans le cerveau ».

Ces résultats présentent un double intérêt scientifique : l'existence de « gènes de développement » peut contribuer à expliquer la soudaineté des apparitions et des disparitions d'espèces. Dès lors qu'une mutation porterait en effet sur l'un d'entre eux, la « variation insensible » de Darwin se présenterait en effet comme une « mutation brusque » affectant l'un des traits majeurs du phénotype. Les recherches en « neurobiologie du développement » rendent compte, d'autre part, de la singularité de l'être humain : la programmation de la morphogénèse de son système nerveux central s'avère en effet moins stricte que celle à laquelle sont soumis les autres primates supérieurs, la part de l'épigénèse y est plus importante.

Les plus immédiates des leçons philosophiques à tirer de ces travaux concernent la vieille question de la définition de l'être humain comme « animal raisonnable ». Que l'être humain soit un animal par sa descendance, voilà qui est sans doute humiliant mais qui se trouve amplement confirmé depuis Darwin, et précisément établi aujourd'hui. Qu'il s'agisse d'un animal d'un type particulier, nous pouvons commencer à l'expliquer. Il apparaît qu'aucun « abîme », aucune différence d'essence, ne sépare l'homme des autres primates supérieurs. Il s'avère d'autre part que, paradoxalement, il n'a conquis son empire sur les autres vivants qu'à la faveur d'un affaiblissement des contraintes génétiques dirigeant son développement. Ce qui le distingue, ce n'est pas « la raison », mais sa plasticité neuronale singulière (qui perdure jusqu'à sa mort) et qui expose son développement aux interactions avec ses semblables et avec ses conditions de vie. De là que l'être humain se soit révélé capable d'habiter tous les climats de cette planète, de même qu'il se révélait « omnivore » ; d'où aussi que son individualisation s'avère un processus sans autre terme que sa mort et fasse une part considérable aux rapports qu'il entretient avec ses « semblables ».

Mais on peut aussi tirer de ces recherches, à la lumière de la longue histoire dont elles se présentent comme le dénouement, une leçon épistémologique majeure. Le propre du vivant, c'est bien de se présenter comme « morphogénèse » perpétuelle : évolution et développements de formes. Ces processus sont explicables selon le principe général de causalité (« pas d'effet naturel sans cause naturelle »), mais cette causalité ne saurait être réduite à une causalité mécaniste, pas plus qu'on ne peut la « résorber » dans une vue finaliste de la nature. La causalité morphogénétique n'intervient (dans le développement des individus) que sur la base d'un répertoire de possibles qui sont eux-mêmes le résultat d'une immense succession de « tris » sélectifs, lesquels font toute sa place à la contingence de faits d'adaptation.

► BALIBAR F., *La science du cristal*, Paris, Hachette, 1991.
 – BARTHÉLEMY-MADAULE M., *Lamarck ou le mythe du précurseur*, Paris, Le Seuil, 1979. – BERNARD C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865), rééd., Paris, Garnier-Flammarion, 1966. – CANGUILHEM G., *Essai sur quelques problèmes concernant le normal et le pathologique* (1943), rééd. sous le titre *Le normal et le pathologique*, augmenté de *Nouvelles réflexions concernant le normal et le pathologique*, Paris, PUF, 1966 ; *La connaissance de la vie* (1952), rééd., Paris, Vrin, 1965 ; *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*, Paris, PUF, 1955 ; *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, Vrin, 1968 ; « Vie », *Encyclopaedia Universalis*, Paris, Encyclopaedia Universalis Éd., 1974 ; *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, Paris, Vrin, 1997. – DAGOGNET F., *Georges Canguilhem, philosophe de la vie*, Le Plessis-Robinson, Les Empêcheurs de penser en rond, 1977. – DARWIN Ch., *Ébauche de l'origine des espèces* (1844), trad. fr. C. Lameere & D. Becque-mont, Lille, Presses Univ., 1992 ; *On the Origin of Species*, Londres, John Murray, 1859 ; *L'Origine des espèces*, 6^e éd., 1872 (trad. fr. E. Barbier, Paris, Reinwald & Cie, 1876) ; *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle*, Paris, C. Reinwald & Cie, 1872. – DEBRU C., *Philosophie de l'inconnu : Le Vivant et la recherche*, Paris, PUF, 1998. – DEBRU C. & NOUVEL P., *Le possible et les biotechnologies*, Paris, PUF, 2003. – FOX KELLER E., *Le Siècle du gène*, Paris, Gallimard, 2003 ; *Dictionnaire de la pensée médicale*, sous la direction de D. Lecourt, 2004, 2^e rééd., Paris, Quadrige/PUF, 2006. – HAECKEL E., *Generelle Morphologie der Organismen*, Berlin, 1866. – JACOB F., *La logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970. – JACQUES J., *La molécule et son double*, Paris, Hachette, 1992. – LAMARCK, *Philosophie zoologique*, Paris, 10/18, 1968. – LECOURT D., *Pour une critique de l'épistémologie*, Paris, Maspero, 1972 ; *Prométhée, Faust, Frankenstein. Fondements imaginaires de l'éthique*, Le Plessis-Robinson, Les Empêcheurs de penser en rond, 1996. – MONOD J., *Le hasard et la nécessité*, Paris, Le Seuil, 1970. – MORANGE M., *Histoire de la biologie moléculaire*, Paris, La Découverte, 1994. – PROCHANTZ A., *Claude Bernard, la révolution physiologique*, Paris, PUF, 1990. – WATSON J.D., *La double hélice*, Paris, R. Laffont, 1968. – WEISMANN A., *La durée de la vie. Essais sur l'hérédité et la sélection naturelle* (1887), trad. fr. H. de Varigny, Paris, C. Reinwald & Cie, 1892.

Dominique LECOURT

→ ADN ; Buffon ; Cellule ; Classification [BOTANIQUE] ; Cuvier ; Darwinisme ; Espèce ; Gène ; Génétique ; Haeckel ; Lamarckisme ; Mayr ; Mendel ; Plasma germinatif ; Sélection ; Taxinomie ; Weismann.

VULGARISATION

Un statut paradoxal

Naguère beaucoup décrié, rarement défendu, mais constamment repris, aujourd'hui soigneusement contourné, mais non remplacé, le terme « vulgarisation » lui-même indique un malaise persistant. En le préférant à un terme plus ancien et plus valorisant (« popularisation »), la tradition française a inscrit la communication scientifique dans la série du « vulgaire », mêlant indissociablement les jugements épistémiques, social et esthétique. L'activité ainsi désignée se trouvait dès lors placée en déséquilibre. La

vulgarisation, croisade et compromission, est tout à la fois impérieuse et indigne. Et elle ne l'est qu'en regard d'une référence à la dignité absolue d'un objet pur, la Science, qui, la justifiant, lui resterait infiniment extérieur.

Ambiguïté qui mérite davantage d'être approfondie que dissipée. Même si la connotation est proprement française, elle ne fait qu'exprimer de façon particulièrement crue un malaise que d'autres traditions ne lèvent pas davantage. Fontenelle avait d'ailleurs déjà désigné, dans les premières pages de ses *Entretiens sur la pluralité des mondes*, le double décalage que produit l'effort pour socialiser, même un peu, la science : trop sommaire pour les spécialistes, le message ainsi produit menaçait d'être jugé trop aride par les lecteurs naïfs.

Le succès considérable des *Entretiens* trahit le caractère affecté de la dernière crainte : la vulgarisation scientifique est un produit culturel susceptible de trouver un marché prospère, pourvu qu'elle corresponde à certaines attentes et à certains intérêts. En revanche, son statut interstitiel entre les cultures légitimes indique bien par où la vulgarisation est un objet sensible et révélateur : écriture insuffisamment littéraire, savoir insuffisamment scientifique, cette dernière se situe au carrefour de questions essentielles soigneusement tues. Que le trivial soit crucial pour penser le statut des savoirs confère à la vulgarisation une place privilégiée. L'existence des entreprises vulgarisatrices, leur commentaire comme leur rejet demandent instamment : comment définir les uns par les autres le statut social, culturel, politique, sémiologique des savoirs ? Tel est le paradoxe : la vulgarisation, qui a si souvent fait référence à un objet scientifique pur de toute socialisation, de tout langage, de tout sujet, manifeste par là même les dimensions sociale, sémiotique, imaginaire du concept de science.

C'est ce qui fait la dignité théorique de cet objet indigne, la centralité de cette pratique marginale : c'est ce qui explique que les controverses sur la vulgarisation frappent aussi nettement au cœur d'une philosophie des sciences. Unité ou pluralité de la science, clôture ou ambiguïté des signes scientifiques, téléologie ou aventure de la recherche, extériorité ou implication du sujet connaissant, instrumentalité ou poéticité de la technique : tout texte, toute image de vulgarisation thématise et publie d'emblée ces apories. C'est sans doute pourquoi l'histoire de cette entreprise, longtemps tenue à l'écart des recherches « sérieuses » – et pour cette raison même très mal connue –, fait depuis les années 1970 l'objet de diverses relectures critiques.

Entreprises vulgarisatrices, question de la vulgarisation

La communication scientifique, qui institue sans cesse des façons différentes de porter regard sur l'effort de connaître, ne saurait être coupée d'un contexte historique, quelque goût que manifestent les vulgarisa-

teurs à se poser périodiquement en instaurateurs d'une ère nouvelle : elle est tributaire à la fois des renouvellements de la conceptualisation, des rhétoriques et institutions de la science, des idéologies sociales du savoir, des évolutions technologiques de la communication, des marchés de biens culturels. Le goût mondain des sciences qui se développe au XVIII^e s., avec la crise du savoir sociable de l'honnête homme, institue une tout autre relation aux connaissances que le projet positiviste, héritier de l'encyclopédisme, d'instituer par la diffusion des sciences une culture de synthèse capable de liquider la théologie et la métaphysique. La promotion de l'industrialisme, au siècle dernier, par les premières expositions universelles, le rôle joué par le « Palais de la Découverte » dans la reconnaissance sociale des métiers de recherche, les budgets contemporains de muséologie scientifique ou de télévision de la connaissance doivent être reliés à des enjeux politiques, économiques et médiatiques différents.

Au sein d'une même époque, les contradictions ne sont pas moindres. Le tour pragmatique que prend la culture de *Mechanics magazines* anglo-saxons au milieu du XIX^e s., favorisant une sorte de pratique diffuse de l'observation et de l'invention, est fort différent de l'institutionnalisation simultanée, en France, d'une relation sacralisante à la science patentée, ou de l'assomption du savant en philosophe souvent revendiquée outre-Rhin : chacune de ces tendances ne définit d'ailleurs qu'un profil dominant au sein d'un champ éditorial vivement controversé. La diversité des situations de communication (poésie scientifique, conférences, projections de vues, curiosités foraines, théâtre scientifique, chroniques de quotidiens, revues et collections richement illustrées, etc.) institue pour sa part des régimes de communication hétérogènes. L'identité des auteurs, la nature des effets sociaux, les logiques de reconstruction des démarches et valeurs scientifiques peuvent s'opposer autant que se copier.

Pour autant, on peut soutenir qu'il y a une question de la vulgarisation. Car le projet vulgarisateur est à la fois historiquement construit et idéologiquement situé. Il y a un corps d'opinion et d'action qui connaît une période de référence au milieu du XIX^e s. et qui se comprend dans l'héritage de la pensée encyclopédiste, réinterprétée au sein du saint-simonisme, du positivisme et des mouvements militants de l'éducation républicaine et actualisée dans le cadre de la grande édition.

On trouve chez Condorcet une expression particulièrement précise et explicite des hypothèses sur lesquelles repose cette entreprise. La communication des savoirs s'étaie sur le sentiment d'une subordination de la démocratie à l'instruction. La connaissance est pensée comme une force virtuelle de progrès, mais ce progrès ne devient actuel que partagé, la rétention du savoir étant, symétriquement, source de sa perversion. Il n'y a pas de culture propre au peuple au sens positif du terme, mais une lucidité ou un aveuglement de ce dernier – une aptitude de ce dernier à devenir citoyen –

fonction de la prééminence soit du préjugé, soit des lumières. Ce projet, qui associe indissolublement la science et la politique, débouche sur une quête de la transparence, que peuvent rendre possible un commerce généralisé et une langue universelle.

Le modèle ainsi résumé, radicalisé au fil du XIX^e s. et dépouillé graduellement de sa complexité, travaille profondément et durablement la pratique et la théorie de la vulgarisation. Il a un prolongement éthique et politique, l'évidente nécessité de diffuser le savoir comme source de bonheur ; il comporte une sémiotique, la recherche d'une transparence linguistique ; il véhicule une théorie de la société clivée entre savants et ignorants, et réconciliée par un opérateur particulier, le médiateur, qui, sans être producteur de savoir, jouerait un rôle de pur intermédiaire de l'intercompréhension.

Ce modèle a l'avantage de permettre aussi bien de promouvoir la vulgarisation que de critiquer son imperfection constante. Il peut recevoir l'adhésion de la « cité scientifique », dont il préserve la sacralité en la situant en dehors du social, et celle des « écrivains scientifiques », dont il masque commodément la responsabilité et la partialité nécessaires.

Cette idéologie s'accommode fort bien de deux modèles communicationnels, longtemps solidaires, peut-être en passe de devenir concurrents. Le premier de ces deux modèles, métaphorique, est celui de la traduction. Les savants et les ignorants sont comme deux nations parlant une langue différente. L'« interprète » traduit le discours de la vraie science dans le langage courant, loin de tout « jargon ». Le second modèle, plutôt fondé sur une métonymie de l'instrument, est celui de la diffusion : les savoirs y apparaissent comme des éléments de stock qu'il faut mettre en flux, en circulation. Ce modèle, à l'œuvre dans les programmes d'alphabétisation scientifique (*scientific literacy*), triomphe dans la thématique des réseaux de télécommunication : « routes de la pensée » selon l'expression en vigueur il y a un siècle, « autoroutes de l'information » suivant la variante aujourd'hui préférée.

Ces deux modèles ont en commun la référence très forte qu'ils supposent aux idées d'origine, de transparence et de neutralité. L'un et l'autre posent qu'il existe un texte original de la science, qu'il faudrait soit traduire, soit brancher : l'un et l'autre sont hantés par une transparence des signes, capable d'assurer la collecte des savoirs ; l'un et l'autre retiennent comme critère d'une bonne médiation culturelle l'effacement des énonciateurs. Mais par-delà ce noyau idéologique essentiel, les effets de ces deux modèles, également réducteurs, sont différents. L'idée de traduction conduit à n'aborder le travail du vulgarisateur que comme une opération locale de reformulation, au détriment des choix les plus essentiels et de l'activité poétique qui s'exerce dans l'organisation générale d'une démarche, d'un point de vue, d'un discours ; l'idée de diffusion apporte pour sa part une solution à la question du partage des savoirs avant de l'avoir posée, puisque la connectivité des éléments de connaissance fait critère de la démocratie cognitive.

Critiques et problématiques

L'analyse réelle de la vulgarisation ne peut s'instaurer qu'en attribuant à cette tradition le statut d'objet à comprendre et non de modèle à reprendre. Le face-à-face du projet de médiation et du procès de trahison – tous deux pris dans cette tradition – a été remis en question par l'examen méthodique, à partir des travaux fondateurs de Baudouin Jurdant, des prétendues évidences de la vulgarisation. Le public des revues de vulgarisation était fort différent de celui qui met en scène les contrats de communication. La rhétorique des discours accumulait davantage les signes superficiels de sérieux ou les marques d'une mise en scène de l'effort vulgarisateur qu'elle n'instituait la démarche de rendre des concepts intelligibles. L'effet de la vulgarisation pouvait être de légitimer une notion sociale de l'ignorance, plutôt que de franchir un fossé culturel. Plus généralement, l'idée que la nécessité de la vulgarisation s'impose comme une évidence faisait place, à l'examen, à de nombreux intérêts sociaux coalisés autour d'objets de compromis.

Ce moment de démythification peut déboucher sur la déconstruction définitive d'un objet illusoire. La vulgarisation n'aurait pour effet ni pour objet de construire des savoirs ; elle serait analysable comme un bien marchand porteur d'un effet de faux-semblant, opposé terme à terme, en vertu d'une certaine lecture de Bachelard, aux conditions d'un savoir vraiment scientifique. La question de la vulgarisation se résorbe alors dans celle des industries culturelles. Une autre voie, qui ne dissout pas l'objet analysé, consiste à prendre en compte la construction de sens et de connaissance à l'œuvre dans les entreprises vulgarisatrices, sans rester pour autant prisonnier de l'autocompréhension de la vulgarisation comme pratique neutre et purement didactique. Sans une reconnaissance de la valeur épistémique de la vulgarisation, la condamnation de cette dernière s'autoriserait d'une conception de la science tout aussi sommaire que celle des vulgarisateurs du XIX^e s. Le scientisme qui départage une vérité absolue et un ersatz de connaissance n'est rien d'autre qu'un produit de ce qu'il prétend analyser, l'idéologie de la science construite au sein du discours de la vulgarisation.

Les pistes de recherche les plus fécondes maintiennent les apories d'une communication de la science qui construit symétriquement, comme toute communication, des savoirs et des ignorances. La vulgarisation ne saurait contribuer au partage de savoirs analogues à ceux de la recherche ou de l'enseignement : ceci ne place pas pour autant en équivalence tous les discours sur la science que leur liberté par rapport aux critères institutionnels rassemble dans une commune extériorité prétendue à la science, mais que leur relation à la vérité et à l'énonciation des connaissances peut profondément opposer. La croisade vulgarisatrice a pu répondre à de tout autres motifs que l'impérieuse nécessité de diffuser les lumières : ceci ne dispense pas de se poser la question de la place en démocratie d'un savoir socialisé sur les pratiques scientifiques, qui

déterminent la formulation des enjeux de société, cautionnent la décision, modifient profondément nos cadres d'existence.

Parmi les nombreux travaux qui prennent pleinement en charge la complexité de ces questions on peut citer quelques axes problématiques. L'un d'entre eux consiste à se donner les moyens d'une mise en perspective historique des entreprises de communication scientifique, à partir d'études prenant en compte la construction parallèle de conceptions de la science et de programmes de diffusion des savoirs, dans leurs dimensions sociale, économique, technique et nationale. L'analyse de la nature et de l'activité des publics, des formes de la réception et du réinvestissement des discours sur la science, longtemps négligée, est aussi importante – et aussi difficile – au sein des enquêtes historiques qu'à propos des productions médiatiques contemporaines. Ces études ont désormais rompu avec le modèle linéaire selon lequel il y aurait d'abord quelque chose qui se nommerait « science » et ensuite un effort pour socialiser cet objet, au bénéfice d'une invention conjointe des critères de scientificité et des modes de présence sociale de la science. L'exploration du rôle joué par la vulgarisation au sein de la communauté scientifique – rôle social de défense et de promotion des entreprises et rôle épistémique d'ancrage des recherches dans une référence au vrai que la méthode n'offre pas en elle-même – accompagne ce mouvement intellectuel.

Un autre axe d'investigation consiste à placer les productions de vulgarisation dans une réelle intertextualité, parfois appelée « continuum » des textes, en relation avec les très nombreuses formes de communication scientifique, du *preprint* échangé entre chercheurs à l'article de très grande presse, en passant par les productions pédagogiques. Dans ce travail, où l'analyse des textes de vulgarisation rencontre la question plus large des poétiques du savoir, les conclusions peuvent être productives si l'analyse textuelle n'aboutit pas à une simple mise en équivalence des textes, mais conserve le souci d'identifier des espaces critiques de choix, de thématisation et d'occultation de divers points de vue sur l'activité scientifique et son statut social. La réflexion sur ce que peut être une poétique du texte de vulgarisation constitue un axe de ce travail, comme la prise en compte de la multiplicité des signes et dispositifs de communication, dans l'espace d'exposition, dans le message télévisuel, dans la dimension iconique (scripto-visuelle) du texte écrit. Le statut de l'image, qu'on a pu dire écartelée entre voir et savoir, est une question particulièrement vive, puisque s'y rencontrent une épistémologie spontanée du dévoilement, la banalisation d'instruments techniques constitutifs du regard expérimental, une tradition de l'emblématique très ancienne du geste de connaître et une force fantasmagique de la figurativité.

Cette analyse, qui ne saurait conduire à une modélisation de l'opération de vulgarisation, engendre plutôt une provocation de la pensée des sciences à partir d'un regard décalé. L'analyse des conditions d'appropriation sociale des savoirs convoque une réflexion sur les rapports entre divers modes de connaissance, sur ce que

peut être le désir de savoir, sur le statut des divers signes auxquels recourt la communication scientifique, sur les rapports entre savoir et pouvoir. D'autre part, la poétique de la vulgarisation entretient des relations très riches avec le récit mythique et plus largement avec les écritures littéraires les plus diverses. À cet égard, la question de la technique, qui, loin de déployer seulement une application méthodique et prédéterminée de la science, a le véritable pouvoir de concrétiser et d'inventer des désirs de faire, doit être analysée davantage qu'elle ne l'est jusqu'à présent, car l'écriture de la technique, très intertextuelle, est un acte culturel majeur.

La pensée de la vulgarisation se nourrit de l'évolution des pratiques et des controverses relatives à ces dernières, sans doute influencées de façon significative par le contre-coup des soupçons formulés par les chercheurs. Le débat récent sur ce que peut être une mise en culture de la science, la contestation de l'idée de vulgarisation comprise comme diffusion à « sens unique » des savoirs, la mise en question de la notion d'expertise, à l'occasion de divers événements tragiques mettant violemment en évidence les enjeux du savoir et de l'ignorance, témoignent d'une recherche de ce que pourrait être, selon une expression employée déjà au siècle dernier, une critique de science. Diverses expériences créatives (théâtre scientifique, science dans la rue, rencontres entre chercheurs et citoyens, etc.) configurent une nouvelle entreprise de communication scientifique qui, tout en ne pouvant faire l'économie d'aucune des questions rencontrées par l'entreprise vulgarisatrice, ne peut plus se nommer « vulgarisation ». Que cette entreprise n'ait pas encore trouvé un autre nom atteste sans doute que les apories de la vulgarisation, impossible mais impérieuse, indignent mais déçus, ne sont pas levées.

► BÉGUET B. éd., *La Science pour tous, la vulgarisation scientifique en France de 1850 à 1914*, Paris, Éd. du Cnam, 1990. – BÉNSAÛDE-VINCENT B. éd., « Sciences pour tous », *Romantisme*, n° 65, Paris, 1989. – BÉNSAÛDE-VINCENT B. & BLONDEL C. éd., « Vulgariser les sciences (1919-1939), acteurs, projets, enjeux », *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, n° 24, Paris, 1988. – CARO P., *La Roue des sciences. Du savant à la société, les itinéraires de la connaissance*, Paris, Albin Michel, 1993. – DAGOGNET F. éd., « La Vulgarisation », *Dictionnaire critique de la communication*, Paris, PUF, 1993, p. 1427-1530. – FAYARD P., *La Communication scientifique publique, de la vulgarisation à la médiatisation*, Lyon, Chronique sociale, 1988. – JACOBI D. & SCHELE B. éd., *Vulgariser la science, le procès de l'ignorance*, Seyssel, Champ Vallon, 1988. – JEANNERET Y., *Écrire la science. Formes et enjeux de la vulgarisation*, Paris, PUF « Histoire, science, société », 1994. – JURDANT B., *Les Problèmes théoriques de la vulgarisation scientifique*, Strasbourg, Univ. Louis Pasteur, 1973 (thèse). – RACHVARG D., *Science et spectacle : figures d'une rencontre*, Nice, Z'Éditions, 1993. – SHINN T. & WHITLEY R. éd., *Expository science : forms and functions of popularization, sociology of the sciences*, Reidel, 1985. – SICARD M., *L'année 1895 : l'image écartelée entre voir et savoir*, Paris, Les empêcheurs de penser en rond, 1995. – VERHAEGEN Ph. éd., « La Médiation des savoirs », *Recherches en communication*, Louvain, n° 4, 1995.

YVES JEANNERET

→ Enseignement des sciences ; Scientisme.

W - Y

WATSON James Dewey, né en 1928

Médecin et biologiste américain. Après des études de zoologie, et plus particulièrement d'ornithologie, il entame en 1948 des études doctorales sous la direction de Salvador Luria. Lors d'un stage post-doctoral en Europe, il rencontre Francis Crick, avec qui il engagera une collaboration fructueuse au Cavendish Laboratory, à Cambridge. Cette collaboration débouchera sur l'élucidation de la structure de la molécule d'ADN, support matériel de l'hérédité. La structure proposée est en double hélice avec appariement de bases dites « complémentaires » par des liaisons hydrogène (adénine appariée à la thymine et guanine appariée à la cytosine). La structure ainsi conçue fournissait une explication à une observation formulée plusieurs années auparavant par Erwin Chargaff touchant la parité des compositions de bases dans les molécules d'ADN (parité entre adénine et thymine d'une part, entre guanine et cytosine d'autre part). La double hélice de Watson et Crick, outre les éléments de symétrie qui la caractérisent et qui lui donnent une allure esthétiquement avantageuse, permet de fournir une explication simple pour la réplication du matériel génétique. Cette réplication constitue l'un des éléments déterminants de la multiplication cellulaire, laquelle constitue une propriété fondamentale du vivant. J. Watson, F. Crick et M. Wilkins ont reçu le prix Nobel de médecine et de physiologie pour leurs travaux en 1962. Nommé professeur au département de biologie de l'université Harvard, J. Watson a pris la direction du Cold Spring Harbor Laboratory en 1968. En 1989, il est nommé directeur du programme « génome humain » (dont l'objectif est le séquençage complet du génome humain). Il démissionnera moins de deux ans plus tard estimant que les conditions n'étaient pas réunies pour mener à bien sa mission.

● CRICK F.H., « Molecular structure of nucleic acids. A structure for desoxyribose nucleic acid », *Nature*, 1953, 171, 737 ; *The double helix, a personal account of the discovery of the structure of DNA*, New York/Londres, W.W. Norton & Co., 1980. – WATSON J.D. et al., *Molecular biology of the gene*, Menlo Parks, Benjamin/Cummings, 1987 ; *Molecular biology of the cell*, New York, Garland, 1983.

Pascal NOUVEL

→ ADN ; Biotechnologies ; Crick ; Information.

WEGENER Alfred, 1880-1930

Géophysicien et météorologue allemand. L'histoire de la « tectonique des plaques » est fort instructive. Due notamment au Canadien J. Tuzo Wilson, elle ne s'impose en effet au monde scientifique qu'à la fin des années 1960. Elle développe, pour l'essentiel, l'idée que la mince écorce qui enveloppe le globe est constituée de dalles plus ou moins vastes, ajustées en une gigantesque mosaïque ; ces dalles, loin d'être fixes, se meuvent à la surface sphérique du « manteau » de magma visqueux dans lequel leur base se trouve immergée.

Cette théorie revient à confirmer, en la complétant et en la rectifiant, l'hypothèse avancée par Alfred Wegener d'une « dérive des continents ». Or, ce n'est pas de scepticisme qu'il faut parler à propos de l'accueil qui avait été réservé à cette hypothèse, mais de rejet brutal et de dénigrement systématique. Respecté en tant qu'explorateur – il mourra en 1930 au cours d'une expédition au Groenland –, ce « Viking de la science », comme on l'a surnommé, avait le mauvais goût d'être météorologue et de formuler une hypothèse révolutionnaire dans un domaine qui relevait de la géophysique ! Impertinence supplémentaire : son hypothèse, développée en 1915 dans un maître-livre intitulé *La genèse des continents et des océans*, se fondait apparemment sur une vue spéculative concernant le tracé des côtes de l'Atlantique. Reprenant des observations antérieures faites notamment par un certain Antonio Snider (1858), puis, plus récemment, par les Américains W.H. Pickering, H.B. Baker et F.B. Taylor, il affirmait que l'Afrique et l'Amérique du Sud avaient été autrefois réunies en un même continent : l'« emboîtement » des côtes paraît, à distance, presque parfait, comme chacun peut le constater sur une simple carte. Accumulant les observations, il en vint ainsi à défendre, de façon très argumentée, l'idée que les deux continents s'étaient, au cours des âges, éloignés l'un de l'autre.

Wegener reconnaissait volontiers, encore en 1929, qu'il n'était pas en mesure d'expliquer le mécanisme moteur des déplacements continentaux ; en revanche, il faisait valoir l'extraordinaire fécondité de son hypothèse. Une nouvelle lumière était jetée sur la répartition actuelle et passée des plantes et des animaux, et en particulier sur les étonnantes affinités des fossiles

sud-américains et africains ; l'idée que l'on se faisait de l'évolution des climats et des causes des glaciations s'en trouvait bouleversée. Pourtant, lorsqu'un vaste débat fut organisé à New York en 1926 sur le sujet, la majorité des géologues présents couvrirent Wegener de sarcasmes. « Conte de fées » fut le diagnostic. Pendant quarante ans, l'hypothèse ne fut plus, presque nulle part, prise au sérieux.

La théorie de la « tectonique des plaques » a aujourd'hui irréfutablement établi la justesse des conceptions du météorologue berlinois. Assignant la « dérive » non aux seuls continents, mais à des « plaques » plus larges qui comprennent aussi les fonds océaniques, elle a résolu la question des forces de déplacement sur laquelle avait buté Wegener.

● *La genèse des continents et des océans. Théorie des translations continentales*, trad. A. Lernet, Paris, Nizet & Bastard, 1937.

► ALLÈGRE C., *L'écume de la Terre*, Paris, Fayard, 1983. – DEPARIS V. & LEGRAS H., *Voyage à l'intérieur de la Terre. De la géographie antique à la géophysique actuelle. Une histoire des idées*, Paris, CNRS Éditions, 2000. – SHWARZBACH M., *Wegener, le père de la dérive des continents*, trad. fr. E. Buffetaud, Paris, 1985.

Dominique LECOURT

→ Courant de convection ; Dérive des continents ; Expansion terrestre ; Tectonique des plaques.

WEIERSTRASS Karl Theodor Wilhelm, 1815-1897

Mathématicien allemand. Isolé dans les lycées de province allemands où il enseigne d'abord, Weierstrass ne publie son premier travail mathématique, sur les fonctions abéliennes, qu'en 1849. Dans les mémoires suivants de 1854 et 1856, sur le même sujet, il résout un problème central de la théorie, celui de l'inversion des intégrales hyper elliptiques, au moyen de ce qui deviendra un de ses outils de prédilection : la représentation d'une fonction arbitraire par une série convergente de puissances. Un tel mode d'approche, concurrent de celui de Riemann, fondé sur la différenciation complexe, gagnera l'adhésion de la majorité des mathématiciens au siècle suivant. En 1854, Weierstrass soutient son doctorat à l'université de Königsberg, mais il doit encore enseigner dans des classes élémentaires, à Breslau, jusqu'en 1856, date de sa nomination à l'université de Berlin, dont il devient aussi membre de l'Académie des sciences. Les cours qu'il dispensait deux fois par an à Berlin sur la théorie des fonctions, qu'elles soient réelles ou complexes, abéliennes ou elliptiques, ont pu être publiés de 1902 à 1927 dans la rédaction de disciples ou auditeurs (dont H.A. Schwartz, A. Hurwitz, S. Pincherlé). C'est par là que ses idées critiques sur les fondements de l'analyse ont été diffusées. Elles se résument dans l'impératif de rigueur, auquel Weierstrass donne un contenu strictement arithmétique. Il exige la généralité des concepts,

la systématisme dans l'enchaînement des propositions, la clarté dans les définitions : celles qu'il donne de la limite et de la continuité sont devenues communes aujourd'hui.

● *Gesammelte Abhandlungen*, 7 vol. ; vol. I-VI : Berlin, Mayer & Müller, 1894-1915 ; vol. VII : Leipzig, 1927.

► DUGAC P., « Éléments d'analyse de Karl Weierstrass », *Archive for History of exact sciences*, 1973, vol. 10, p. 41-176.

Alain MICHEL

→ Analyse complexe ; Local et global ; Topologie.

WEISMANN August, 1834-1914

Biologiste allemand. Chef de file de la défense de la théorie darwinienne de l'évolution par la sélection naturelle, Weismann crut possible de renforcer celle-ci au moyen de l'affirmation de la double thèse de la « panmixie » et de la « sélection germinale ». Dans le premier cas, Weismann soutient que le défaut d'usage d'un organe donné provoque non seulement la « rétrogradation de sa qualité », mais encore le mélange ou la coexistence de tous les degrés atteints par le phénomène dégénératif. Ainsi s'explique la disparition progressive de l'organe considéré sous l'effet de la sélection naturelle agissant sur les variations qui se manifestent dans les tendances héréditaires (*Anlagen*) et les combinaisons de « plasmas germinatifs » qui se forment lors de la reproduction sexuée (sens de la seconde thèse). Cette action de la sélection naturelle au sein même du plasma germinatif, support de l'hérédité localisé dans les chromosomes, prouve, selon Weismann, la fausseté de la théorie de l'hérédité des caractères acquis (la pangenèse darwinienne). Le même auteur avait préalablement affirmé que les changements provoqués par ces derniers ne sauraient affecter la « continuité » du plasma germinatif à travers les générations. La théorie de la continuité du plasma germinatif, qui fut sans doute la plus importante contribution de Weismann au développement de la pensée biologique (l'apport d'une explication cohérente de l'hérédité accordée à une compréhension nouvelle de la structure et de la fonction de la cellule), s'inspire en partie des travaux de F. Galton, de Gustav Jäger et du botaniste Nägeli. De même, les « biophores », constituants de base de la matière cellulaire, jouent-ils chez Weismann un rôle comparable à celui des « pangènes » de De Vries (bien que les premiers ne se mélangent pas aussi librement que les seconds). Weismann s'oppose en revanche à ses pairs sur la question fondamentale de la détermination de l'origine de la vie. Les propriétés vitales du protoplasme découlant, selon lui, de ses seules propriétés physico-chimiques, il en déduit que le premier protoplasme avait été formé par génération spontanée, bien que connaissant les travaux de Pasteur (reprenant ceux de Spallanzani) qui prouvent le contraire.

● *Essais sur l'hérédité et la sélection naturelle*, trad. fr. H. de Varigny, Paris, Reinwald & Cie, 1892 (parmi les essais que cet ouvrage contient nous citerons les suivants : *La durée de la vie*, 1881 ; *La vie et la mort*, 1883 ; *De l'hérédité*, 1883 ; *La continuité du plasma germinatif comme base d'une théorie de l'hérédité*, 1885 ; *La signification de la reproduction sexuelle pour la théorie de la sélection naturelle*, 1885 ; *La régression dans la nature*, 1886.

► CHURCHILL F.B. & ROBINSON G., *A Prelude to Genetics*, Kans, Lawrence, 1976. – PICHOT A., *Histoire de la notion de vie*, Paris, 1993, p. 361-906. – ROBINSON G., « Weismann », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1976, t. XIV, p. 233-239. – ROMANES G.J., *An Examination of Weismannism*, Chicago, 1893. – SCHLEIP W., « August Weismann's Bedeutung für die Entwicklung der Zoologie und allgemeinen Biologie », *Naturwissenschaften*, 22, 1934, 33-41.

Éric HAMRAOUI

→ Cellule ; De Vries ; Embryogenèse ; Évolutionnisme ; Gène ; Génération spontanée ; Lyssenkisme ; Plasma germinatif ; Sélection ; Vivant (Théorie du).

WEIZSÄCKER Carl Friedrich von, né en 1912

Physicien théoricien et philosophe allemand. Ami et élève de W. Heisenberg et de N. Bohr, il participe à la révolution des quanta, qu'il cherchera, par une interprétation hautement abstraite (théorie des Ure), à penser philosophiquement pour une description concrète de l'entiereté et de l'unité de la Nature.

Contributions majeures en astrophysique : sur la production d'énergie dans le Soleil, la naissance des planètes et galaxies, la théorie des masses des noyaux, leur isométrie, la double intégration bêta, la théorie de l'émission d'énergie des électrons, connue comme la formule de Weizsäcker-Williams (1933) qui présente l'expérience à choix retardé de Wheeler (1978). Son travail sur le cycle de carbone est resté comme la formule de masse de Bethe et Weizsäcker.

Sa *Théorie des Ure* (Trieste, 1972, in *Aufbau der Physik*, 1985) montre la matière comme émergeant à partir de l'information par des alternatives (oui/non). À l'instar de la relativité restreinte (équivalence matière-énergie), la théorie des Ure fournit une mesure absolue pour l'information, indiquant une équivalence Information-Énergie-Matière. La clé en est le rôle et la structure même du temps. Il prône une *Logique d'assertions temporelles* (l'effectivité du passé, la possibilité du futur) pour introduire la logique quantique dans les fondements de l'analyse, des mathématiques et de la logique générale.

● *Die Atomkerne. Grundlagen und Anwendung ihrer Theorie*, Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1937. – *Zum Weltbild der Physik*, Leipzig, S. Hirzel Verlag, 1943 ; 13^e éd. augmentée 2004, préface de H. Lyre ; trad. fr. *Le monde vu par la physique*, Paris, Flammarion, 1956 ; trad. angl. *The World View of Physics*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1952). – *Die Geschichte der Natur*, Stuttgart, S. Hirzel Verlag, 1948, 2^e éd. 1954 (trad. angl. F.D. Wiecek. *The History of Nature*, Chicago, Univ. of Chicago Press, 1949). – *Die Verantwortung der Wissenschaft im Atomzeitalter*, Göttingen, Vandenhoeck &

Ruprecht, 1957, 2^e éd. 1969. – *Bedingungen des Friedens*, Göttingen, Vandenhoeck & Ruprecht, 1963. – *Die Tragweite der Wissenschaft, J. Bd. Schöpfung und Weltentstehung*, Stuttgart, Hirzel, 1964 (trad. angl., *The Relevance of Science, I. Creation and Cosmogony*, New York, Evanston, Harper & Row, 1964, et Londres, Collins, 1964). – *Der ungesicherte Frieden*, Göttingen, Vandenhoeck & Ruprecht, 1969. – *The Unity of physics*, in : *Quantum Theory and Beyond* éd., T. Bastin, Cambridge, Univ. Press, 1971. – *Biologische Basis religiöser Erfahrung*, Suhrkamp, 1971. – *Die Einheit der Natur*, Studien, Munich, Hanser, 1971, et Munich, Deutscher Taschenbuch Verlag, 1974 (trad. angl., *The Unity of Nature*, New York, Farrar, Straus, Giroux, 1980). – *Fragen zur Weltpolitik*, Munich, Hanser, 1975. – *Wege in der Gefahr*, Munich, Hanser, 1976 (trad. angl., *The Politics of Peril*, New York, Seabury Press, 1978). – *Der Garten des Menschlichen. Beiträge zur geschichtlichen Anthropologie*, Munich, Hanser, 1977 (trad. angl., *Ambivalence of progress*, New York, Paragon House, 1988). – *Ein Blick auf Platon. Ideenlehre, Logik und Physik*, Stuttgart, Reclam, 1981. – *Der bedrohte Friede*, Munich, Hanser, 1981. – *Die Wahrnehmung der Neuzeit*, Munich, Hanser, 1983. – « Geometrie und Physik », in MAYR P. & SÜSSMANN G. éd., *Space, Time and Mechanics. Basic structure of a physical theory*, Dordrecht, D. Reidel, 1983, 39-86. – *Aufbau der Physik*, Munich, Hanser, 1985. – *Die Zeit drängt. Eine Weltversammlung der Christen für Gerechtigkeit, Frieden und die Bewahrung der Schöpfung*, Munich, Hanser, 1986 (trad. fr., *Le temps presse. Une assemblée mondiale des chrétiens pour la justice, la paix et la préservation de la création*, Paris, Le Cerf, 1987). – *Der Bewusstseinswandel*, Munich, Hanser, 1988. – *Bedingungen der Freiheit*, Munich, Hanser, 1990. – *Der Mensch in seiner Geschichte*, Munich, Hanser, 1991. – *Zeit und Wissen*, Munich, Hanser, 1992. – WEIZSÄCKER C.F. VON, DÜRR H.-P., FEINBERG E. & VAN DER WAERDEN B. L., *Werner Heisenberg*, Munich, Hanser, 1992. – GÖRNITZ T., GRAUDENZ D. & WEIZSÄCKER C.F., « Quantum Field Theory in the Framework of Quantized Binary Alternatives », *Intern. Journ. Theoret. Physics*, n° 31, 1992.

► DRIESCHNER M., *Carl Friedrich von Weizsäcker. Zur Einführung*, Hamburg, Junius, 1992. – GÖRNITZ T., *Carl Friedrich von Weizsäcker. Ein Denker an der Schwelle zum neuen Jahrtausend*, Fribourg-en-Brigau, 1992. – MARÉCHAL I.A., « Corps à corps avec l'impalpable », *Revue Phréatique*, 1993, n° 65-66, p. 78-81 ; « Plaidoyer pour une logique du temps », *Revue Phréatique*, 1994, n° 68-69, p. 7-14. – MEYER-ABICH K.M., *Physik, Philosophie und Politik. Festschrift für C.F. von Weizsäcker zum 70. Geburtstag*, Munich, Hanser, 1982. – SCHEIBE E. & SÜSSMANN G. éd., *Einheit und Vielheit*, Göttingen 1972 (bibliogr. complète jusqu'en 1972). – SCHÜZ M., *Die Einheit des Wirklichen. C.F. von Weizsäckers Denkweg*, Pfullingen, 1986. – WEIZSÄCKER C.F. VON, *Sur la spirale incessante*, in MARÉCHAL I.A., *Sciences et Imaginaire*, Paris, Albin Michel/La Cité des Sciences, 1994 ; *Carl Friedrich von Weizsäcker*, in PONGRATZ L.J. éd., *Philosophie in Selbstdarstellungen*, vol. II, Hamburg, F. Meiner Verlag, 1975, 342-390.

Ike Angela MARÉCHAL

→ Champ ; Quantique.

WHEWEL William, 1794-1866

Philosophe et historien des sciences anglais. Auteur d'importants travaux consacrés à l'explication du

phénomène des marées, Whewell est l'une des grandes figures de la science victorienne. Non moins dignes d'intérêt sont ses écrits d'histoire et de philosophie des sciences, et particulièrement les deux œuvres majeures que sont l'*History of the Inductive Sciences* (1837) et la *Philosophy of Inductive Sciences, Founded Upon Their History* (1840). Ce dernier ouvrage constitue, avec le *System of Logic* de Mill et le *Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy* de Herschel, l'un des chefs-d'œuvre de la pensée épistémologique de l'époque victorienne. Whewell montre en quoi l'étude des caractères généraux du développement historique de la science fait apparaître l'existence d'un mouvement constant allant de la compréhension imparfaite des faits au développement achevé des sciences reposant lui-même sur des fondements *a priori* ou « idées fondamentales » (*fundamental Ideas*). Il ressort de son analyse des caractéristiques du progrès scientifique que la plupart des avancées de la science se produisent à l'intérieur d'une « époque inductive » (*Inductive Epoch*) au sein de laquelle les pouvoirs de généralisation et d'explication d'une théorie scientifique affirment leur prééminence (d'où la fonction « paradigmatique » [Kuhn] de chaque « époque inductive »). De même que ses prédécesseurs Whewell affirme le rôle fondamental joué par la méthodologie inductive dans le développement de la connaissance scientifique. L'induction n'est cependant pas pour lui une forme d'inférence du particulier au général, mais un acte conceptuel conduisant à recueillir (*colligate*) un groupe de données empiriques sous une certaine idée. En outre, ainsi vouée à produire des vérités ou propositions échappant à toute confusion, l'induction possède une valeur démonstrative. Whewell affirme enfin le caractère intrinsèquement théorique de chaque science dans la mesure où toute collection de données empiriques requiert l'imposition d'une idée interprétative directrice.

« On the Nature of the Truth of the Laws of Motion », *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 5, 1834, 149-172. — *History of the Inductive Sciences*, 3 vol., 1837. — *The Philosophy of the Inductive Sciences, Founded Upon Their History*, 2 vol., 1840 (ouvrage dont la 3^e éd. paraît en 3 volumes séparés : *The History of Scientific Ideas*, 1858 ; *Novum organon renovatum*, 1858 ; et *On the Philosophy of Discovery*, 1860).

BLANCHÉ R., *Le rationalisme de Whewell*, 1935. — BUTTS R.E., « Whewell's Logic of Induction », in GIERE R.G. & WESTFALL R. éd., *Foundations of Scientific Method : The Nineteenth Century*, Bloomington (Ind.), 1973, 53-85 ; « Whewell », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1976, t. XIV, p. 292-295. — HESSE M., « Consilience of Inductions », in LAKATOS I. éd., *The Problem of Inductive Logic*, Amsterdam, 1968, 232-247. — LAUDAN L., « William Whewell on the Consilience of Inductions », *Monist*, 55, n° 3, 1971, 368-391. — MARCUCCI S., *L'« idealismo » scientifico di William Whewell*, Pise, 1963.

Éric HAMRAOUI

→ Découverte ; Fait ; Induction.

WHITEHEAD Alfred North, 1861-1947

Mathématicien, logicien et philosophe anglais. Il a vécu et enseigné d'abord à Cambridge et à Londres, puis à Harvard. Il est l'auteur d'ouvrages scientifiques, comme le *Traité d'algèbre universelle* (1898), et coauteur, avec Bertrand Russell, des *Principia Mathematica*. Dans *The Concept of Nature*, Whitehead entend « poser les bases d'une philosophie de la nature, qui est la présupposition nécessaire d'une physique théorique réorganisée » (préface). Il s'agit de mettre fin à la « bifurcation » qui s'est produite entre la nature « apparaissante » et la nature conçue par la science. La nature apparaissante n'est pas un songe, pas plus que la physique n'est une fiction : « Le rougeolement du coucher du soleil fait autant partie de la nature que les molécules et les ondes électriques par lesquelles les hommes de science expliquent le phénomène » (p. 29).

En 1929, Whitehead entreprend, dans l'« essai de cosmologie » que constitue *Process and Reality* (trad., *Procès et réalité*), d'interpréter « tous les éléments de notre expérience » : « La cosmologie doit rendre justice tout aussi bien à l'atomisme qu'à la continuité [...] » (*P.R.*, p. 382). Le « procès » est celui des « entités actuelles », seules réelles, qui l'effectuent dans leur « être-ensemble » (*togetherness*). Dans le procès interviennent également les « objets éternels », « purs potentiels de l'univers ». En définitive, si les données des sciences sont intégrées à la métaphysique spéculative whiteheadienne (par exemple dans la reprise spéculative de la notion de champ qui nous oblige à renoncer à la « localisation fallacieuse du concret »), elle s'étend bien au-delà de la science positive.

• *A Treatise of Universal Algebra*, Cambridge Univ. Press, 1988. — *The Concept of Nature*, Cambridge Univ. Press, 1920. — *Science and the Modern World*, New York, Macmillan, 1925 (trad. fr., *La science et le monde moderne*, Monaco, Le Rocher, 1994). — *Process and Reality* (1929) rééd., New York, Macmillan, 1978 (trad. fr., *Procès et réalité*, Paris, Gallimard, 1995). — *Adventures of Ideas*, New York, Macmillan, 1933 (trad. fr., *Adventures d'idées*, Paris, Le Cerf, 1993). — WHITEHEAD A.N. & RUSSELL B., *Principia mathematica*, Cambridge Univ. Press, I, 1910 ; II, 1912 ; III, 1913.

► CHRISTIAN W., *An Interpretation of Whitehead's Metaphysics*, New Haven, 1959. — DUMONCEL J.C., « Whitehead », *Encyclopédie philosophique universelle*, II, *Les notions philosophiques*, t. 2, Paris, PUF, 1992, p. 2929-2932 ; « La nature selon Whitehead : les permanences et le processus », *La Nature*, Actes du XXV^e Congrès de l'ASPFL, Lausanne, 1994. — HURTUBISE D., *Retire Whitehead. Les concepts de Dieu dans Process and Reality*, Sainte Foy, Presses de l'Université Laval, 2000. — LECLERC I., *Whitehead's Metaphysics*, Bloomington/Londres, 1958. — PARMENTIER A., *La philosophie de Whitehead et le problème de Dieu*, Paris, 1968. — RUST A., *Die organismische Kosmologie von Alfred N. Whitehead*, Frankfurt/Main, Athenäum, 1987. — STENGERS I. éd., *L'Effet Whitehead*, Paris, Vrin, 1994 ; *Penser avec Whitehead : une libre et sauvage création de concepts*, Paris, Le Seuil, 2002.

Maurice ÉLIE

→ Cercle de Vienne ; Induction complète ; Phénomène.

WITTGENSTEIN ET LE POSITIVISME LOGIQUE

C'est d'abord le Cercle de Vienne, les inventeurs et les promoteurs du « positivisme logique » qui se sont trouvés « face à Wittgenstein », ou plus exactement face au *Tractatus logicophilosophicus*, dont la première publication sous ce titre en anglais date de 1922. Date importante puisqu'elle marque l'arrivée à Vienne, venant de Kiel, de Moritz Schlick, physicien et philosophe dans la chaire de « Philosophie des sciences inductives » créée en 1895 pour Ernst Mach (1838-1916). C'est autour de Schlick, et pour commenter ce livre, que s'est constitué l'embryon du Cercle de Vienne. Le mathématicien Hans Hahn, le philosophe Rudolph Carnap et le sociologue Otto Neurath constituent en novembre 1928 l'« Association Ernst Mach », qui se mue en « Cercle de Vienne » lorsqu'elle publie en 1929 le *Manifeste* en faveur de « la conception scientifique du monde » offert par ses auteurs à Schlick pour fêter son retour d'une année universitaire passée à Stanford.

Wittgenstein figure avec Albert Einstein et Bertrand Russell parmi les « représentants principaux de la conception scientifique du monde » désignés par la « brochure jaune » à titre de garants et d'emblèmes. Le *Tractatus* se trouve cité dans le corps du texte comme ayant fourni quelques-unes des pierres angulaires de ladite « conception ».

Autant dire que lorsque Wittgenstein se retrouve face au positivisme logique, en un sens il se fait face à lui-même. Mais tout l'intérêt de la situation tient à ce qu'il ne se reconnaît pas dans l'image que lui renvoie le Cercle. Il s'y reconnaît si peu que, malgré des sollicitations pressantes, il refuse de s'associer aux travaux de ces « savants-philosophes » qui se réclament de lui. Il refuse de répondre aux questions d'épistémologie qu'on lui pose : il récite des poèmes de Rabindranath Tagore. Tout juste consent-il à engager quelque discussion avec Schlick en 1927, puis à expliciter sa pensée devant Friedrich Waissman au domicile du premier lors de brefs séjours à Vienne fin 1929-fin 1931.

Or à lire la retranscription de ces « entretiens », on ne peut manquer de noter que Wittgenstein ne s'adresse en fait qu'à lui-même par-dessus la tête de ses interlocuteurs. Il s'interroge essentiellement à haute voix sur celles des thèses qu'il a soutenues naguère et qui ont pu donner lieu à ce qu'il considère comme un malentendu dans l'interprétation donnée de sa pensée par les positivistes logiques. Toute l'œuvre ultérieure de Wittgenstein me paraît pouvoir être considérée comme un approfondissement de ce réexamen des principes de sa pensée initiale. Il n'aura cessé, en somme, de défaire le *Tractatus* !

Le voici qui, le 18 décembre 1929, déclare sur le mode de l'aveu avant d'indiquer pourquoi il n'adhère plus à cette conception : « J'ai cru auparavant qu'il y avait le langage courant, celui que nous tous parlons habituellement et une langue primaire qui exprime ce que nous connaissons véritablement, à savoir les phénomènes. » De fait, il s'agissait bien de l'un des thèmes

majeurs du *Tractatus*. On se reportera notamment à 4.0031 où il est dit : « Le mérite de Russell est d'avoir montré que la forme logique apparente de la proposition n'est pas nécessairement sa forme réelle. » Ce qui lui permettait de caractériser toute philosophie comme « critique du langage », puis (4.112) comme « clarification logique des pensées ». Telle apparaît bien la thèse majeure reprise par les positivistes logiques pour bâtir leur « conception scientifique du monde ». Le *Manifeste* définit le positivisme logique non comme une doctrine mais comme une « attitude » : « clarifier des problèmes et des énoncés, et non poser des énoncés proprement "philosophiques", constitue la tâche du travail philosophique. La méthode de cette clarification est celle de l'analyse logique ». Et c'est à Bertrand Russell qu'il y est fait aussitôt référence. Est-ce à dire que les positivistes logiques ont bien compris le *Tractatus* ? En un sens oui sur la question de la méthode, comme Wittgenstein le reconnaît maintenant ; en un autre sens, plus décisif : non. L'ambition affichée du Cercle de Vienne consiste, grâce à cette nouvelle méthode philosophique, à unifier les différentes branches du savoir, c'est-à-dire à aligner les « sciences de l'esprit » sur les sciences de la nature, et à « transformer rationnellement l'ordre social et économique ». Dans une célèbre lettre à son éditeur Ludwig von Ficker, Wittgenstein tenait un tout autre langage : l'intention profonde de son livre, écrivait-il, était « éthique ».

Il pensait avoir démontré que « sur ce dont on ne peut parler, il faut garder le silence » (7). Célèbre aphorisme qu'il faut mettre en relation avec ceux qui le précèdent immédiatement : « La solution du problème de la vie on la perçoit à la disparition de ce problème » (6.521) et « Il y a assurément de l'indicible. Il se montre, c'est le Mystique. » Que vise ici Wittgenstein ? La réponse ne fait guère de doute. Il s'agit des philosophes qui ont fait du « problème de la vie » la question centrale de la philosophie, et de ce « Mystique » le thème essentiel de leurs discours. Si l'on se souvient que Wittgenstein forme sa pensée avant la Première Guerre mondiale, on identifiera sans peine ces philosophes : les philosophes allemands de la Nature remis en honneur par W. Dilthey dans le cadre d'une philosophie de la vie présentée comme le fondement de toute connaissance. Qu'est-ce que le « Mystique » pour les « Naturphilosophen » sinon, l'union, la fusion du Moi et du Monde ? L'aboutissement même de la critique amorcée dès 1795 par Schelling de la « séparation » établie par la science « mécaniste » newtonienne entre l'homme et la nature, dont il s'agissait à leurs yeux de renouer l'antique alliance.

Face à ces penseurs, Wittgenstein ne niait pas qu'il y eût de l'inconnaissable, du Mystique, à la façon d'un rationaliste fermé. Mais il refusait que cet indicible fût l'objet d'un discours qui prétendit au nom de la philosophie en donner une connaissance. Lorsqu'ils le lisent et le reprennent, les membres du Cercle de Vienne amputent le *Tractatus* de son dernier aphorisme et choisissent leur citation : « Ce qui se laisse dire, se

laisse dire clairement. » Ils en font l'argument d'une virulente lutte contre « la métaphysique » sous la bannière de l'esprit des Lumières ; ils proposent « une manière de penser hostile à la spéculation et rivée à l'expérience ». Aux romantiques « visions du monde » (*Weltanschauung*), ils opposent une « conception du monde » (*Weltauffassung*) dont ils attendent qu'elle permette de « transformer rationnellement l'ordre social et économique ». Et lorsqu'ils évoquent la Vie, dans les dernières lignes du *Manifeste*, c'est en lui conférant, sous majuscule ironique, un sens sociologique : « Nous sommes témoins que l'Esprit de la conception scientifique du monde ne cesse de pénétrer davantage les formes de vie privée et publique, l'éducation, l'enseignement et l'architecture... La conception scientifique du monde sert la Vie et la Vie la reçoit. »

En un sens, on peut dire que sous le nom de « métaphysique » ils se donnent les mêmes adversaires que Wittgenstein. Carnap, dans son célèbre article sur le « dépassement de la métaphysique par l'analyse logique du langage » (1931), ne s'en prend pas seulement à Heidegger mais aussi à « Fichte, Schelling, Hegel et Bergson ». Il n'épargne Nietzsche que pour son *Zarathoustra*. Voici, écrit-il, un métaphysicien qui a compris que « les métaphysiciens sont des musiciens sans talent musical » et qui a « choisi non pas la forme mystificatrice de la théorie, mais ouvertement la forme de l'art, la poésie ». En un sens, on pourrait le trouver plus « libéral », ou tolérant, que Wittgenstein.

L'article publié six ans plus tôt par Schlick à titre de résumé de son ouvrage (*Théorie générale de la connaissance*) paru à Berlin en 1918 permet de préciser la position du Cercle. « On a souvent dit de la physique, d'ordinaire avec une intention de reproche, qu'elle ne tenait absolument aucun compte de l'aspect qualitatif du monde, et qu'elle érigeait à la place un édifice de formules et de concepts abstraits et vides. » Tel apparaît bien ce thème constant de la « Naturphilosophie » repris par Bergson, qui se trouve nommément visé quelques pages plus loin. Schlick : « Nous voyons maintenant qu'à cet égard les énoncés de la physique théorique ne diffèrent en rien de tous les autres énoncés de la vie quotidienne, pas plus que des énoncés des sciences de l'esprit. » Ne confondons pas, poursuit Schlick : lorsque à la connaissance des sciences exactes on oppose la « compréhension » des sciences de l'esprit, il ne faut pas faire passer ladite « compréhension » pour une connaissance ; il s'agit d'une « expérience vécue » qui n'a « absolument rien à voir avec la connaissance ». De façon générale, « si le métaphysicien n'aspire qu'à l'expérience vécue, sa demande pourrait être satisfaite par la poésie, ou l'art, ou la vie elle-même... Mais en voulant vivre l'expérience du transcendant, il confond vivre et connaître et, pris dans cette contradiction, il pourchasse des ombres creuses ». Les philosophèmes métaphysiques sont des poèmes conceptuels. Mais ce combat contre la résurrection du romantisme allemand sous les espèces d'une philosophie de la vie qui prétend fonder l'autonomie et la

suprématie des « sciences de l'esprit » sur une faculté d'intuition ou sur un mode compréhensif du connaître se prolonge en un programme positif : élaborer une théorie scientifique de la connaissance qui se serve de la « nouvelle logique » comme d'un rasoir d'Ockham, selon l'expression de Hans Hahn dans la perspective politique, militante, d'une science unitaire de tendance socialiste.

Wittgenstein ne s'exprimait nullement en ces termes condescendants et ironiques lorsqu'il évoquait l'exprimable ; il considérait que la deuxième partie de son livre – celle qui ne pouvait être écrite – était « la plus importante ». De plus, il incluait dans ce qui ne peut se dire – le Mystique – non seulement l'éthique (6.42. et 6.421) mais le rapport entre la logique et le monde. Ce rapport « se montre » lui aussi. Il n'y a rien à en dire. L'idée d'une « théorie de la connaissance » n'est pas seulement absente du *Tractatus* ; elle s'y trouve implicitement refusée. Le programme du Cercle de Vienne vu du *Tractatus* ne pouvait donc d'ores et déjà apparaître que comme une aberration et, lorsqu'il se réclamait de lui, comme une trahison.

Mais derrière la question du langage gît la question de la logique. Elle lui est directement associée dans l'entretien de décembre 1929 : « Notre langage est déjà parfaitement en ordre, si toutefois nous sommes au clair avec ce qu'il symbolise. Les langues autres que les langues usuelles ont également leur valeur, dans la mesure où elles nous montrent ce qu'elles ont en commun. Pour certains buts, par exemple : représenter des relations d'inférences, un symbolisme artificiel est très utile. En effet, Frege, Peano et Russell, dans la construction de la logique symbolique, n'ont jamais envisagé d'application qu'à la mathématique, sans songer à représenter des états de choses réels. » Ce qui est vrai de Peano, assurément, l'est peut-être moins de Frege ; c'est faux de Russell, comme Wittgenstein le reconnaîtra lui-même plus loin.

Toujours est-il qu'il s'agit d'un repentir radical pour quelqu'un qui avait lui-même présenté la logique comme le « miroir du monde ». On se souvient que le début du *Tractatus*, empruntant à l'épistémologie de Hertz et de Boltzmann, posait une « ressemblance » de nature logique – un isomorphisme – entre le « tableau » – ou « l'image » – que constituent la proposition et la réalité : « Ce que toute image, quelle qu'en soit la forme doit avoir de commun avec la réalité pour pouvoir proprement la représenter – correctement ou non – c'est la forme logique, c'est-à-dire la forme de la réalité » (2.18). Voilà aussi qui aurait pu mettre fin à toute discussion avec Schlick et Waismann, puisque le programme du Cercle reposait précisément sur la thèse contraire : la méthode de l'analyse logique devait, selon Carnap, permettre de reconstruire l'ensemble de nos énoncés à propos du monde en éliminant toutes les « entités superflues » imputables aux défauts du langage ordinaire.

L'aveu suivant de Wittgenstein n'est pas moins significatif, même s'il porte en apparence sur un point technique. Il concerne les aphorismes 2.1512 et

2.1512i du *Tractatus* : « L'image est comme une règle graduée appliquée à la réalité. Seuls les traits de division extrêmes touchent l'objet à mesurer. » « Maintenant, explique Wittgenstein, je ne parlerais pas ainsi comme si les traits de graduation étaient appliqués à un, mais je considérerais que c'est l'échelle tout entière qui l'est. En effet, les énoncés qui décrivent pour moi la longueur d'un objet forment un système, un système d'énoncés. Exemple : lorsque je dis que tel ou tel point dans le champ visuel est bleu, je sais non seulement cela, « mais aussi que ce point est non vert, non rouge, non jaune, etc. ». « L'échelle des couleurs, je l'ai appliquée tout entier d'un seul coup. » De fait, dans le *Tractatus* Wittgenstein posait que les énoncés élémentaires étaient indépendants les uns des autres. Cela voulait-il dire qu'il s'était rallié à l'« atomisme logique » de Bertrand Russell comme le croient les positivistes logiques qui pour leur part y adhèrent avec enthousiasme ? Nullement, car les « états de choses » dont il y est question ne sont pas identifiables à des « données sensibles » ; ce sont des éléments d'une construction abstraite qui correspondent à une « représentation » pensée en termes de *Darstellung* et non de *Vorstellung*. Le malentendu est donc complet lorsque les membres du Cercle croient pouvoir s'autoriser de Wittgenstein pour se mettre en quête des fameux « énoncés protocolaires » simples qui auraient pu se rapporter à des « éléments » sensibles empiriquement contrôlables. Le *Tractatus* pose que « Le monde est la totalité des faits, non des choses », et que les « faits dans l'espace logique sont le monde » (1.1). Parce que cet espace logique est « un canevas de construction de tous les faits possibles » (G.-G. Granger), il est clair que le « fait » est l'existence d'un « état de choses », lequel est lui-même une combinaison d'objets. Mais ces objets mêmes, objets simples (2.02) qui constituent la « substance du monde » (2.021), c'est-à-dire « ce qui subsiste indépendamment de ce qui a lieu » (2.024), sont les « formes stables » qui sont en définitive le « quelque chose de commun » entre le monde réel et le tableau qui le représente. C'est donc faire contresens d'y voir des données sensibles élémentaires et de ranger ainsi la pensée de Wittgenstein dans le champ des philosophies empiristes de la connaissance.

En formulant la critique de sa position antérieure, Wittgenstein ne se contente pas de dénoncer à mi-mots ce malentendu qui va plonger les membres du Cercle dans des discussions houleuses pendant encore des années. Il ouvre aussi à sa pensée une voie radicalement nouvelle : celle qui va lui permettre de reprendre la question du langage, et du même coup celle de la nature de la philosophie. La direction qu'il va suivre s'annonce déjà dans la conversation du 21 septembre 1931 : « Je crois à présent que comprendre n'est aucunement un processus psychologique particulier qui [...] vient s'ajouter à la perception de l'image de la phrase (*Satzbild*). Lorsque j'entends une phrase ou que je lis une phrase, il est vrai que divers processus se déroulent en moi. Émerge en moi quelque chose comme une image de représentation (*Vorstellungsbild*), il y a des

associations, et ainsi de suite. Mais tous ces processus ne sont pas ce qui m'intéresse ici. Je comprends la phrase dans la mesure où j'en fais usage. Comprendre n'est donc aucunement une démarche particulière, mais c'est opérer avec la phrase. »

L'exemple suivant nous fait basculer, par son style même, dans le monde des « Investigations philosophiques ». Il y a ici un flacon de benzine. À quoi cela me sert-il ? Eh bien à nettoyer. Maintenant, il y a là collée une étiquette avec l'inscription « benzine ». Eh bien pourquoi cette inscription est-elle là ? Je nettoie bien avec la benzine, mais pas avec l'inscription. Eh bien, cette inscription est un point d'application pour un calcul, à savoir pour l'usage. Je peux vous dire en effet : « Allez chercher la benzine ! » L'étiquette fait règle.

De la définition de la signification des énoncés par leur méthode de vérification, le passage se fait ici vers une définition par l'usage – leitmotiv des textes ultérieurs. Et déjà l'attention se fixe sur les règles dudit usage. Le dogmatisme du *Tractatus* a subi ses coups les plus décisifs. Le « grand miroir logique du monde » se trouve brisé. Ce n'est plus l'ordre supposé donné *a priori* des énoncés que scrute Wittgenstein, c'est leurs jeux, leur divinité et la nature de leurs règles. Le jeu d'échecs vient ainsi occuper le centre de la méditation.

Ce qui n'a pas toujours été aperçu par les tenants de la « philosophie analytique » apparaît ici en clair : ces interrogations sur les jeux du langage ont pour conséquence immédiate de relancer la question de la philosophie. Le 31 décembre 1931, Wittgenstein, après s'en être pris à Carnap, mentionne une phrase, un aphorisme qu'il avait écrit pour le *Tractatus*, mais qu'il n'y a pas inséré : « Les solutions des questions philosophiques ne doivent jamais en rien surprendre. En philosophie on ne peut rien découvrir. » Puis il commente : « C'est ce que pourtant je n'avais pas encore compris moi-même assez clairement et à quoi j'ai failli. » La sentence non publiée fait écho à l'un des thèmes répétitifs de Wittgenstein : en logique (et en mathématiques) on ne peut rien découvrir (*Tractatus* 6.1251. « Il ne peut jamais y avoir de surprises en logique »). La philosophie, est-il affirmé, ne produit aucune connaissance nouvelle ; elle n'est pas de l'ordre de la connaissance ; c'est une « activité », une activité d'éclaircissement des énoncés qui « n'ajoute » rien à ces énoncés.

Que la philosophie ne produise aucune connaissance au sens où les sciences de la nature en produisent, Wittgenstein ne variera pas sur ce point. Et elle restera à ses yeux une « activité ». Mais déjà il élargit le champ de cette activité. Dans la conversation de décembre 1931, la sentence non publiée prend une tout autre portée : « En réalité, nous disposons d'ores et déjà de tout et nous n'avons nul besoin d'attendre quoi que ce soit. Nous sommes dans la mouvance de la grammaire de notre langue usuelle et cette grammaire est déjà là. Nous avons donc tout déjà et n'avons nul besoin d'attendre l'avenir. »

Un rêve de clarté absolue, de transparence parfaite parcourt encore ce texte. Il cédera la place, lorsque

Wittgenstein posera la question décisive : sans doute la philosophie n'est-elle pas une science ; elle se présente comme « activité » qui s'exerce sur les jeux du langage ; mais cette activité elle-même n'est rien d'autre qu'un jeu de langage. Qu'est-ce donc que ce jeu-là ? Bénéficie-t-il de quelque privilège sur les autres ? Longtemps il semblera que ce soit le cas : la philosophie est dite « thérapeutique » ; elle semble donc bénéficier ainsi de quelque pouvoir normatif sur les autres jeux. Mais d'où peut lui venir l'idéal de la santé au regard de laquelle elle déclare ainsi la maladie ? Les derniers textes de Wittgenstein (*De la Certitude*) en viennent à soutenir une autre position : la philosophie est un jeu de langage où le langage se trouve mis « en vacance », écrit-il d'abord dans une veine qui reste de tonalité antimétaphysique : tournant à vide, le langage philosophique donne une illusoire impression de « profondeur » qui provoque le vertige. On avouera qu'être en vacance, ce n'est pas tout à fait la même chose qu'être malade. Mais pourquoi cette « vacance » ? Quel rôle joue ce jeu parmi les autres jeux dont il prélève ses propres éléments ? On conviendra qu'il y a quelque contradiction à dire ce jeu « en vacance » tout en continuant de présenter la philosophie comme une activité.

La réponse à cette question s'esquisse selon deux voies qui reconduisent à la confrontation de Wittgenstein avec les « philosophies de la nature », puis avec le positivisme logique : c'est de l'unité des jeux du langage qu'il s'agit. Mais cette unité, contrairement à ce que prétendaient les premiers, ne peut faire l'objet d'aucune connaissance absolue qui garantirait, en l'absorbant, dans un ordre cosmique qu'elle refléterait en elle-même, l'unité du sujet pensant ; cette unité ne saurait non plus, comme l'espéraient les seconds, se concevoir comme l'extension des règles du jeu de langage scientifique à tous les autres. Dans les deux cas, un jeu – le jeu philosophique – est supposé pouvoir « clore » les autres ; détenir le dernier mot. Pour ce Wittgenstein-ci il n'y a jamais de dernier mot. Pas de certitude absolue ; mais un jeu à l'infini dans une perspective d'unité jamais atteinte. Et cette perspective ne dessine jamais qu'un « horizon » dont Wittgenstein montre que la philosophie, si elle est pratiquée sans feindre d'être science ou connaissance d'un genre particulier, porte l'appel dans tous les jeux de langage, et donc dans toutes les formes de vie.

La carrière universitaire de Wittgenstein a été suffisamment chaotique pour qu'on ait dit et répété dans les milieux académiques qu'il avait à plusieurs reprises « abandonné » la philosophie. Ne s'est-il pas fait pendant des années l'instituteur très sévère des enfants d'Offertal, en Basse-Autriche, puis le jardinier d'un monastère, n'a-t-il pas ensuite consacré la meilleure part de son temps à l'architecture et construit à Vienne la fameuse maison de sa sœur ? Ne l'a-t-on pas vu, plus d'une fois, quitter Cambridge pour de longues retraites dans sa cabane norvégienne au nord de Bergen ? Cette thèse n'est guère conforme à la pensée la plus aiguë de celui auquel on l'applique : pour Wittgenstein, on ne

peut pas abandonner la philosophie, parce que la philosophie jamais ne vous abandonne. Parce qu'il n'est aucune forme de vie pour l'être humain qui ne soit tissée de langage, et parce que chaque individu est appelé à se tenir sous cet horizon, la philosophie le tient. Pour le pire s'il reçoit passivement des certitudes au nom d'un quelconque discours d'ordre et d'autorité qui dénie son motif philosophique – comme la science des positivistes et les sciences humaines et sociales y attenantes, ou s'il le réifie sous les espèces d'un Absolu, comme les philosophies de la nature et leurs avatars : énergétisme et autres théories « scientifiques » de l'ordre sur fond de désordre... Pour le meilleur, s'il incite chacun à venir buter sur les limites du langage établi pour en déplacer les horizons, au risque, inhérent à ce jeu, de se perdre. N'est-ce pas Wittgenstein qui écrivait que toute question philosophique est de la forme : « je ne sais plus où j'en suis » ?

● *Tractatus logico-philosophicus* (1921, préface de Russell), Londres, 1922 (trad. fr. Klossowski, Paris, Gallimard, 1961 ; nouv. trad. Granger, Paris, Gallimard, 1993). – *Wörterbuch für Volksschule*, Vienne, 1926 (trad. fr. de l'*Avant-propos du vocabulaire à l'usage des écoles primaires*, Marseille, Cometti, Sud, 1986). – *Carnets 1914-1916*, trad. Granger, Paris, Gallimard, 1971. – *Remarques philosophiques 1929-1930*, trad. Fauve, Paris, Gallimard, 1975. – *Le cahier bleu et le cahier brun 1933-1934 et 1935-1936*, trad. Goldberg & Sackur, Paris, Gallimard, 1996. – *Leçons et conversations 1938-1946*, trad. Chauviré, Paris, Gallimard, 1992. – *Grammaire philosophique 1931-1933*, trad. Lescouret, Paris, Gallimard, 1980. – *Remarques sur le rameau d'or de Frazer* (1931), trad. Lacoste, Genève, L'Âge d'Homme, 1982. – *Notes sur l'expérience privée et les sense data (1934-1936)*, trad. Rigal, Mauvezin, Ter, 1982. – *Remarques sur les fondements des mathématiques (1937-1944)*, trad. Lescouret, Paris, Gallimard, 1983. – *Fiches 1945-1948*, trad. Fauve, Paris, Gallimard, 1971. – *Remarques sur les couleurs 1949-1951*, trad. Granel, Mauvezin, Ter, 1983. – *Remarques mêlées 1914-1951*, trad. Granel, Mauvezin, Ter, 1984. – *De la certitude 1950-1951*, trad. Fauve, Paris, Gallimard, 1970. – *Remarques sur la philosophie de la psychologie*, trad. Granel, Mauvezin, Ter, 2 vol., 1989 et 1994. – *Investigations philosophiques*, trad. Klossowski, Paris, Gallimard, 1961.

► AYER A.J., *Wittgenstein's conception of philosophy*, Oxford, 1975. – BOUVERESSE J., *La rime et la raison*, Paris, Minuit, 1973 ; *Le mythe de l'intériorité*, Paris, Minuit, 1976 ; *La force de la règle*, Paris, Minuit, 1987 ; *Le pays des possibles*, Paris, Minuit, 1988 ; *Philosophie, mythologie et pseudo-science*, Paris, L'Éclat, 1991. – CAVELL S., *The claim of reason* (1979), trad. fr., *Les voix de la raison*, Paris, Le Seuil, 1996. – CHAUVIRÉ C., *Wittgenstein*, Paris, Le Seuil, 1989. – COMETTI J.P., *Philosopher avec Wittgenstein*, Paris, PUF, 1996. – GRANGER G.-G., *Invitation à la lecture de Wittgenstein*, Aix-en-Provence, Alinéa, 1990. – JANIK A. & TOULMIN S., *Wittgenstein, Vienne et la modernité*, Paris, PUF, 1978. – KENNY A., *Wittgenstein* (1973), Paris, Marabout, 1975. – KRIPKE S., *Règles et langage privé, introduction au paradoxe de Wittgenstein* (1982), Paris, Le Seuil, 1996. – LECOURT D., *L'ordre et les jeux*, Paris, Grasset, 1981. – LOCK G., *Wittgenstein, philosophie, logique, thérapeutique*, Paris, PUF, 1992. – MC GUINNESS B., *Les années de jeunesse* (1988), Paris, Le Seuil, 1991. – MONK R., *Wittgenstein le devoir de génie* (1990), Paris, O. Jacob, 1994. – PEARS D., *La pensée de Wittgenstein* (1971), Paris, Aubier, 1993. – POPPER K., ADORNO T.W.,

DAHRENDORF R., HABERMAS J., ALBERT H. & PILOT H., *De Vienne à Francfort la querelle allemande des sciences sociales* (1969), Bruxelles, Complexe, 1979. – SCHMITZ F., *Wittgenstein. La philosophie et les mathématiques*, Paris, PUF, 1988. – SCHULTE J., *Wittgenstein eine Einführung Lire Wittgenstein* (1989), Paris, L'Éclat, 1992. – SOULEZ A. dir., *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits*, Paris, PUF, 1985. – WRIGHT G.H. VON, *Ludwig Wittgenstein* (1982), Mauvezin, Ter, 1986.

Dominique LECOURT

→ Carnap ; Cercle de Vienne ; Naturphilosophie ; Objectivité ; Positivisme ; Proposition ; Rationalité ; Russell ; Wittgenstein.

WITTGENSTEIN Ludwig Joseph Johann,
1889-1951

Ludwig Wittgenstein, d'origine autrichienne puis naturalisé anglais, est l'un des philosophes les plus célèbres du XX^e s. Il est, avec Gottlob Frege (1848-1925), Bertrand Russell (1872-1970) et George Edward Moore (1873-1958), un des pères fondateurs de la philosophie analytique, avec laquelle son œuvre entretient des relations compliquées et conflictuelles : tant par rapport au logicisme – première période de la philosophie analytique, avec Frege et Russell, que par rapport au positivisme logique du cercle de Vienne, dont le premier ouvrage de Wittgenstein, le *Tractatus Logico-Philosophicus*, a inspiré la philosophie et que Wittgenstein a – avec méfiance – fréquenté au cours des années 1920 ; enfin par rapport à la « philosophie linguistique » d'Oxford et de Cambridge et le retour au langage ordinaire, philosophie dont il est, outre John Langshaw Austin (1911-1960), à l'origine ; philosophie dont le *Cahier Bleu* et les *Recherches philosophiques* constituent l'expression la plus remarquable. Il paraît juste de dire que si Wittgenstein a été à l'origine de ces courants, et plus largement à l'origine de la philosophie analytique elle-même, sa philosophie ne lui est pas réductible – qu'en fait, sa philosophie constitue un véritable minage préalable de ce que l'on entend à présent par « philosophie analytique ».

Premières années, études d'ingénieur,
intérêt pour la philosophie

Ludwig Joseph Johann Wittgenstein est né le 26 avril 1889, huitième et dernier enfant d'une des plus riches familles bourgeoises de Vienne. Son père, Karl, était une figure dominante de l'industrie sidérurgique. La famille était passionnée de culture et d'art, et leur fortune leur permettait de pratiquer le mécénat. Ludwig a été éduqué chez lui, au « Palais Wittgenstein » de l'*Alleegasse*, jusqu'à ses quatorze ans. Il a passé les trois années suivantes dans une école à Linz, puis a commencé ses études d'ingénieur le 23 octobre 1906 à la *Technische Hochschule* de Berlin-Charlottenburg, sans que l'on sache très bien la part jouée par le goût et par le devoir envers son père dans cette décision. Cela étant, le talent de Wittgenstein pour ce type

d'études, ainsi que son intérêt pour les sciences – ambigu, comme nous le verrons – de manière plus générale, ne fait aucun doute. Nous disposons d'une photo de Ludwig enfant, posant à côté d'une machine à coudre qu'il a lui-même construite, et ses biographies sont fécondes en anecdotes le décrivant réparant diverses machines. Wittgenstein se considérait comme n'ayant aucune idée originale ; comme n'étant que « reproductif » – ce qu'il attribuait à son ascendance juive. Étant adolescent il a lu Karl Kraus (1874-1936), Otto Weininger (1880-1903), Arthur Schopenhauer (1788-1860) et Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799). On retrouve chez Wittgenstein le style par aphorisme de ce dernier, ainsi que son idée que les erreurs viennent d'une mauvaise compréhension ou d'un mauvais usage du langage, ou s'y reflètent. D'où l'idée, également de Lichtenberg, qu'il suffit de trouver la tournure de phrase adéquate pour que le problème disparaisse, le « mot-clé » – on retrouve cette idée du mot salvateur pour les problèmes de la vie, dans les *Carnets préparatoires du Tractatus*. Il a lu Ernst Mach (1838-1916), qu'il n'aimait pas. Deux des livres qui l'ont le plus influencé sont les *Principes de la mécanique* de Heinrich Hertz (1854-1894) et les *Populaire Schriften* de Ludwig Boltzmann (1844-1906). Il a retenu des *Principes* la manière dont Hertz traite le concept mystérieux de force : réexposer l'ensemble de la physique newtonienne sans utiliser ce concept. Du coup, on n'aura pas répondu à la question « qu'est-ce qu'une force », mais nos esprits seront sortis de la frustration et cesseront de poser des questions illégitimes. Il citait cette phrase de Hertz « La tâche tout entière de la philosophie consiste à donner à notre expression une forme telle que certaines inquiétudes (ou problèmes) disparaissent. Il était fasciné par l'idée – kantienne – de Boltzmann selon laquelle nos modèles de la réalité sont créés par l'esprit et appliqués à l'expérience ; et pas, comme l'empirisme pourrait le croire, dérivés de l'expérience. Wittgenstein a repris son idée selon laquelle « à un même monde peuvent correspondre plusieurs hypothèses fondamentales – Ludwig les appelait des réseaux » (Brian McGuinness, *Wittgenstein*, t. 1 : *Les années de jeunesse*, p. 62).

Wittgenstein a passé deux ans à Charlottenburg, en études d'ingénieur. Son intérêt pour l'aéronautique, alors une science naissante, l'a amené (1908) à Manchester, où son idée était de construire un aéroplane qu'il aurait entièrement conçu. Il a travaillé aussi à la confection de cerf-volants au centre d'observation météorologique. Parallèlement, son intérêt passe des mathématiques appliquées aux mathématiques pures. Il suit des conférences de John Edensor Littlewood (1885-1977), sur la théorie de l'analyse mathématique. L'un des étudiants avec lesquels il discute de la question des fondements logiques des mathématiques lui fait connaître les *Principles of Mathematics* de Russell (1903). Il commence à s'intéresser aux problèmes soulevés par la théorie des ensembles, lit les *Grünge-setze* de Frege. Il trouve même une première solution en 1909, qu'il n'envoie pas à Russell directement mais

à un ami à lui, Philip Edward Bertrand Jourdain (1879-1919), mathématicien et historien des mathématiques, sans parvenir à les convaincre – ce type d'interrogation le poursuivra toute sa vie ; voir en particulier les *Remarques sur les Fondements des mathématiques*. Pour sa seconde année, il abandonne l'idée de la construction de l'avion, et se concentre sur les plans d'une hélice, tâche essentiellement mathématique et pour laquelle il reçoit une bourse (1910-11). Sa bourse est renouvelée, mais l'été 1911, il écrit le plan d'un livre de philosophie, et part voir Frege à Jéna, puis Russell à Cambridge. Russell, dont il suit les cours et devient rapidement l'intime, avec lequel il discute nuits et jours de logique – et de ses problèmes existentiels – finit par réussir à le convaincre qu'il est doué pour la philosophie.

Le *Tractatus Logico-Philosophicus* (1921)

Ce livre constitue, avec *Quelques remarques sur la forme logique*, et un dictionnaire, les seules publications de Wittgenstein de son vivant. Tout le reste a été publié à titre posthume, à partir de notes, soit de la main de Wittgenstein lui-même, soit de celles de ses étudiants pendant les cours ou transcrivant des souvenirs de conversations. On trouve dans les *Carnets* 1914-1916, ainsi que dans le *Tractatus*, écrit pendant la guerre, en partie en captivité, ce qu'il est convenu d'appeler la « première philosophie » de Wittgenstein. Ce livre est constitué d'une préface, de sept propositions principales, et de sous-propositions. La préface annonce que le livre traite des problèmes de la philosophie et cherche à montrer que la formulation de ces problèmes repose sur une incompréhension de la logique de notre langage. Le but du livre, nous dit Wittgenstein dans la préface, est de tracer des limites à la pensée : à l'expression des pensées, ce qui ne peut être fait que de l'intérieur. Ce qu'il y aura de l'autre côté ne sera que du non-sens. Sauf qu'en un sens important, il n'y a rien de l'autre côté : le livre trace la frontière de l'intérieur de l'expression (c'est la seule manière dont cela peut être fait). Comprendre cela revient à comprendre qu'il faut garder le silence sur ce dont on ne peut parler. Le corps du livre semble n'être que peu en rapport avec ces considérations : on y trouve notamment des considérations sur l'ontologie – le monde est composé d'états de choses, eux-mêmes composés d'objets entretenant des relations déterminées ; sur le langage et ce que c'est pour une proposition que d'avoir du sens – une proposition correspond à un état de choses, est vraie et fausse par rapport à cet état de choses qu'elle décrit, le sens étant lié à la possibilité du vrai et du faux ; sur la logique – il s'attache à expliquer les concepts de « fonction propositionnelle », « variable », « généralité », « identité », expose un nouveau symbolisme des « fonctions de vérité » qui est une première version, plus compliquée à utiliser, de la méthode des tables de vérité qu'apprend aujourd'hui tout étudiant en première année de logique ou de philosophie ; expose l'idée des vérités logiques comme

tautologies, décrit ce qu'est la « forme générale de la proposition ». Il écrit sur la place de la science, sur laquelle je reviendrai ; sur le solipsisme et le sujet comme limite du langage et limite du monde, comme « point inévident ». Le livre s'achève par un ensemble de remarques concernant l'éthique : l'éthique, tout comme la logique, est dite « transcendantale ». Il ne saurait y avoir de propositions éthiques (ni esthétiques ; éthique et esthétique « sont une »), parce que dans le monde, tout arrive comme il arrive, tout est au même niveau. S'il y a quelque chose comme une valeur, elle doit être en dehors du monde. Et ainsi le langage est impuissant à l'exprimer – ces remarques seront développées dans la *Conférence sur l'éthique* de 1930. Suivent des remarques sur la différence entre le monde de l'homme heureux et de l'homme malheureux (ce ne sont pas les faits qui changent, mais le monde lui-même qui devient tout autre) et le mystique, enfin une estimation de la seule méthode strictement correcte en philosophie : il s'agira de ne rien dire que ce qui peut être dit ; « les propositions des sciences de la nature, i.e. quelque chose qui n'a rien à voir avec la philosophie ; puis toujours, lorsque quelqu'un d'autre souhaiterait dire quelque chose de métaphysique, lui montrer qu'il n'a pas donné de signification à certains signes dans ses propositions » – seule manière d'amener le métaphysicien à comprendre qu'il croit dire quelque chose de signifiant là où en fait il ne dit rien du tout. Enfin, la proposition 6.54 explique comment l'auteur du livre doit être compris : il est compris si le lecteur a reconnu à la fin ses propositions elles-mêmes comme des non-sens, si le lecteur les a surmontées, un peu comme s'il rejetait une échelle après y être monté ; et voit alors le monde correctement. La proposition 7 clôt le livre en répétant d'une manière légèrement modifiée une formule de la préface : « Ce dont on ne peut parler, il faut le taire. »

Le *Tractatus* et la science

Le passage sur la seule méthode correcte en philosophie pose clairement le fait que la science est à la fois le seul modèle des propositions douées de sens et que ces propositions n'ont rien à voir avec la philosophie. Mais dès qu'on essaye de dire ou d'écrire quelque chose de métaphysique ou d'éthique, on n'aboutira qu'à du non-sens. Comment comprendre cela ? Il semble que la délimitation de l'expression des pensées de l'intérieur, délimitation dont nous avons vu qu'elle était le but du livre, aboutisse à ce résultat que le discours doué de sens, les propositions des sciences de la nature, perde son intérêt à nos yeux, tandis que ce qui se révèle être réellement important, les propositions métaphysiques et éthiques, nous soient interdites. On ne peut faire face à ce paradoxe qu'en voyant le livre comme cherchant à nous débarrasser de certaines illusions philosophiques et comme ayant un but éthique. Dans la préface, il avait écrit que le livre n'est pas un *Lehrbuch*, pas un livre d'enseignement : on n'y apprendra rien de nouveau, aucun fait, aucune

information nouvelle. Nous apprendre des choses nouvelles en ce sens, c'est ce que fait la science, ce n'est pas ce que fait la philosophie. Mais une des illusions dont il veut nous débarrasser est précisément celle selon laquelle la philosophie peut être cela. Et il pensait à cette époque que le seul langage doué de sens pouvait être celui construit sur le modèle de la proposition descriptive, vraie ou fausse par rapport à des états de choses – dont la proposition « scientifique » est un paradigme. Comme la philosophie et l'éthique ne peuvent être cela, alors elles passent de l'autre côté – du côté du non-sens, du côté de ce qui ne peut pas être dit. Ce n'est pas pour autant du mépris, ni pour la métaphysique ni pour l'éthique. Il a écrit à l'éditeur allemand Ludwig von Ficker (1850-1967) que le sens du livre est éthique, et que le livre se compose de deux parties : celle qui est présentée dans le livre, et celle qui n'y est pas – et c'est cette deuxième qui est « la partie importante ». « En bref, je crois que là où beaucoup aujourd'hui ne font que bavarder, j'ai réussi dans mon livre à tout mettre fermement en place en gardant le silence sur ce sujet. »

Le livre cherche à calmer notre besoin d'explications métaphysiques. Une des illusions dans lesquelles nous pouvons tomber est de croire que la science peut combler ce besoin. Wittgenstein nous met en garde contre cette confusion entre science et philosophie lorsqu'il écrit (4.111) que la philosophie n'est pas une des sciences de la nature : elle est « en-deça ou au-delà, mais pas à côté, des sciences de la nature ». Que se passe-t-il si on ne comprend pas cela ? Il l'exprime dans une formule lapidaire et dévastatrice : « Toute la conception moderne du monde repose sur l'illusion que les prétendues lois naturelles constitueraient les explications des phénomènes naturels » (6.371). Il rajoute que ces lois naturelles jouent le rôle que les anciens attribuaient à Dieu, mais qu'il préfère la conception des anciens, car elle posait une limite aux explications, alors qu'ici nous sommes dans l'illusion que tout doit pouvoir être expliqué. Dans son remarquable livre *The danger of words*, commentant ce passage, Maurice O'Connor Drury (1907-1976), l'un de ses plus proches disciples et amis, écrit que les explications scientifiques « nous conduisent indéfiniment d'une chose inexplicable à une autre. La construction grandit de plus en plus, et nous ne trouvons jamais vraiment d'endroit où s'arrêter. La clarté philosophique donne une fin à notre investigation et notre agitation en montrant que notre quête est en un sens erronée » (p. xii.). Les seuls problèmes qui sont de réelle importance, pour le *Tractatus*, sont les « problèmes de la vie » (*Lebensprobleme*) ; or (6.52) « Nous sentons que même si toutes les questions scientifiques possibles ont trouvé leur réponse, les problèmes de la vie n'ont toujours pas été effleurés. » Le *Tractatus* contient ainsi, non une critique de la science, mais une critique de l'importance déplacée que nous pouvons être tentés de donner aux explications scientifiques dans notre vie. Cela étant, cette importance n'est pas séparable de la pratique de la

science moderne telle que la voyait Wittgenstein et de sa place fondamentale dans notre culture.

Le « second » Wittgenstein, la science et l'apocalypse

Wittgenstein a d'abord estimé que son livre mettait un point final à la philosophie, et s'est tourné vers d'autres activités à caractère pratique au cours des années qui ont suivi la publication du *Tractatus*, comme par exemple être instituteur en Autriche, ou jardinier dans un monastère. Mais il n'a pas réellement coupé les ponts avec la philosophie, à laquelle il est revenu graduellement, et à la fin des années 1920, il est retourné à Cambridge, où il a par la suite enseigné jusqu'à la fin de sa carrière. Sa « seconde » philosophie nous est surtout connue à travers le *Cahier Bleu*, constitué de notes de cours qu'il a données à Cambridge, et des *Investigations philosophiques*, qui constitue sa seconde œuvre majeure. Ses idées avaient évolué dans le sens d'une attention portée aux phénomènes du langage lui-même, à ce qu'il appelait des « jeux de langage » et des « formes de vie ». Le caractère thérapeutique de la philosophie, déjà présent dans le *Tractatus*, s'y trouvait réaffirmé. Et dès son retour à Cambridge, au *Michaelmas Term* de 1930, nous trouvons dans ses cours une vision extrêmement noire de la philosophie, de son rapport à la science et d'une époque dominée par le scientisme. Il commence son cours en disant que la défaite de la philosophie, la perte de son halo, son « nimbus », est liée au fait qu'elle a trouvé sa méthode et qu'il y a maintenant des gens habiles, « *skilful* » en philosophie, et que la philosophie est réduite à cela, à des gens qui ont du talent (Wittgenstein a écrit ailleurs, dans une remarque de 1944, « Ce n'est que là où le génie est mince qu'on peut voir le talent », *Remarques mêlées*, p. 60) – c'est aussi comme cela que l'on est passé de l'alchimie à la chimie. Parmi toutes les méthodes possibles, une s'est imposée et écarte toutes les autres – là où il faudrait examiner toutes les méthodes à titre de possibilités. Et c'est là une caractéristique de notre époque : une époque de déclin de la culture. Ici l'influence de Oswald Spengler (1880-1936) est manifeste : une civilisation n'est rien d'autre qu'une culture atrophiée, et lorsqu'à une époque où s'exprime l'art (Principe de la Forme : l'histoire, la poésie et la vie) en succède une où la physique, les mathématiques et la mécanique dominant (Principe de la Loi : la physique, les mathématiques et la mort), on ne peut y voir que le déclin d'une culture, la transformation d'un organisme vivant en une structure morte, mécanique et répétitive. Dans une telle époque de déclin, où la science l'emporte, les fortes personnalités sont étouffées, laissées de côté, leur expression entravée. C'est exactement l'idée de Wittgenstein, qui reliait cela à l'unicité de la méthode adoptée.

Dans la première version d'une préface aux *Remarques philosophiques*, il met l'accent sur le contraste entre son esprit et l'esprit du temps, de la civilisation européenne et américaine – affirmation répétée

encore et encore ; et écrit qu'il se moque de l'appréciation qu'aura de son œuvre le « savant occidental type » – qui ne peut pas comprendre l'esprit dans lequel il écrit. Il rejette l'idée de progrès comme *forme* de notre civilisation, « typiquement constructive », qui élabore des structures de plus en plus compliquées, et qui subordonne la clarté à cette fin, alors que la clarté devrait être une fin en soi. L'idée de la construction est l'idée de l'établissement d'une fondation ferme à laquelle on ne touche plus une fois qu'on l'a posée, et sur laquelle on construit, à laquelle on rajoute au fur et à mesure des structures de plus en plus complexes. L'esprit de la philosophie est très différent : ce n'est pas un esprit qui construit, mais qui cherche à voir clairement les fondements ; ce que dans la préface définitive il marque par la différence entre appréhender le monde dans sa périphérie, dans sa diversité (construction), et l'appréhender dans son centre, son essence ; « effort pour clarifier et percer à jour toutes les structures » (*Remarques philosophiques*, p. 11). Après avoir évoqué la vision apocalyptique du monde, celle selon laquelle « les choses ne se répètent pas », il développe en écrivant qu'il n'est « pas dépourvu de sens » de voir cette époque scientifique et technique comme « le commencement de la fin de l'humanité », de voir cette idée de progrès comme nous aveuglant, et que la connaissance scientifique n'a « rien de bon ou de désirable » ; pire, qu'en la poursuivant, nous courons à notre perte (*RM*, p. 73). En 1946, il écrit que comme tout le monde pousse les hauts cris à propos de la bombe atomique, c'est qu'il y a forcément en elle quelque chose de bon. Ce qu'il y voit de bon, en fait, est « qu'elle nous fait apercevoir la fin, la destruction, de cette répugnante eau de vaisselle qu'est notre science » (*RM* p. 66).

On peut s'étonner d'une telle hostilité. Mais le type de bêtise et de prétention qu'il stigmatisait est toujours autant à l'œuvre. Dans les *Remarques sur le Rameau d'Or de Frazer*, il s'en prend à une anthropologie consistant à voir les superstitions des sauvages comme des erreurs – nous ne faisons plus ces erreurs, parce que nous, être civilisés, avons une compréhension de la nature qui leur est bien supérieure. Nous supprimons l'étonnement, facteur de mythologies, et le remplaçons par l'explication scientifique rationnelle. Mais pour Wittgenstein c'est précisément l'attitude de Frazer qui est la plus primitive ; attitude consistant à ne pas voir que notre propre langage, nos propres attitudes sont empreintes de mythologie et d'un caractère magique ; l'étroitesse d'esprit de Sir James George Frazer (1854-1941) consistant à être incapable de « comprendre une autre vie que la vie anglaise de son temps » (p. 30). La bonne attitude à adopter par rapport à cela n'est certainement pas un scientisme aveugle aux phénomènes qu'il prétend avoir dépassés. Surtout, ce scientisme supprime l'étonnement et le sens du merveilleux. Dans un essai de préface pour ses notes, Wittgenstein écrit « Il faudrait que la profondeur de la magie soit préservée. En effet ici, l'élimina-

tion de la magie a elle-même le caractère de la magie » (*Remarques sur le Rameau d'Or*, p. 23). Une meilleure attitude est celle consistant à chercher ce qui en nous nous donne l'accès à leurs comportements et croyance – et il est si facile de s'en barrer l'accès – ce qui, en nous, nous donne une idée du caractère énigmatique, mystérieux, merveilleux et parfois si sombre de la vie humaine.

● *Tractatus logico-philosophicus* (1921, préface de B. Russell), Londres, 1922 (trad. fr. P. Klossowski, Paris Gallimard, 1961, nouv. trad. Granger, Paris Gallimard, 1993). – *Quelques remarques sur la forme logique* (1929), trad. fr. E. Rigal, Mauvezin, TER, 1985. – *Wörterbuch für Volksschule*, Vienne, 1926 (trad. fr. de l'*Avant propos du vocabulaire à l'usage des écoles primaires*, Marseille, Cometti, Sud, 1986). – *Carnets 1914-1916*, trad. Granger, Paris, Gallimard, 1971. – *Remarques philosophiques 1929-1930*, trad. Fauve, Paris, Gallimard, 1975. – *Le cahier bleu et le cahier brun 1933-1934 et 1935-1936*, trad. Goldberg et Sackur, Paris, Gallimard, 1996. – *Leçons et conversations 1938-1946*, trad. Chauviré, Paris, Gallimard, 1992. – *Grammaire philosophique 1931-1933*, trad. Lescourret, Paris, Gallimard, 1980. – *Conférence sur l'éthique* (1930), *Remarques sur le Rameau d'Or de Frazer* (1931), *Cours sur la liberté de la volonté* (1939), trad. Cometti, Granel et Rigal, TER, 2001. – *Notes sur l'expérience privée et les sense-data (1934-1936)*, trad. Rigal, Mauvezin, TER 1982. – *Remarques sur les fondements des mathématiques (1937-1944)*, trad. Lescourret, Paris, Gallimard, 1983. – *Fiches 1945-1948*, trad. Fauve, Paris, Gallimard, 1971. – *Remarques sur les couleurs 1949-1951*, trad. Granel, Mauvezin, TER, 1983. – *Remarques mêlées 1914-1951*, trad. Granel, Mauvezin, TER, 1984. – *De la certitude 1950-1951*, trad. Fauve, Paris, Gallimard, 1970. – *Remarques sur la philosophie de la psychologie*, trad. Granel, Mauvezin, TER, 2 vol., 1989 et 1994. – *Investigations philosophiques*, trad. Klossowski, Paris, Gallimard, 1961.

► BOLTZMANN L., *Populäre Schriften*, Leipzig, J. A. Barth, 1905 ; *Theoretical physics and philosophical problems*, éd. B. McGuinness, Dordrecht/Boston, D. Reidel Publ. Co., 1974. – DRURY M., *The danger of words*, éd. R. F. Holland, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1973. – FREGE G., *Die Grundgesetze der Arithmetik*, Iéna, H. Pohle, 1893-1903, 2 vol. ; reprint. Hildesheim, G. Olms, 1 vol., 1962. – MALCOM N., *Ludwig Wittgenstein, A Memoir*, with biographical sketch by G. H. von Wright and Wittgenstein's letters to Malcom, Oxford, Clarendon Press, 2001. – MCGUINNESS B., *Wittgenstein I. Les années de jeunesse, 1889-1921* (1988), trad. Tenenbaum, Paris, Le Seuil, 1991. – MONK R., *Wittgenstein le devoir de génie* (1991), trad. fr. A. Gerschenfeld, Odile Jacob, 1994. – RUSSELL B., *The principles of mathematics*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1903 ; rééd. Londres, Allen & Unwin, 1938. – SPENGLER O., *Le déclin de l'Occident. Esquisse d'une morphologie de l'histoire universelle 1918 1922*, trad. M. Tazerout, 2 vol., Paris, Gallimard, 1948. – HERTZ H., *Die Prinzipien der Mechanik in neuern Zusammenhängen dargestellt*, éd. P. Lenard, Leipzig, J. A. Barth, 1894 ; trad. anglaise *The principles of mechanics presented in a new form*, Londres/New York, Mcmillan, 1899 ; rééd. avec intr. R. Cohen, New York, Dover, 1956. – WEININGER O., *Sexe et caractère 1903*, trad. D. Renaud, Lausanne, L'Âge d'homme, 1975.

Emmanuel HALAIS

→ Atomisme logique ; Carnap ; Catastrophisme ; Cercle de Vienne ; Concept ; Fait ; Forme ; Frege ; Logicisme ; Physicalisme ; Positivisme ; Preuve ; Proposition ; Vérification, Vérité ; Wittgenstein et le positivisme logique.

WOLFF Christian, 1679-1754

Philosophe allemand. Quelques années après sa nomination à un poste de professeur de mathématiques et de physique à l'université de Halle (1706), appuyée par la recommandation de Leibniz, Wolff publia l'ensemble de ses réflexions concernant la constitution des sciences mathématiques dans les *Anfangsgründe aller mathematischen Wissenschaften* (1710). L'affirmation de son intérêt pour la logique trouva de même son expression dans les *Vernünfftige Gedanken von den Kräften des menschlichen Verstandes* (1713). Enfin, les *Gedanken von Gott, der Welt und der Seele des Menschen* (1720) résumèrent le contenu de son enseignement philosophique attestant de l'influence dominante de la pensée de Leibniz. Wolff accordait en effet une importance centrale au principe de non-contradiction et de raison suffisante, ainsi qu'à la notion de possibilité. Son œuvre, pour une large part écrite en langue allemande (d'où la création d'un vocabulaire philosophique allemand), avait pour ambition de réaliser une synthèse entre la scolastique, les nouvelles méthodes d'analyse mathématique et les plus récentes théories scientifiques. Ce vaste système philosophique affirmant le caractère rationnellement déterminé des connexions entre les choses (*Cosmologia generalis*) donna le ton et produisit la forme dans laquelle les questions devaient être débattues par ses contemporains et les successeurs de Wolff jusqu'à l'époque du criticisme kantien. Un tel changement d'orientation de la pensée était déjà en particulier perceptible à travers la conception que Wolff se faisait de l'espace comme « phénomène » ontologiquement dérivé des substances corporelles qui coexistent en lui en état de mutuelle interaction, et du temps, réductible à l'ordre des choses successives dans une série continue.

● Œuvres allemandes : *Vernünfftige Gedanken von den Kräften des menschlichen Verstandes*, 1713. – *Auszug aus den Anfangsgründen aller mathematischen Wissenschaften*, 1717. – *Vernünfftige Gedanken von Gott, der Welt und der Seele der Menschen...*, 1720. – *Vernünfftige Gedanken von den Wirkungen der Natur*, 1723. – *Vernünfftige Gedanken von den Absichten der natürlichen Dinge*, 1724. – Œuvres latines : *Philosophia rationalis sive logica*, 1728. – *Philosophia prima, sive ontologia*, 1729. – *Cosmologia generalis*, 1731.

► BUCHDAHL G., « Wolff », *Dictionary of scientific Biography*, New York, 1976, t. XIV, p. 482-484. – CAMPO M., *Christian Wolff e il razionalismo precritico*, Milan, 2 vol., 1939. – ÉCOLE J., « Un essai d'explication rationnelle du monde ou la *Cosmologia generalis* de Christian Wolff », *Giornale di metafisica*, 18, 1963, 622-650 et « Cosmologie wolffienne et dynamique leibnizienne », *Études philosophiques*, n. s. 19, 1964, 3-9. – FRÄNGSMYR T., « Christian Wolff's Mathematical

Method », *Journal of the History of Ideas*, 36, 1975, 653-668. – VLEESCHAUWER H.J. DE, « La genèse de la méthode mathématique de Wolff », *Revue belge de philologie et d'histoire*, 11, 1931, 651-677.

ÉRIC HAMRAOU

→ Criticisme ; Leibniz ; Monisme.

YUKAWA Hideki, 1907-1981

Yukawa (né et mort à Kyoto, au Japon) a formulé une théorie des forces nucléaires de courte portée et a fondé la physique des particules sous-atomiques. Formé à l'université de Kyoto, il achève ses études à Osaka en 1938. Pendant les années 1930, Yukawa essaya de résoudre les contradictions des théories de la structure nucléaire mises en évidence par Chadwick et Heisenberg : si le noyau ne consistait qu'en des neutrons et des protons de charge positive, ces derniers se repousseraient sous l'effet de la force électromagnétique et le noyau serait instable. Pour résoudre ce paradoxe, Heisenberg avait suggéré l'existence d'une force d'échange qui lierait les protons entre eux à la manière d'une colle. En 1935, en analogie avec la théorie quantique de l'électromagnétisme, Yukawa élabore une théorie détaillée de la force proposée par Heisenberg : il s'agirait d'une force très intense mais de courte portée. Il propose l'existence d'une particule médiatrice pour cette force et prédit pour cette particule une masse environ 200 fois celle de l'électron, ou un neuvième de la masse d'un nucléon. En 1937, au laboratoire Pike's Peak (Colorado), Carl Anderson identifie une particule dans les traces des rayons cosmiques qui semble correspondre à cette description. Appelée plus tard le mu-méson (muon), cette particule interagit cependant trop rarement avec le noyau pour être la « colle » prédite par Yukawa. En 1947, le physicien anglais Cecil Powell découvre une particule plus massive, le méson pi (pion), qui se révèle posséder les propriétés de la particule prédite par Yukawa. En 1949, Yukawa devient le premier Japonais à recevoir le prix Nobel.

● *Creativity and Intuition : A Physicist Looks at East and West*, New York, Kodansha, 1973. – YUKAWA et al., *Supplement of Progress of Theoretical Physics*, n° 1, 1955, Kyoto, Yukawa Hall.

► BROWN L.M., « Yukawa's Prediction of the Meson », *Centaureus*, 25, 1981, 71-132.

John TRESCH et Simon WERRETT

→ Champ ; Corpuscule ; Virtuel.

L'astérisque * placé à la droite d'une entrée signale que le nom propre fait l'objet d'une notice dans le Corpus.

- Abel** Niels Henrik : Groupes et symétrie
Adams Charles Chase : Ecologie
Adanson Michel : Classification [Botanique] ; Taxinomie
Agassiz Louis Jean Rodolphe : Anatomie comparée ; Créationnisme ; Développement
Agricola (Georg Bauer, *dit*) : Fossile
Albert le Grand : Fossile
Alembert Jean Le Rond d'* : Automate ; Espace-temps
Alexandre d'Aphrodise : Nominalisme antique
Alfvén Hannes : Antimatière
Alhazen (Ibn al-Haytham) : Analyse et synthèse ; Image ; Iso-périmètre ; Vision
Alpher Ralph : Big bang
Amar Jules : Travail
Ames Bruce : Oncogène
Amontons Guillaume : Chaleur ; Gaz (Théorie des) ; Travail
Ampère André-Marie : Avogadro (Loi d') ; Éther
Anaxagore : Héliocentrisme
Anderson Carl : Antimatière ; Yukawa
Andrews Thomas : Gaz (Théorie des)
Andronov Aleksandr : Chaos et déterminisme
Anselme : Infini
Apollonius d'Alexandrie : Héliocentrisme
Arago François : Cristal
Archimède* : Méthodes infinitésimales
Archytas de Tarente : Pythagorisme
Arendt Hannah : Heidegger et la question de la technique
Argand Jean Robert : Analyse complexe
Aristarque de Samos : Héliocentrisme ; Théorie
Aristote* : Abstraction ; Analogie ; Atome ; Axiomatization et formalisation ; Catégories et foncteurs ; Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Concept ; Déduction ; Démonstration ; Dialectique ; Élément ; Espèce ; Expérience ; Force ; Forme ; Génération spontanée ; Géocentrisme ; Géométries ; Gravitation ; Hasard ; Héliocentrisme ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Infini ; Infini mathématique ; Loi de la nature ; Méthode ; Mouvement ; Nature (Système de la) ; Nécessité ; Origines de la vie ; Phénomène ; Proposition ; Technique ; Terre ; Vérité ; Vision
Arrhenius Svante* : Acide et base ; Chimie physique ; Électrochimie ; Sel
Astruc Jean : Réflexe
Augustin (saint) : Évolutionnisme ; Infini ; Loi de la nature
Aveling Edward : Marx et Darwin
Averroès (Ibn Rushd) : Impetus
Avery Oswald T. : Institut Rockefeller
Avicenne* (Ibn Sīnā) : Fossile
Avogadro Amedeo : Atome ; Avogadro (Loi d') ; Avogadro (Nombre d') ; Molécule ; Symbole
Babbage Charles* : Computation ; Informatique
Bachelard Gaston* : Complexité ; Continuité ; Découverte ; Dialectique ; Épistémologie ; Facteur d'échelle ; Foucault ; Idéalisme ; Meyerson ; Rationalisme ; Référentiel ; Rupture ; Simondon
Bacon Francis* : Duhem ; Expérience ; Expérience cruciale ; Loi de la nature ; Méthode ; Progrès ; Technique ; Test
Baer Karl Ernst von : Développement
Baer Reinhard : Extension
Baglivi Giorgio : Vitalisme et mécanisme
Banach Stefan : Analyse fonctionnelle
Barcan Marcus Ruth : Nécessité
Barthel Paul Joseph : Vitalisme et mécanisme
Bartholin Érasme : Cristal ; Lumière
Bataillon Eugène : Hybride
Bateson William : Eugénisme ; Gène ; Hybride
Baudelaire Charles : Progrès
Baumé Antoine*
Bayes Thomas : Induction ; Statistique
Bayle Pierre : Immatérialisme
Beauchamp Tom : Bioéthique
Becquerel Antoine : Cristal ; Electrochimie
Becquerel Henri* : Radioactivité
Becquerel Jean : Antimatière
Beijerinck Martinus Willem : Bactériophage
Bell John S. : Mesure en mécanique quantique ; Quantique
Beltrami Eugenio*
Benedetti Jean-Baptiste : Impetus
Benioff Victor Hugo : Tectonique des plaques
Bennett C.H. : Information et codage
Bergman Torbern Olof : Affinité ; Classification [Chimie] ; Molécule
Bergson Henri : Bergsonisme ; Localisations cérébrales ; Temps
Berkeley George* : Idéalisme ; Immatérialisme
Bernard Claude* : Cellule ; Déterminisme ; Régulation moléculaire ; Système ; Test ; Vitalisme et mécanisme
Bernays Paul : Formalisme
Bernier François : Molécule
Bernoulli Daniel : Crise de la physique moderne
Bernoulli Jacques : Induction complète ; Isopérimètre ; Probabilité [Logique] ; Statistique
Bernoulli Jean : Isopérimètre
Bertalanffy Ludwig von : Système
Berthelot Marcelin* : Synthèse
Berthollet Claude-Louis* : Affinité
Bertrand Marcel : Orogenèse
Berzélius Jöns Jacob : Avogadro (Loi d') ; Catalyse ; Electrochimie ; Liaison ; Molécule ; Symbole
Bichat Marie François Xavier* : Vitalisme et mécanisme
Bigelow Julian : Système

Biot Jean-Baptiste : Gaz (Théorie des)
 Black Joseph : Acide et base ; Chaleur ; Gaz
 Boèce : Nominalisme antique
 Boerhaave Hermann : Chaleur ; Éther
 Bogdanov Alexandre : Empirionisme
 Bohr Niels* : Complémentarité ; Controverse Bohr-Einstein ; Correspondance (Principe de) ; Déterminisme ; Mesure en mécanique quantique ; Observable ; Pauli ; Quantique ; Sommerfeld ; Thématas ; Théorie ; Virtuel
 Boltzmann Ludwig : Constantes physiques ; Corps noir ; Crise de la physique moderne ; Entropie ; Fin thermique de l'univers ; Indiscernabilité ; Irréversibilité ; Probabilité (Physique) ; Réel ; Temps
 Bolzano Bernard : Démonstration ; Ensemble ; Infini mathématique ; Vérité
 Bonnet Charles* : Développement ; Évolutionnisme ; Nature (Système de la)
 Bonnier Gaston : Écologie
 Boole George : Axiomatization et formalisation ; Computation ; Langages formels
 Bordet Jules : Bactériophage
 Boreau Théophile de : Vitalisme et mécanisme
 Borel Émile*
 Boué Ami : Métamorphisme
 Boule Marcellin : Teilhard de Chardin
 Bourbaki Nicolas* : Analyse fonctionnelle ; Ensemble ; Formalisme ; Structure
 Boussinesq Joseph : Courant de convection
 Boveri Theodor : Cellule
 Boyle Robert : Acide et base ; Alchimie ; Gaz ; Lumière ; Symbole
 Bragg William Lawrence : Cristal
 Brahe Tycho* : Comète ; Héliocentrisme
 Bravais Auguste : Cristal
 Brentano Franz von : Intentionnalité ; Phénoménologie
 Bridgman Percy W. : Opérationnalisme
 Briggs Henry*
 Brillouin Léon : Constantes physiques
 Broca Paul : Anatomie ; Hybride ; Localisations cérébrales
 Brønsted Johannes Nicolaus : Acide et base
 Broglie Louis de : Corpuscule ; Lumière
 Brongniart Adolphe-Théodore : Fossile ; Stratigraphie ; Subsidence
 Brouwer Luitzen Egbertus Jan : Constructivisme
 Brown Alexander Crum : Mole
 Brunelleschi Filippo : Géométries
 Brunetière Ferdinand : Scientisme
 Bruno Giordano* : Infini
 Brunschvicg Léon* : Idéalisme
 Bryan William J. : Créationnisme
 Buch Léopold de : Métamorphisme ; Orogenèse
 Buffon Georges-Louis Leclerc de* : Biogéographie ; Écologie ; Espèce ; Fossile ; Hybride ; Origines de la vie ; Phlogistique ; Taxinomie ; Terre ; Vivant (Théorie du)
 Bunge Mario* : Continuité ; Opérationnalisme
 Burdin Claude : Travail
 Burnet Franck Macfarlane : Bactériophage ; Immunologie

Callaghan Daniel : Bioéthique
 Calmette Albert : Institut Pasteur
 Candolle Alphonse de : Biogéographie ; Classification (Botanique) ; Écologie
 Candolle Augustin Pyramus de : Biogéographie ; Classification (Botanique) ; Écologie ; Taxinomie
 Canguilhem Georges* : Foucault ; Maîtrise de l'erreur ; Simondon ; Vie
 Cannizzaro Stanislao : Avogadro (Loi d') ; Molécule
 Cannon Walter B. : Information ; Régulation moléculaire
 Canton John : Éther

Cantor Georg* : Conjecture ; Ensemble ; Induction complète ; Infini mathématique ; Logicisme ; Réalisme ; Théorie ; Topologie
 Carangeot Arnold : Cristal
 Cardan Girolamo*
 Cary Warren : Expansion terrestre
 Carioles Gustave Gaspard de : Travail
 Carlisle Anthony : Électrochimie
 Carnap Rudolf* : Cercle de Vienne ; Nécessité ; Nominalisme moderne ; Objectivité ; Phénoménisme ; Physicalisme ; Positivisme ; Probabilité (Logique) ; Quine ; Rationalité ; Vérification ; Wittgenstein et le positivisme logique
 Carnot Lazare Nicolas Marguerite*
 Carnot Sadi* : Chaleur ; Crise de la physique moderne ; Énergétisme ; Entropie ; Fin thermique de l'univers ; Gaz (Théorie des) ; Probabilité (Physique) ; Temps
 Carpenter William : Développement
 Carrel Alexis : Institut Rockefeller
 Cartan Élie : Groupes et symétrie ; Local et global ; Structure
 Cartan Henri : Bourbaki
 Carter Brandon : Principe anthropique
 Cassirer Ernst : Criticisme
 Cauchy Augustin Louis* : Analyse complexe ; Analyse fonctionnelle ; Équation ; Éther ; Groupes et symétrie ; Local et global ; Topologie
 Cavailles Jean : Forme ; Théorie
 Cavalieri Bonaventura : Méthodes infinitésimales
 Cavendish Henry : Gaz
 Cayley Arthur : Géométries ; Transformation géométrique
 Cercle de Vienne* : Carnap ; Conventionnalisme ; Donné ; Épistémologie ; Fait ; Feigl ; Mach ; Neurath ; Objectivité ; Physicalisme ; Positivisme ; Pragmatisme ; Quine ; Réfutabilité ; Vérification ; Wittgenstein et le positivisme logique
 Chabry Laurent : Embryogenèse ; Régulation moléculaire
 Charcot Jean Martin : Automate
 Charles Michel : Transformation géométrique
 Chauveau Auguste : Travail
 Chevalley Claude : Bourbaki
 Childress James : Bioéthique
 Chomsky Noam : Informatique ; Récurrence
 Church Alonzo* : Computation ; Informatique ; Machine de Turing ; Monisme ; Récurrence
 Churchland Patricia Smith : Neurophilosophie
 Clairaut Alexis Claude*
 Clapeyron Émile : Carnot S. ; Entropie
 Clark Alfred J. : Récepteur
 Clausius Rudolf : Carnot S. ; Chaleur ; Chimie physique ; Crise de la physique moderne ; Entropie ; Gaz (Théorie des) ; Fin thermique de l'univers
 Clavey Étienne : Élément ; Fossile
 Cléments Frédéric Edward : Écologie
 Cohen Daniel : Biotechnologies
 Cohen Herman : Criticisme
 Colonna Fabio : Fossile
 Comte Auguste* : Continuité ; Crise de la physique moderne ; Découverte ; Élément ; Épistémologie ; Localisations cérébrales ; Loi de la nature ; Phénoménisme ; Positivisme ; Prudence ; Progrès ; Réel ; Scientisme ; Travail ; Vitalisme et mécanisme
 Condillac Étienne Bonnot de : Automate ; Système
 Condorcet Marie Jean Antoine Nicolas de Caritat, marquis de* : Progrès ; Vulgarisation
 Conybeare William : Stratigraphie
 Copernic Nicolas* : Bruno ; Héliocentrisme
 Corey Elias J. : Synthèse
 Coufomb Charles-Augustin : Cristal ; Travail
 Couper Archibald : Liaison
 Cournot Antoine-Augustin* : Hasard ; Travail

Cousin Victor : Enseignement des sciences
 Couturat Louis*
 Cowles Henry Chandler : Écologie
 Crick Francis* : ADN ; Biotechnologies ; Information ; Watson
 Curie Marie : Radioactivité
 Curie Pierre : Radioactivité
 Cuvier Georges* : Actualisme ou uniformitarisme ; Anatomie comparée ; Catastrophisme ; Fossile ; Muséum national d'histoire naturelle ; Stratigraphie ; Vivant (Théorie du)

Dafton John : Atome ; Liaison ; Matière ; Symbole
 Dana James Dwight : Dérive des continents ; Métamorphisme
 Dareste Camille : Embryogenèse
 Darwin Charles : Anatomie comparée ; Biogéographie ; Classification (Botanique) ; Contingence ; Créationnisme ; Darwinisme ; Développement ; Espèce ; Évolutionnisme ; Gaudry ; Gène ; Haeckel ; Huxley ; Lamarckisme ; Loi biogénétique fondamentale ; Lyell ; Lyssenkisme ; Marx et Darwin ; Miescher ; Sélection ; Sociobiologie ; Subsidence ; Taxinomie ; Théorie ; Vivant (Théorie du)
 Daubrée Auguste : Métamorphisme
 Dausset Jean : Biotechnologies
 Davidson Donald*
 Davy Humphry : Electrochimie ; Éther
 Davydoff Constantin : Embryogenèse
 Dedekind Julius Wilhelm Richard* : Cantor ; Ensemble ; Extension ; Induction complète ; Local et global
 Deiters Otto : Neurone
 Dejerine Joseph J. : Localisations cérébrales
 Delafosse Gabriel : Cristal
 Delbrück Max* : Bactériophage
 Delesee Achille : Métamorphisme
 De Luc Jean-André : Orogenèse ; Stratigraphie
 Démocrite : Atome ; Génération spontanée ; Gravitation ; Indiscernabilité ; Matière ; Vision
 Dennett Daniel Clement*
 Depéret Charles*
 Desargues Gérard (ou Gaspard) : Transformation géométrique
 Descartes René* : Analyse et synthèse ; Automate ; Cartésianisme ; Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Découverte ; Espace-temps ; Évidence ; Géométries ; Immatérialisme ; Inertie (Principe d') ; Leibniz ; Logique et informatique ; Loi de la nature ; Lumière ; Matière ; Nature (Système de la) ; Origines de la vie ; Réflexe ; Singularité ; Technique ; Terre ; Topologie ; Travail ; Vision ; Vitalisme et mécanisme
 Deshayes Gérard-Paul : Fossile
 Desmaret Nicolas : Métamorphisme
 Devillers Charles : Race
 De Vries Hugo* : Gène
 Dewey John : Pragmatisme ; Tectonique des plaques ; Vérité
 Diderot Denis : Matière ; Nomenclature ; Origines de la vie
 Dieudonné Jean : Bourbaki ; Structure
 Diodore Cronos : Nécessité
 Diophante : Analyse diophantienne
 Dioscoride : Classification (Botanique)
 Dirac Paul : Antimatière ; Quantique
 Dirichlet Peter Gustav ou Lejeune-Dirichlet P.G. : Analyse harmonique
 Döbereiner Johan : Classification (Chimie)
 Dobzhansky Théodore : Téléologie
 Doherty Peter : Immunologie
 Dolomieu Dieudonné : Terre
 Driesch Hans : Embryogenèse
 Du Bois Reymond Émile : Déterminisme ; Monisme ; Réflexe
 Dubos René : Institut Rockefeller
 Duhem Pierre* : Continuité ; Conventionnalisme ; Crise de la physique moderne ; Découverte ; Énergétisme ; Expérience ;

Expérience cruciale ; Fait ; Preuve ; Réalisme ; Réfutabilité ; Test ; Théorie ; Virtuel
 Dühring Karl Eugen : Marx et Darwin
 Dumas Jean-Baptiste : Atome ; Avogadro (Loi d') ; Classification (Chimie) ; Embryogenèse ; Enseignement des sciences
 Dummett Michael* : Vérité
 Dupin Charles : Travail
 Durocher Joseph : Métamorphisme

Eddington Arthur : Trou noir
 Ehrlich Paul : Récepteur
 Eilenberg Samuel : Catégories et foncteurs ; Extension
 Einstein Albert* : Big bang ; Bohr ; Champ ; Complémentarité ; Controverse Bohr-Einstein ; Corps noir ; Corpuscule ; Déterminisme ; Équivalence (Principe d') ; Espace ; Éther ; Expansion de l'univers ; Gravitation ; Indiscernabilité ; Lumière ; Masse ; Matière (Physique) ; Michelson ; Mouvement ; Observable ; Principe anthropique ; Quantique ; Relativité ; Temps ; Thématas ; Trou noir ; Univers ; Virtuel
 Élie de Beaumont Léonce : Métamorphisme ; Orogenèse ; Subsidence ; Terre
 Eliu Jacques : Technique
 Eledge Niels : Vivant (Théorie du)
 Empédocle d'Agrigente : Élément
 Engelhardt Hugo Tristram : Bioéthique
 Engels Friedrich : Dialectique ; Empirionisme ; Loi biogénétique fondamentale ; Lyssenkisme ; Marx et Darwin ; Travail
 Enriques Federigo*
 Épicure : Atome ; Vision
 Érasistrate : Anatomie
 Ératosthène : Fossile
 Eskola Pentti : Métamorphisme
 Euclide* : Axiomatization et formalisation ; Démonstration ; Géométries ; Infini ; Méthodes infinitésimales ; Vision
 Eudoxe de Cnide : Géométries ; Méthodes infinitésimales
 Euler Leonhard : Analyse diophantienne ; Espace-temps ; Groupes et symétrie ; Isopérimètre ; Terre ; Topologie

Fagon Guy-Crescent : Muséum national d'histoire naturelle
 Faraday Michael : Champ ; Electrochimie ; Éther
 Feigl Herbert* : Cercle de Vienne ; Physicalisme ; Wittgenstein et le positivisme logique
 Fermat Pierre de : Analyse diophantienne ; Géométries ; Induction complète ; Lumière
 Ferrier David : Localisations cérébrales
 Feyerabend Paul K.* : Continuité ; Expérience ; Expérience cruciale ; Validation
 Feynman Richard* : Corpuscule ; Renormalisation
 Fischer Ronald : Eugénisme ; Statistique
 Fitzgerald George Francis : Électron ; Éther
 Flahault Charles : Écologie
 Fleck Ludvik : Épistémologie ; Immunologie
 Flexner Simon : Institut Rockefeller
 Fiourens Pierre : Hybride
 Fodor Jerry : Rationalisme ; Sciences cognitives
 Fol Hermann : Embryogenèse
 Fontenelle Bernard le Bovier de : Révolution scientifique ; Vulgarisation
 Forbes Stephen Alfred : Écologie
 Fortoul Hippolyte : Enseignement des sciences
 Foucault Léon : Test
 Foucault Michel* : Paradigme
 Fourcroy Antoine François de : Muséum national d'histoire naturelle
 Fourier Joseph* : Analyse fonctionnelle ; Analyse harmonique
 Fournet Joseph : Métamorphisme
 François de La Marche : Impetus
 Frankland Edward : Liaison ; Valence

Franklin Benjamin : Éther
Fréchet Maurice : Analyse fonctionnelle
Frege Gottlob* : Abstraction; Axiomatisation et formalisation; Cercle de Vienne; Démonstration; Dummett; Formalisme; Langages formels; Logicisme; Logique et informatique; Monisme; Nominalisme moderne; Platonisme; Proposition; Wittgenstein
Freind John : Gaz
Frésenius : Analyse chimique
Fresnel Augustin : Éther; Lumière
Friedmann Alexander : Big bang
Fritsch Gustav : Localisations cérébrales

Galien de Pergame : Anatomie; Bioéthique; Râzi; Vision
Galilée* : Causalité (Principe de); Causalité classique; Expérience; Force; Héliocentrisme; Impetus; Inertie (Principe d'); Maîtrise de l'erreur; Marées; Mouvement; Objectivité; Technique; Temps; Terre
Gall Franz-Joseph : Localisations cérébrales
Gallo Robert : Sida
Galois Évariste : Équation; Extension; Groupes et symétrie
Galton Francis : Eugénisme; Race; Statistique
Galvani Luigi : Électrochimie; Neurone
Gamow George Anthony : Big bang; Principe anthropique
Gassendi Pierre : Molécule
Gaudin Marc Antoine : Cristal; Molécule
Gaudry Albert Jean* : Fossile; Teilhard de Chardin
Gauss Carl Friedrich* : Espace; Extension; Groupes et symétrie; Local et global; Maîtrise de l'erreur
Gay-Lussac Louis-Joseph : Gaz (Théorie des)
Gayling Willard : Bioéthique
Geber (Jâbir Ibn Hâyyan) : Alchimie
Geiger Hans : Rutherford
Gentzen Gerhard : Induction complète
Geoffroy Saint-Hilaire Étienne : Affinité; Anatomie comparée; Embryogenèse; Monstre
Geoffroy Saint-Hilaire Isidore : Hybride; Monstre
Gergonne : Transformation géométrique
Gerhardt Charles : Classification (Chimie)
Gesner Conrad : Fossile
Gibbs Josiah Willard : Affinité; Chimie physique
Giorgi Giovanni : Mole
Glisson Francis : Réflexe
Gmelin Leopold : Classification (Chimie)
Gobineau Arthur de : Race
Gödel Kurt* : Démonstration; Formalisme; Informatique; Logique et informatique; Réalisme; Réurrence
Goethe Johann Wolfgang von* : Développement; Naturphilosophie
Goldhaber Maurice : Antimatière
Goldschmidt Victor Moritz : Métamorphisme
Goldstein Kurt : Localisations cérébrales
Golgi Camillo : Neurone
Goltz Friedrich Leopold : Localisations cérébrales
Gonseth Ferdinand* : Idonéisme; Référentiel
Gonseth Jean-Paul : Référentiel
Goodman Nelson : Fait; Induction; Phénoménisme
Gosset William (alias Student) : Statistique
Gould Stephen Jay : Catastrophisme; Vivant (Théorie du)
Granger Gilles-Gaston : Langages formels; Virtuel
Grassmann Robert : Antimatière
Gray Asa : Créationnisme
Grégoire de Rimini : Nominalisme antique
Grimaldi Francesco-Maria : Lumière
Grisebach Augustin Heinrich : Biogéographie; Écologie
Grothendieck Alexander : Conjecture
Grotius Hugo : Loi de la nature
Grotthus Theodor : Électrochimie

Grubenmann Ulrich : Métamorphisme
Grünbaum Adolf : Fait
Guérin Camille : Institut Pasteur
Guillaume d'Ockham : Impetus; Nominalisme antique
Guillaume de Heytesbury : Nominalisme antique
Guldberg Cato-Maximilien : Affinité; Catalyse
Gurdon John : Clonage
Guyton de Morveau Louis-Bernard : Affinité; Phlogistique; Symbole

Habermas Jürgen : Scientisme
Hachette Jean-Pierre-Nicolas : Travail
Hacking Ian*
Hadamard Jacques* : Propagation
Haeckel Ernst* : Anatomie comparée; Biogéographie; Développement; Écologie; Embryogenèse; Loi biogénétique fondamentale; Plasma germinatif; Vivant (Théorie du)
Hahn Hans : Cercle de Vienne
Haldane John Burdon Sanderson : Origines de la vie; Sociobiologie
Hales Stephen : Gaz
Hall James : Subsidence
Hall Marshall : Réflexe
Haller Albrecht von : Développement
Halley Edmond : Comète
Hannover Adolph : Neurone
Hanson Norwood Russell* : Cercle de Vienne; Fait
Harris Rollin A. : Marées
Harvey William* : Anatomie; Van Leeuwenhoek
Hasse Hensel : Local et global
Haug Émile : Métamorphisme
Haüy René-Just : Cristal; Molécule
Hawking Stephen W. : Trou noir
Hebb Donald : Réflexe; Sciences cognitives
Heezen Bruce : Expansion terrestre
Hegel Georg Wilhelm Friedrich* : Dialectique; Naturphilosophie; Phénomène
Heidegger Martin : Heidegger et la question de la technique; Nature; Objectivité; Phénoménologie; Reproductibilité; Technique
Heisenberg Werner Karl : Complémentarité; Controverse Bohr-Einstein; Correspondance (Principe de); Déterminisme; Indiscernabilité; Observable; Themata; Virtuel; Yukawa
Helmholtz Hermann Ludwig von* : Crise de la physique moderne; Énergétisme; Monisme; Vision
Hempel Carl Gustav* : Induction
Henderson Lawrence J. : Régulation moléculaire
Hennig Willi : Classification (Botanique)
Hensel Kurt : Extension
Herbrand Jacques : Formalisme
Herder Johann Gottfried : Naturphilosophie
Hérelle Félix : Bactériophage
Héron d'Alexandrie : Automate
Hertwig Oscar : Hybride
Hertwig Richard : Hybride
Hertz Heinrich : Éther
Hess Harry Hammond : Courant de convection; Tectonique des plaques
Hicks W.M. : Antimatière
Hilbert David : Analyse fonctionnelle; Axiomatisation et formalisation; Cantor; Constructivisme; Démonstration; Extension; Formalisme; Géométries; Induction complète; Logique et informatique; Machine de Turing; Modèle; Réalisme; Structure; Turing
Hintikka Jaakko* : Nécessité
Hipparque : Héliocentrisme
Hippocrate : Bioéthique; Épidémie

Hironaka Heisuke : Singularité
Hitler Adolf : Eugénisme
Hitzig Eduard : Localisations cérébrales
Hobbs Thomas : Logique et informatique
Hoffmann Roald*
Holbach Paul Henri, baron d' : Matière
Hölder Otto : Extension
Holmes Arthur : Courant de convection; Tectonique des plaques
Homburg Wilhelm : Sel
Hooke Robert : Couleur; Éther; Fossile; Lumière
Hooker Joseph : Biogéographie
Hopf Heinz : Local et global
Hopkins W. : Terre
Hoyle Fred : Big bang
Hubble Edwin Powell : Constante de Hubble; Expansion de l'univers; Principe anthropique; Univers
Hull David : Évolutionnisme
Humboldt Alexandre de : Biogéographie; Écologie
Hume David* : Empirisme; Induction; Méthode; Reproductibilité
Husserl Edmund* : A priori; Continuité; Donné; Géocentrisme; Géométries; Intentionnalité; Phénoménologie; Scientisme; Transcendantal; Vision
Hutchinson George Evelyn : Écologie
Hutton James : Métamorphisme; Orogenèse; Terre
Huxley Julian Sorell : Théorie
Huxley Thomas Henry* : Actualisme ou uniformitarisme; Darwinisme; Développement; Embryogenèse; Évolutionnisme; Génération spontanée
Huygens Christiaan : Cartésianisme; Causalité classique; Couleur; Éther; Lumière

Ibn al-Haytham → Alhazn
Ibn Rushd → Averroès
Ibn Sinâ → Avicenne
Infeld Léopold : Observable
Irénée de Lyon : Loi biogénétique fondamentale
Ippen Johannes : Référentiel (Épistémologie)

Jackson Hughlings : Réflexe
Jacob François* : Bricolage; Monod; Régulation moléculaire
James William : Pragmatisme
Jean Buridan : Impetus; Inertie (Principe d'); Nominalisme antique; Terre
Jean Philopon : Impetus
Jennings Herbert Spencer : Loeb
Jerne Niels : Biotechnologies
Johannsen Wilhelm : Morgan
Jonsen Albert : Bioéthique
Jordan Camille : Groupes et symétrie
Joule James Prescott : Chaleur; Entropie; Fin thermique de l'univers; Gaz (Théorie des)
Juday Chancy : Écologie
Jung Jean : Métamorphisme
Jünger Ernst : Nature
Jussieu Antoine-Laurent de : Classification (Botanique); Muséum national d'histoire naturelle; Taxinomie
Jussieu Bernard de : Classification (Botanique)

Kâmil Abû : Analyse diophantienne
Kant Emmanuel* : Analogie; A priori; Concept; Criticisme; Dialectique; Donné; Empirisme; Espace-temps; Formalisme; Géométries; Idéalisme; Infini; Loi biogénétique fondamentale; Nécessité; Objectivité; Phénomène; Phénoménisme; Phlogistique; Rationalité; Révolution scientifique; Simondon; Transcendantal; Vérité; Vitalisme et mécanisme

Karaji (al-) : Analyse diophantienne
Kekulé Friedrich A. : Avogadro (Loi d'); Liaison; Molécule; Valence
Kelvin William : voir Thomson William
Kepler Johannes* : Gravitation; Héliocentrisme; Image; Inertie (Principe d'); Lumière; Terre; Themata; Vision
Khayyâm (al-) : Équation
Khâzin (al-) : Isopérimètre
Khuwârizmî (al-) : Analyse diophantienne; Équation
Kiellmeyer Karl Friedrich von : Développement
Kircher Athanasius : Terre
Kirwan Richard : Phlogistique
Kleene S. : Machine de Turing
Klein Felix : Géométries; Groupes et symétrie; Local et global; Modèle; Structure; Transformation géométrique
Koch Robert* : Spengler
Köhler Wolfgang : Forme
Köhler Ivo : Référentiel
Kölliker Albrecht von : Embryogenèse; Neurone
Kolmogorov Andreï Nikolaïevitch : Information et codage; Méthode; Probabilité (Logique)
Kovalevski Alexandre : Embryogenèse
Koyré Alexandre* : Expérience
Kramers Hendrik : Correspondance (Principe de)
Krebs Hans Adolf*
Kreisler Georg : Formalisme
Kripke Saul Aaron : Nécessité
Kronecker Leopold : Cantor; Constructivisme; Extension
Kruhl Wolfgang : Local et global
Kuhn Thomas Samuel* : Cercle de Vienne; Continuité; Découverte; Épistémologie; Expérience; Expérience cruciale; Foucault; Paradigme; Réfutabilité; Reproductibilité; Révolution scientifique; Rupture; Simondon; Théorie; Validation
Kummer Ernst : Extension

Lagallois Julien : Réflexe
Lagrange Joseph Louis de : Analyse diophantienne; Crise de la physique moderne; Equation; Espace-temps; Groupes et symétrie
La Hire Philippe de : Transformation géométrique
Lakatos Imre : Continuité; Corroboration; Expérience; Expérience cruciale; Réfutabilité; Topologie; Validation
Lamarck Jean-Baptiste-Pierre-Antoine de Monet de* : Catastrophisme; Espèce; Fossile; Lamarckisme; Théorie; Vivant (Théorie du)
Landau Edmund : Analyse non standard
Landsteiner Karl : Institut Rockefeller
Lang Karl Nikolaus : Fossile
Langevin Paul* : Electron
Langley John Newport : Récepteur
Laplace Pierre-Simon* : Chaos et déterminisme; Déterminisme; Éther; Marées; Probabilité (Logique); Progrès; Réel; Trou noir
Larmor Joseph : Antimatière; Electron; Éther
Lashley Karl : Localisations cérébrales
Laue Max Theodor Felix von* : Cristal
Laurent Auguste : Atome; Avogadro (Loi d'); Cristal
Lavoisier Antoine-Laurent* : Acide et base; Élément; Gaz; Liaison; Matière; Nomenclature; Phlogistique; Sel; Symbole; Travail
Lavrov Piotr : Marx et Darwin
Le Bel Achille : Stéréochimie
Lebesgue Henri : Analyse fonctionnelle
Le Dantec Felix : Scientisme
Le Douarin Nicole : Embryogenèse
Legendre Adrien Marie : Analyse diophantienne
Leibniz Gottfried Wilhelm* : Analogie; Analyse et synthèse;

A priori; Automate; Axiomatization et formalisation; Causalité classique; Démonstration; Déterminisme; Équation; Évidence; Évolutionnisme; Forme; Fossile; Génération spontanée; Idéalisme; Indiscernabilité; Infini; Infini mathématique; Logique et informatique; Méthode; Mouvement; Nécessité; Origines de la vie; Preuve; Rationalisme; Technique; Terre; Topologie; Travail; Vérité; Virtual; Vitalisme et mécanisme

Lamaitre Georges: Big bang; Expansion de l'univers; Trou noir
Lémery Louis: Monstre
Lémery Nicolas: Acide et base; Affinité; Élément; Gaz
Lénine: Empirionisme
Léonard de Pise: Équation
Léonard de Vinci: Fossile
Lepachinskaia Olga: Génération spontanée
Lessing Gotthold Ephraïm: Loi biogénétique fondamentale
Leucippe: Atome
Leuret François: Anatomie
Lewis C. Irving: Nécessité
Lewis Gilbert Newton: Acide et base
Lhwyl Edward: Fossile
Li Tien-Yien: Chaos et déterminisme
Libavius Andreas: Fossile; Sel
Liceti Fortunio: Hybride
Lie Sophus: Groupes et symétrie; Structure
Liebig Justus von: Écologie; Naturphilosophie
Lindeman Raymond Laurel: Écologie
Linné Carl von: Biogéographie; Classification [Botanique]; Écologie; Espèce; Taxinomie; Vivant (Théorie du)
Littre Émile: Positivisme
Lloyd Geoffrey: Expérience
Lobatchevski Nikolaï I.: Beltrami; Structure
Locke John: Immatérialisme
Loeb Jacques*: Institut Rockefeller
Lorentz Hendrik Antoon: Électron; Espace-temps; Éther
Lorenz Edward: Chaos et déterminisme; Déterminisme
Lorenz Konrad: Évolutionnisme; Sociobiologie
Loschmidt Josef: Avogadro (Nombre d')
Lotka Alfred James: Écologie
Lucrèce: Atome; Liaison
Lukasiewicz Jan: Forme
Lwoff André*: Bactériophage; Régulation moléculaire
Lyell Charles Antony*: Actualisme ou uniformitarisme; Lamarckisme; Métamorphisme; Sélection; Subsidence
Lyssenko Trofim D.: Lyssenkisme

Mac Arthur Robert Helmer: Écologie
Mac Lane Saunders: Catégories et foncteurs; Extension
MacCullagh James: Éther
Mach Ernst*: Cercle de Vienne; Crise de la physique moderne; Déterminisme; Empirionisme; Énergétisme; Espace; Maîtrise de l'erreur; Masse; Meyersoni; Objectivité; Positivisme; Réel; Statistique
Macquer Pierre-Joseph: Gaz; Molécule; Phlogistique
Magendie François: Réflexe
Malebranche Nicolas: Évolutionnisme; Génération spontanée; Immatérialisme
Malthus Thomas Robert: Marx et Darwin; Sélection
Malus Étienne-Louis: Cristal; Éther
Marat Jean-Paul: Corpuscule
Marcus Trivisano: Gravitation
Marey Étienne Jules: Automate; Mesure
Marie Pierre: Localisations cérébrales
Maritain Jacques: Scientisme
Marsile d'Inghen: Impetus
Marx Karl: Dialectique; Lyssenkisme; Marx et Darwin; Théorie; Travail
Mather John: Singularité

Matthew Patrick: Sélection
Maupertuis Pierre Louis Moreau de: Monstre
Maxwell James Clerk*: Avogadro (Nombre d'); Champ; Constantes physiques; Corps noir; Déterminisme; Électron; Entropie; Éther; Gaz (Théorie des); Gravitation; Lumière; Matière (Physique)
May Robert: Chaos et déterminisme
Mayow John: Gaz
Mayr Ernst*: Taxinomie; Vivant (Théorie du)
Meckel Johann Friedrich: Anatomie comparée; Développement
Meinong Alexius: Intentionnalité
Meltzer Samuel J.: Institut Rockefeller
Mendel Johann Gregor*: De Vries; Gène; Génétique; Hybride; Lyssenkisme; Théorie; Vivant (Théorie du)
Mendeleev ou Mendeleïev Dimitri I.: Chimie physique; Classification (Chimie); Élément
Merleau-Ponty Jacques*
Merleau-Ponty Maurice: Vision
Metchnikoff Illia Ilitch*
Meyerson Émile*
Michell John: Trou noir
Michelson Albert Abraham*
Miescher Johann Friedrich*: ADN
Milhaud Gaston: Conventionnalisme
Mill John Stuart*: Éther; Induction; Méthode; Précaution
Miller George: Sciences cognitives
Millikan Robert A.: Avogadro (Nombre d')
Milne Edwards Henri: Développement
Milnor John: Singularité
Minkowski Hermann: Espace-temps; Local et global; Relativité; Univers
Möbius Karl August: Écologie; Topologie
Molyneux William: Vision
Monge Gaspard: Transformation géométrique
Monod Jacques*: Institut Pasteur; Régulation moléculaire; Téléologie; Théorie
Montagnier Luc: Sida
Moore George Edward: Platonisme
Morgan Thomas Hunt*: Gène; Génétique; Lyssenkisme; Régulation moléculaire
Morin Edgar: Complexité
Moro Lazzaro: Actualisme ou uniformitarisme; Orogenèse
Morris Henry M.: Créationnisme
Morse Marston: Singularité
Müller Johannes: Cellule; Vision
Myer Johann Friedrich: Gaz

Nagel Ernest*: Réductionnisme
Nägeli Carl: Gène; Génération spontanée
Napier John: Briggs
Navier Claude-Louis: Travail
Needham John Turberville: Micro-organisme
Neumann Johannes (dit John) von: Analyse fonctionnelle; Automate; Computation; Information; Informatique; Machine de Turing; Monisme
Neurath Otto*: Cercle de Vienne; Conventionnalisme; Physicallisme; Vérification
Newton Isaac*: Affinité; Alchimie; Alembert; Causalité (Principe de); Causalité classique; Champ; Clairaut; Comète; Constantes physiques; Corpuscule; Couleur; Découverte; Déterminisme; Équivalence (Principe d'); Espace; Éther; Expérience cruciale; Force; Gaz; Gravitation; Hasard; Inertie (Principe d'); Leibniz; Liaison; Lumière; Marées; Masse; Méthodes infinitésimales; Mole; Mouvement; Naturphilosophie; Origines de la vie; Parcimonie; Réel; Singularité; Temps; Théorie; Transformation géométrique; Univers; Virtual; Vision
Neyman J.: Maîtrise de l'erreur; Test

Nicholson William: Électrochimie
Nicolas de Cues: Impetus; Infini
Nicole Oresme: Local et global
Nicolle Charles*: Institut Pasteur
Nietzsche Friedrich: Nature
Niggli Paul: Métamorphisme
Nobel Alfred*: Prix Nobel des sciences
Novalis: Naturphilosophie

Odum Eugen P.: Écologie
Oersted Hans Christian: Éther; Naturphilosophie
Oken Lorenz: Développement
Oort Jan: Comète
Oparin Alexandre Ivanovitch: Origines de la vie
Oppel Albert: Fossile
Oppenheimer Julius Robert: Trou noir
Orbigny Alcide d': Fossile; Stratigraphie
Ostwald Wilhelm: Analyse chimique; Chimie physique; Crise de la physique moderne; Énergétisme; Entropie; Fin thermique de l'univers; Mole
Owen Richard: Anatomie comparée; Développement

Palissy Bernard: Fossile
Pander Christian: Embryogénèse
Pappus: Analyse et synthèse
Paracelse*: Analogie; Élément; Sel; Symbole; Vitalisme et mécanisme
Paré Ambroise: Hybride
Pascal Blaise*: Induction complète; Logique et informatique; Transformation géométrique
Paschen Friedrich: Sommerfeld
Pasteur Louis: Biotechnologies; Cristal; Épidémie; Génération spontanée; Institut Pasteur; Micro-organisme; Origines de la vie; Pasteur contre Pouchet; Stéréochimie
Pauli Wolfgang*: Indiscernabilité
Pavlov Ivan Petrovitch*: Réflexe
Peano Giuseppe: Axiomatization et formalisation; Langages formels
Pearson Ego Sharpe: Test
Pearson Karl: Crise de la physique moderne; Eugénisme; Statistique
Peirce Charles Santiago Sanders*: Abduction; Langages formels; Pragmatisme; Proposition; Réalisme; Vérité
Penrose Roger: Mesure en mécanique quantique
Penzias Arno: Big bang
Perrin William Henry: Synthèse
Perrin Jean: Avogadro (Nombre d'); Mole
Pflüger Eduard: Génération spontanée; Réflexe
Philolaos: Pythagorisme
Philopon: Gravitation; Inertie (Principe d')
Piaget Jean*: Continuité; Rationalisme; Système
Pierre Abélard: Nominalisme antique
Planck Max*: Constantes physiques; Corps noir; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre); Quantique
Platon*: Anatomie; Dialectique; Gravitation; Héliocentrisme; Nature (Système de la); Phénomène; Platonisme; Principe anthropique
Plücker Julius: Singularité
Poincaré Jules Henri*: Axiomatization et formalisation; Cantor; Conjecture; Conventionnalisme; Crise de la physique moderne; Espace-temps; Fin thermique de l'univers; Formalisme; Induction complète; Irréversibilité; Marées; Masse; Théorie; Topologie; Vérification
Polya Georg: Computation
Poncelet Jean Victor: Transformation géométrique
Popper Karl Raimund*: Cercle de Vienne; Conjecture; Conventionnalisme; Corroboration; Découverte; Épistémologie; Expérience; Expérience cruciale; Fait; Induction; Méthode;

Nominalisme moderne; Rationalisme; Rationalité; Réfutilité; Reproductibilité; Test; Théorie; Validation
Porphyre: Nominalisme antique
Porta Giambattista: Taxinomie
Post Emil Léon: Machine de Turing; Réurrence
Pouchet Félix Archimède: Pasteur contre Pouchet
Powell Cecil: Yukawa
Prévost Constant: Orogenèse
Prévost Jean-Louis: Embryogénèse
Preyer Wilhem: Embryogénèse
Præsent I.: Lyssenkisme
Priestley Joseph: Gaz; Phlogistique
Prigogine Ilya: Temps
Prochaska Georges: Réflexe
Proust Joseph Louis: Berthollet
Prout William: Classification (Chimie); Élément
Prusiner Stanley: Prion
Pruvost Pierre: Subsidence
Ptolémée Claude*: Géocentrisme; Héliocentrisme; Isopérimètre; Vision
Purkinje Jan: Neurone
Putnam Hilary*: Pragmatisme; Réalisme; Réductionnisme
Pythagore*: Géométries; Héliocentrisme; Platon; Pythagorisme

Quételet Adolphe: Statistique
Quine Willard van Orman*: Abduction; Abstraction; Conventionnalisme; Duhem; Expérience; Expérience cruciale; Fait; Nécessité; Nominalisme moderne; Objectivité; Pragmatisme; Réalisme; Test; Théorie; Vérification; Vérité
Ramon y Cajal Santiago: Neurone
Ramsey Frank Plumpton: Combinatoire; Induction
Rankine William John M.: Énergétisme
Raoult François Marie: Chimie physique
Rathke Martin: Anatomie comparée
Rayleigh John William Strutt: Courant de convection
Rāzī Abū Bakr Mohammed Ibn Zakariyya*
Redi Francesco: Micro-organisme; Origines de la vie
Reichenbach Hans: Induction; Méthode
Remak Robert: Cellule; Embryogénèse; Neurone
Renan Ernest: Progrès; Scientisme
Renevier Eugène: Stratigraphie
Renouvier Charles: Déterminisme
Rey Abel: Crise de la physique moderne
Riemann Bernhard: Analyse complexe; Conjecture; Local et global
Riesz Frigyes: Analyse fonctionnelle
Riley Charles Valentine: Écologie
Rimbaud Arthur: Progrès
Rockefeller John Davison: Institut Rockefeller
Romé de L'Isle Jean-Baptiste: Cristal; Molécule
Römer Ole: Lumière
Roques Maurice: Métamorphisme
Rorty Richard: Pragmatisme
Rosenbusch Karl: Métamorphisme
Rostand Jean: Hybride
Rouelle Guillaume-François (dit Rouelle l'Aîné): Acide et base; Phlogistique; Sel
Rous Peyton: Institut Rockefeller
Roux Wilhelm*: Embryogénèse; Régulation moléculaire
Rozenbaum Willy: Sida
Ruelle David: Chaos et déterminisme
Ruffini Paolo: Groupes et symétrie
Rumford Benjamin Thompson, comte de: Chaleur; Courant de convection
Russell Bertrand*: Abstraction; Atomisme logique; Axiomatization et formalisation; Cercle de Vienne; Concept;

Donné; Fait; Forme; Induction complète; Langages formels; Logicisme; Phénomène; Proposition; Vérification; Vérité; Wittgenstein et le positivisme logique
Rutherford Ernest*: Radioactivité

Sainte-Claire Deville Henri: Avogadro (Loi d')
Saussure Horace-Bénédict de: Orogenèse
Say Jean-Baptiste: Travail
Scheele Carl Wilhelm: Gaz; Sel
Schelling Friedrich: Développement; Hegel; Naturphilosophie
Scheuchzer Johann Jakob: Fossile
Schimper Andreas Franz Wilhelm: Écologie
Schleiden Mathias Jakob*: Cellule; Naturphilosophie
Schlick Moritz: Cercle de Vienne; Donné; Vérification; Wittgenstein et le positivisme logique
Schmidt Erhard: Analyse fonctionnelle
Schönflies Arthur Moritz: Cristal
Schopenhauer Arthur: Nature
Schreier Otto: Extension
Schrödinger Erwin*: Complémentarité; Mesure en mécanique quantique; Temps; Themata
Schuster Arthur: Antimatière
Schwann Theodor*: Cellule; Neurone; Plasma germinatif
Schwarzschild Karl: Trou noir
Scopes John T.: Créationnisme
Sederholm Jacob J.: Métamorphisme
Sée Camille: Enseignement des sciences
Sennert Daniel: Molécule
Serres Étienne Renaud Augustin: Anatomie comparée; Développement
Setchenov Johann: Réflexe
Sextus Empiricus: Méthode
Shannon Claude Elwood: Complexité; Information et codage; Système
Sherrington Charles Scott*: Réflexe
Simon Herbert A.: Complexité; Computation
Simondon Gilbert*: Analogie; Bachelard; Bergsonisme; Canguilhem; Complémentarité (physique); Complexité; Heidegger et la question de la technique; Information (biologie); Information et codage; Kant; Kuhn; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre); Paradigme; Système; Technique; Teilhard de Chardin; Vitalisme et mécanisme
Simpson George Gaylord: Actualisme ou uniformitarisme; Fossile
Skinner Burrhus Frederic: Réflexe
Slater John: Correspondance (Principe de)
Slipher Vesto: Expansion de l'univers
Smart John Jamieson Carswell*
Smith William: Fossile; Stratigraphie
Snyder Hartland: Trou noir
Socrate: Platon
Soddy Frederick: Radioactivité
Sommerfeld Arnold Johannes Wilhelm*: Quantique
Spallanzani Lazzaro*: Micro-organisme
Spencer Herbert*: Développement; Évolutionnisme; Progrès; Sélection; Sociobiologie
Spengler Carl*
Spinoza Baruch: Causalité (Principe de); Infini; Nature
Stahl Georg Ernst*: Gaz; Matière; Phlogistique; Vitalisme et mécanisme
Staudinger Hermann: Molécule
Steiner Jacob: Isopérimètre
Steinitz Ernst: Extension
Sténon Nicolas: Fossile; Métamorphisme; Orogenèse; Stratigraphie
Stent Gunther: Téléologie
Stokes George Gabriel: Éther

Strabon: Fossile; Gravitation
Strawson Peter Frederik: Induction
Suess Édouard: Orogenèse
Sutherland Earl: Récepteur
Swammerdam Jan: Développement; Réflexe

Takens Floris: Chaos et déterminisme
Tansley Arthur Georges: Écologie
Tarski Alfred: Vérité
Taylor Frederick Winslow: Automate
Teilhard de Chardin Pierre*: Simondon
Temin Howard: Rétrovirus
Terman Lewis: Race
Thabit Ibn Qurra: Infini mathématique
Thalès de Milet: Géométries; Héliocentrisme
Théon d'Alexandrie: Isopérimètre
Thiele J.: Valence
Thom René: Chaos et déterminisme; Forme; Singularité; Virtuel
Thomas Bricot: Nominalisme antique
Thomas d'Aquin: Analogie; Causalité classique; Loi de la nature
Thompson Benjamin: Éther
Thompson Sir d'Arcy W.: Forme
Thomson Joseph John: Électrochimie; Électron
Thomson William (lord Kelvin): Chaleur; Crise de la physique moderne; Entropie; Fin thermique de l'univers; Terre
Threlfall William: Local et global
Tiedemann Friedrich: Anatomie comparée; Développement
Torricelli Evangelista: Méthodes infinitésimales
Toulmin Stephen: Bioéthique; Cercle de Vienne
Tournefort Joseph Pitton de: Classification (Botanique)
Townsend John Sealy Edward: Électron
Turgot Anne Robert Jacques: Progrès
Turing Alan Mathison*: Cognitivisme; Complexité algorithmique; Computation; Information et codage; Informatique; Logique et informatique; Machine de Turing; Monisme; Récurrence; Sciences cognitives
Tusi (al): Équation
Twort Frederick W.: Bactériophage

Unzer Johann August: Réflexe

Valentin Robert: Neurone
Valéry Paul: Complexité; Système
Van't Hoff Jacobus Henricus: Chimie physique; Électrochimie; Mole; Stéréochimie
Van Der Waals Johannes Diderik: Gaz (Théorie des)
Van Fraassen Bas*: Fait; Symétrie
Van Helmont Jean-Baptiste: Gaz
Van Leeuwenhoek Antonie*: Micro-organisme; Neurone
Varela Francisco: Sciences cognitives
Vaucanson Jacques de: Automate
Vavilov Nicolaï I.: Lyssenkisme
Verhulst Pierre-François: Écologie
Vernadsky Vladimir: Écologie
Vicq d'Azyr Félix: Anatomie comparée
Villard Paul Ulrich: Électron
Vincent de Beauvais: Fossile
Virchow Rudolf: Cellule; Génération spontanée; Vitalisme et mécanisme; Vivant (Théorie du)
Virey Julien-Joseph: Hybride
Vitruve: Maîtrise de l'erreur
Volta Alessandro: Électrochimie; Liaison
Waage Peter: Affinité; Catalyse
Wagner Rudolph: Réflexe

Weissmann Friedrich: Vérification; Wittgenstein et le positivisme logique
Wallace Alfred Russell: Biogéographie; Lyell; Sélection
Warming Eugenius: Biogéographie; Écologie
Warynski Stanislas: Embryogenèse
Watson James Dewey*: ADN
Watson Jim: Biotecnologies
Watson John: Réflexe
Watt James: Chaleur
Weaver Warren: Complexité
Weber Heinrich: Extension; Local et global
Weber Wilhelm: Antimatière
Wegener Alfred*: Dérive des continents; Expansion terrestre; Tectonique des plaques
Weierstrass Karl Theodor Wilhelm*: Analyse complexe; Local et global; Topologie
Weil André: Bourbaki; Conjecture; Structure
Weismann August*: Cellule; Embryogenèse; Évolutionnisme; Gène; Génération spontanée; Lyssenkisme; Plasma germinatif; Vivant (Théorie du)
Weitz Morris: Concept
Weizsäcker Carl Friedrich von*
Werner Abraham Gottlob: Stratigraphie
Weyl Hermann: Constructivisme; Structure
Wheeler John Archibald: Trou noir
Whewell William*: Éther; Fait
Whiston William: Terre
Whitehead Alfred North*: Cercle de Vienne; Induction complète; Phénomène
Whytt Robert: Réflexe
Wiener Norbert: Automate; Complexité; Information; Régulation moléculaire; Système
Wilhelmy Ludwig Ferdinand: Catalyse
Williamson Alexander: Chimie physique
Willis Thomas: Réflexe
Willmut Ian: Clonage

Wilson Edward O.: Écologie; Écologie comportementale; Race; Sociobiologie
Wilson Robert: Big bang
Witschi Emil: Embryogenèse
Wittgenstein Ludwig*: Atomisme logique; Catastrophisme; Cercle de Vienne; Concept; Dummett; Fait; Forme; Logicisme; Nominalisme moderne; Physicalisme; Platonisme; Positivisme; Preuve; Proposition; Vérification; Vérité; Wittgenstein et le positivisme logique
Wöhler Friedrich: Synthèse
Wolff Caspar Friedrich: Évolutionnisme
Wolff Christian*: Monisme
Wolff Étienne: Embryogenèse
Wollman Eugène: Bactériophage
Woodward John: Fossile; Terre
Woodward Robert Burns: Synthèse
Wrgmann Eugène: Métamorphisme
Wright Thomas: Trou noir
Wundt Wilhelm Max: Vision
Wurtz Adolphe: Avogadro (Loi d'); Liaison; Molécule

Xénophane de Colophon: Fossile

Yersin Alexandre: Institut Pasteur
Yorke James A.: Chaos et déterminisme
Young Thomas: Éther
Yukawa Hideki*

Zahar Élie: Corroboration; Réfutabilité
Zeeman Christopher: Singularité
Zeki Semir: Localisations cérébrales
Zénonodre: Isopérimètre
Zénon d'Élée: Dialectique; Géométries; Infini
Zermelo Ernst: Axiomatization et formalisation; Fin thermique de l'univers; Induction complète; Infini mathématique; Langages formels

L'astérisque * placé à la droite d'une entrée signale que le nom propre fait l'objet d'une notice dans le Corpus.

- abduction*** : Induction ; Peirce
abstraction*
abstrait mathématique : Abstraction
Académies* : Sociétés savantes
acétylcholine : Récepteur
acétylène : Synthèse
achromatopsie : Localisations cérébrales
acide : Acide et base ; Sel
acide nucléique : Virus
acoustique : Pythagorisme
acte / puissance : Mouvement
action immédiate à distance : Champ ; Déterminisme ; Gravitation ; Leibniz
actualisme : Actualisme ou uniformitarisme ; Lyell
adaptatinnisme : Sélection
addition : Récurrence
ADN* : Biotecnologies ; Clonage ; Crick ; Génétique ; Information ; Jacob ; Origines de la vie ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Virus ; Vivant (Théorie du) ; Watson
affaire Lyssenko : Lyssenkisme ; Théorie
affinité élective : Berthollet
affinité* «Chimie» : Classification (Chimie) ; Electrochimie ; Valence
âge de l'univers : Expansion de l'univers ; Univers
agriculture : Agronomie
agrobiologie soviétique : Lyssenkisme
agronomie* : Lyssenkisme ; Nature (Système de la)
air : Gaz ; Phlogistique
air fixe : Gaz
alcali : Sel
alchimie* : Élément ; Nomenclature ; Paracelse ; Rāzī ; Symbole
aléatoire : Hasard
algèbre : Analyse et synthèse ; Analyse fonctionnelle ; Analyse harmonique ; Catégories et foncteurs ; Computation ; Dedekind ; Extension ; Formalisme ; Géométries ; Groupes et symétrie ; Induction compète ; Informatique ; Local et global ; Singularité ; Structure ; Topologie
algèbre de Boole : Computation ; Informatique ; Langages formels
algèbrisation de la logique : Langages formels
algorithme : Analyse diophantienne ; Computation ; Informatique ; Logique et informatique ; Probabilité (Logique) ; Récurrence ; Turing
algorithme d'Euclide : Complexité algorithmique ; Informatique
allégorie : Symbole
allostérie : Régulation moléculaire ; Téléologie
altruisme : Sociobiologie
amas de galaxies : Masse cachée
amibioplasma : Antimatière
âme / corps (dualisme -) : Cartésianisme
amélioration de la race : Eugénisme
analogie* : Déduction ; Démonstration ; Expérience ; Méthode ; Pythagorisme ; Simondon
analyse chimique* : Chimie physique ; Sel ; Synthèse
analyse combinatoire : Combinatoire
analyse complexe* : Analyse et synthèse ; Formalisme ; Structure
analyse diophantienne* : Analyse et synthèse
analyse fonctionnelle* : Topologie
analyse harmonique* : Groupes et symétrie
analyse logique du langage : Cercle de Vienne ; Logicisme ; Wittgenstein et le positivisme logique
analyse non standard* : Formalisme ; Langages formels
analysis situs : Analyse et synthèse ; Topologie
anatomie : Anatomie comparée ; Léonard de Vinci ; Monstre
anatomie cérébrale : Neurone
ancestralité : Génération spontanée ; Génétique
androïde : Automate
animal : Hybride
animal-machine : Automate ; Cartésianisme ; Vitalisme et mécanisme
animalcule : Micro-organisme ; Spallanzani ; Van Leeuwenhoek
animal infusori : Micro-organisme
anthropologie : Race
anthropomorphisme : Nature
anticorps : Immunologie
antiélectron : Antimatière
antiévolutionnisme : Créationnisme
antigène : Immunologie
antilocatinnisme : Localisations cérébrales
antimatière* : Matière [Physique]
antineutron : Antimatière
antiparticule quantique : Antimatière
antiproton : Antimatière
antiréalisme : Réalisme
aphasie : Localisations cérébrales
aporias de Zénon : Géométrie ; Immatérialisme ; Infini ; Platon
a posteriori : A priori ; Déduction ; Évidence
apparaître : Phénoménologie
apparence : Phénomène
apprentissage : Réflexe
apprentissage perceptif : Référéntiel
a priori* : Cartésianisme ; Criticisme ; Déduction ; Donné ; Évidence ; Induction ; Infini ; Méthode ; Statistique ; Transcendantal
arborisation dentritique : Neurone
arbre universel du vivant : Classification [Botanique]
archéobactérie : Micro-organisme
archétype idéal des vertébrés : Développement
aréomètre : Baumé
argument ontologique : Nécessité

argumentation : Dédution ; Rationalité
aristotélisme → **logique aristotélicienne** ; **physique aristotélicienne**
arithmétique : Analyse diophantienne ; Axiomatisme et formalisation ; Extension ; Géométries ; Langages formels ; Logicisme ; Logique et informatique ; Pythagorisme
ARN : ADN ; Biotechnologies ; Classification [Botanique] ; Génétique ; Information ; Origines de la vie ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Virus
Arraignment (Gestell) : Heidegger et la question de la technique
artifice / nature : Automate ; Technique
asepsie : Épidémie
assertabilité : Dummett ; Vérité
associationnisme : Localisation cérébrales ; Réflexe
astologie : Nomenclature
astronomie : Brahé ; Comète ; Copernic ; Expansion de l'univers ; Géocentrisme ; Héliocentrisme ; Kepler ; Ptolémée ; Trou noir
astrophysique : Big bang ; Expansion de l'univers ; Masse cachée ; Principe anthropique ; Trou noir ; Univers ; Weizsäcker
asymétrie cosmique : Antimatière
ATNC : Micro-organisme
atome : Antimatière ; Avogadro (Loi d') ; Avogadro (Nombre d') ; Big bang ; Corps noir ; Correspondance (Principe de) ; Electrochimie ; Élément ; Éléментарité ; Équivalence (Principe d') ; Immatérialisme ; Indiscernabilité ; Masse ; Matière ; Matière [Physique] ; Mole ; Molécule ; Réel ; Rutherford ; Sommerfeld ; Stéréochimie ; Valence
atomisme abdéritain : Atome ; Génération spontanée ; Gravitation ; Indiscernabilité ; Liaison ; Matière
atomisme épïcureen : Atome
atomisme logique : Langages formels ; Proposition ; Russell ; Vérification ; Vérité ; Wittgenstein
attraction élective : Classification [Chimie]
attraction interparticulaire à petite distance : Affinité
attraction newtonienne : Champ ; Gravitation ; Marées ; Newton
attraction universelle : Constantes physiques ; Force ; Masse
automate : Cartésianisme ; Logique et informatique ; Monisme ; Nature (Système de la) ; Technique ; Vitalisme et mécanisme
axiomatique : Induction complète ; Langages formels ; Machine de Turing ; Probabilité [Logique] ; Structure
axiomatisation : Axiomatisme et formalisation ; Catégories et foncteurs ; Démonstration ; Euclide ; Formalisme ; Géométries ; Local et global ; Logicisme ; Structure ; Transformation géométrique
axiomatisation de Zermelo-Fraenkel : Analyse non standard ; Langages formels ; Théorie
axiome du choix : Ensemble
axiomes de Peano : Récurrence
axone : neurone

Bacteria, Archaea et Eucarya : Micro-organisme
bactérie : Lwoff ; Micro-organisme ; Monod ; Oncogène ; Régulation moléculaire
bactériologie : Épidémie ; Institut Pasteur ; Koch ; Micro-organisme ; Nicolle ; Spengler
bactériophage : Delbrück ; Immunologie ; Lwoff ; Régulation moléculaire ; Virus
baryonique (masse -) : Masse cachée
base : Acide et base ; Sel
bayésianisme : Corroboration ; Induction ; Réfutation
béhaviorisme : Réflexe

benzène : Synthèse
bergsonisme : Simondon
bestialité : Hybride
Bible : Créationnisme
big bang : Antimatière ; Constante de Hubble ; Expansion de l'univers ; Invariance de jauge ; Masse cachée ; Principe anthropique ; Symétrie ; Univers
biochimie : Institut Rockefeller ; Krebs ; Récepteur
biocoenose : Écologie
biodiversité : Écologie ; Environnement
bioénergétique : Travail
bioéthique : Clonage
biogénèse évolutive : Origines de la vie
biogénétique : Embryogénèse ; Loi biogénétique fondamentale
biogéographie : Écologie ; Environnement
biologie : Anatomie comparée ; Bactériophage ; Biodiversité ; Bonnet ; Bricolage ; Catastrophisme ; Classification [Botanique] ; Créationnisme ; Crick ; Delbrück ; Développement ; Embryogénèse ; Espèce ; Hybride ; Immunologie ; Institut Pasteur ; Institut Rockefeller ; Loi biogénétique fondamentale ; Lyssenkisme ; Mayr ; Monod ; Monstre ; Morgan ; Oncogène ; Origines de la vie ; Plasma germinatif ; Récepteur ; Rétrovirus ; Roux ; Spallanzani ; Taxinomie ; Théorie ; Van Leeuwenhoek ; Virus ; Watson ; Weismann
biologie moléculaire : ADN ; Agronomie ; Biotechnologies ; Génétique ; Information ; Micro-organisme ; Récepteur ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Téléologie ; Vivant (Théorie du)
biologie romantique : Développement
biométrie : Eugénisme
biophore : Gène ; Génération spontanée ; Plasma germinatif ; Weismann
biopouvoir : Bioéthique
biosphère : Origines de la vie
biosynthèse : Synthèse
biotechnologies : ADN ; Agronomie ; Clonage ; Nature ; Race
bks (théorie -) : Correspondance (Principe de)
boson de Higgs : Éléментарité
botanique : Biogéographie ; Classification [Botanique] ; Écologie ; Lamarck ; Mendel ; Micro-organisme ; Schleiden ; Taxinomie
bricolage
brisure de symétrie : Symétrie
buridanisme : Nominalisme antique

cabinet de curiosités : Fossile ; Muséum national d'histoire naturelle
calcination : Phlogistique
calcul : Équation ; Informatique ; Logique et informatique
calcul arithmétique : Cartésianisme
calcul des prédicats : Langages formels
calcul des probabilités : Condorcet ; Progrès
calcul des propositions : Langages formels ; Proposition
calcul différentiel : Axiomatisme et formalisation ; Local et global
calcul infinitésimal : Carnot L. ; Cauchy ; Infini mathématique ; Leibniz ; Méthodes infinitésimales
calcul numérique : Computation
calculabilité : Machine de Turing ; Récurrence ; Turing
calorimétrie : Chaleur
calorique : Carnot S. ; Chaleur ; Énergie ; Entropie
cancer, cancérologie : Biotechnologies ; Oncogène
caractéristique géométrique : Axiomatisme et formalisation
carbone : Valence
carbone asymétrique : Stéréochimie
cardinaux transfinis : Ensemble ; Infini mathématique
carré latin : Combinatoire

cartésianisme : Automate ; Clairaut ; Descartes ; Géométries ; Immatérialisme ; Lumière ; Matière [Physique] ; Travail ; Vision ; Vitalisme et mécanisme
catalyse
catastrophes (théorie des -) : Chaos et déterminisme ; Singularité
catastrophisme : Actualisme ou uniformitarisme ; Développement ; Fossile ; Orogenèse ; Wittgenstein
catégories aristotéliciennes : Abstraction ; Analogie ; Catégories et foncteurs
catégories kantienne : Criticisme ; Phénomène
catégories mathématiques : Catégories et foncteurs
catégories pythagoriciennes : Pythagorisme
causalité : Causalité (Principe de) ; Causalité classique
causes actuelles : Actualisme ou uniformitarisme
cellule de Purkinje : Neurone
cellule : Embryogénèse ; Gène ; Génération spontanée ; Haeckel ; Immunologie ; Micro-organisme ; Oncogène ; Récepteur ; Schleiden ; Vie ; Virus
Cercle de Vienne : Carnap ; Concept ; Donné ; Épistémologie ; Fait ; Feigl ; Mach ; Objectivité ; Physicalisme ; Positivisme ; Pragmatisme ; Quine ; Réfutation ; Vérification ; Wittgenstein ; Wittgenstein et le positivisme logique
certitude <math.> : Logique et informatique ; Preuve
cerveau : Cognition et sciences cognitives ; Cognitivism ; Localisations cérébrales ; Loeb ; Neurone ; Neurophilosophie ; Rationalisme ; Réflexe ; Sciences cognitives ; Sherrington ; Smart
chaleur : Corps noir ; Courant de convection ; Énergétisme ; Énergie ; Entropie ; Fin thermique de l'univers ; Fourier ; Gaz (Théorie des) ; Phlogistique ; Travail
chaleur-travail : Énergétisme ; Énergie ; Entropie ; Fin thermique de l'univers ; Probabilité [Physique]
champ électromagnétique : Champ ; Constantes physiques ; Gravitation ; Matière [Physique]
champ gravitationnel : Champ ; Équivalence (Principe d') ; Gravitation ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre)
champ magnétique terrestre : Tectonique des plaques
champ quantique : Champ ; Éléментарité ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Quantique ; Renormalisation ; Virtuel
chaos : Chaos et déterminisme ; Déterminisme
chimie : Acide et base ; Affinité ; Atome ; Avogadro (Loi d') ; Avogadro (Nombre d') ; Berthollet ; Catalyse ; Cristal ; Electrochimie ; Élément ; Hoffmann ; Lavoisier ; Liaison ; Molécule ; Nomenclature ; Phlogistique ; Radioactivité ; Stahl ; Stéréochimie ; Symbole ; Synthèse ; Valence
chimie analytique : Analyse chimique
chimie organique : Synthèse
chimie physique : Arrhenius ; Electrochimie ; Mole
chimie pneumatique : Acide et base ; Gaz
chimie prébiotique : Origines de la vie
choléra : Épidémie
chose en soi : Phénomène ; Phénoménisme
christianisme : Créationnisme
chromosome : ADN ; Gène ; Génétique ; Morgan
cinématique : Automate ; Espace-temps ; Masse ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Méthodes infinitésimales ; Relativité ; Transformation géométrique
cinétique (théorie -) : Avogadro (Nombre d') ; Gaz (Théorie des) ; Gravitation
cladistique : Classification [Botanique]
classification en chimie : Affinité ; Classification [Chimie] ; Sel

classification linnéenne : Biogéographie ; Classification [Botanique] ; Écologie ; Espèce ; Taxinomie ; Vivant (Théorie du)
climax : Écologie
clinamen : Atome
clonage : Bioéthique ; Biotechnologies ; Embryogénèse
codage : Information et codage
code génétique : ADN ; Gène ; Génétique ; Information
cognition : Cognition et sciences cognitives ; Cognitivism ; Computation ; Donné ; Sciences cognitives ; Système
cognitivism : Cognition et sciences cognitives ; Informatique ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Neurophilosophie ; Rationalisme ; Sciences cognitives ; Système ; Turing
cohérentisme : Conventionalisme
coïncidence des opposés : Infini
coloration de Golgi : Neurone
combinatoire : Complexité ; Topologie
combinatoire de Boltzmann : Corps noir
combustion : Chaleur ; Matière ; Phlogistique
comète de Halley : Comète
comité d'éthique : Clonage
communauté scientifique : Paradigme
communication : Réseau
complémentarité <phys.> : Bohr ; Controverse Bohr-Einstein ; Simondon
complexité algorithmique : Computation ; Information et codage ; Machine de Turing ; Simondon
comportement : Réflexe
compossibilité (principe de -) : Indiscernabilité
computation : Informatique ; Machine de Turing ; Récurrence ; Système
concept : Dialectique ; Nominalisme antique ; Opérationnalisme ; Physicalisme ; Wittgenstein
condition d'acceptation : Preuve
condition de vérité : Preuve
conditionnement : Réflexe
conduction thermique : Courant de convection
cône visuel : Vision
configurations équilibrées : Combinatoire
confirmation, confirmabilité : Corroboration ; Induction ; Réfutation ; Test
conformation <chim.> : Stéréochimie
conique : Transformation géométrique
conjecture : Probabilité [Logique]
conjonction : Langages formels
connaissance : Abduction ; Analogie ; A priori ; Concept ; Criticisme ; Davidson ; Dennett ; Dialectique ; Donné ; Empirio-monisme ; Empirisme ; Enriques ; Épistémologie ; Espace ; la critique de Mach ; Expérience ; Expérience cruciale ; Heilmholtz ; Induction ; Intentionnalité ; Maîtrise de l'erreur ; Objectivité ; Phénomène ; Physicalisme ; Piaget ; Pragmatisme ; Rationalisme ; Rupture ; Transcendantal ; Vérité ; Wittgenstein et le positivisme logique
connaissance scientifique : Continuité ; Évidence ; Fait ; Idéalisme ; Induction ; Méthode ; Paradigme ; Parcimonie ; Objectivité ; Popper
connecteur : Langages formels
connexionnisme : Cognition et sciences cognitives ; Localisations cérébrales ; Sciences cognitives
conscience : Bergsonisme ; Dennett ; Phénoménologie
conservation de l'énergie (loi de -) : Énergétisme ; Énergie ; Probabilité [Physique]
constante d'Avogadro : Avogadro (Nombre d')
constante de Boltzmann k : Constantes physiques
constante de couplage électromagnétique : Principe anthropique

constante de Hubble* : Big bang ; Expansion de l'univers ; Principe anthropique ; Univers
 constante de Newton G : Constantes physiques
 constante de Planck : Constantes physiques ; Quantique
 constantes physiques*
 constructivisme*
 contexte de la découverte / contexte de la justification : Cercle de Vienne ; Découverte ; Méthode
 contextualisme : Bioéthique
 contingence* : Nécessité
 continu de Cantor (hypothèse du -) : Conjecture
 continu géométrique : Infini mathématique
 continue (fonction -) : Analyse harmonique
 continuisme : Continuité
 continuité / discontinuité <géologie> : Actualisme ou uniformitarisme ; Controverses
 continuum : Champ
 contraction musculaire : Réflexe
 contradiction : Dialectique ; Vérité
 contrôle des naissances : Eugénisme
 controverse Bohr-Einstein* : Bohr ; Virtuel
 controverse Hilbert-Gödel : Constructivisme
 controverses : Continuité ; Paradigme ; Révolution scientifique ; Rupture ; Thémata
 convection (courant de -) : Courant de convection ; Dérive des continents ; Tectonique des plaques ; Terre
 conventionnalisme* <math.> : Nominalisme moderne ; Poincaré
 conversion : Démonstration
 corps de nombre : Extension
 corps noir* : Planck ; Quantique
 corps obscurs (hypothèse des -) : Trou noir
 corps p-adique : Local et global
 corps simple : Élément
 corpusculaire (théorie -) : Molécule
 corpuscule* : Complémentarité ; Électron ; Lumière ; Matière [Physique] ; Quantique
 corrélation des formes : Anatomie comparée
 correspondance (principe de)* : Controverse Bohr-Einstein ; Quantique
 corroboration* : Dédiction ; Méthode ; Modèle ; Probabilité [Logique] ; Test ; Théorie ; Validation
 cortex visuel : Cognition et sciences cognitives ; Localisations cérébrales
 cosmologie : Antimatière ; Big bang ; Constante de Hubble ; Expansion de l'univers ; Fin thermique de l'univers ; Géocentrisme ; Kepler ; Masse cachée ; Merleau-Ponty ; Mouvement ; Principe anthropique ; Univers ; Whitehead
 cosmologie grecque : Mouvement
 cosmos : Loi de la nature
 couleur* : Corps noir ; Goethe ; Lumière ; Vision
 courant de convection* : Dérive des continents ; Orographique ; Tectonique des plaques ; Terre
 courbe algébrique : Local et global ; Méthodes infinitésimales ; Singularité
 crâne : Anatomie comparée
 craniologie : Localisations cérébrales
 Création (dogme chrétien de la -) : Créationnisme ; Évolutionnisme ; Vivant (Théorie du)
 créationnisme* : Génération spontanée
 Creutzfeldt-Jakob (maladie de -) : Prion
 crise biologique : Catastrophisme
 crise de la physique moderne*
 cristal* : cristallographie : Groupes et symétrie ; Kepler ; Laue ; Molécule ; Stéréochimie
 cristallin : Vision
 criticisme* : Analogie ; A priori ; Concept ; Donné ; Énergie ;

Géométries ; Idéalisme ; Infini ; Kant ; Phénomène ; Rationalité ; Révolution scientifique ; Transcendantal ; Vérité
 croyance : Vérité
 cryptanalyse : Machine de Turing
 cryptographie : Complexité algorithmique
 curare : Récepteur
 cybermonde : Technique
 cybernétique : Automate ; Cognition et sciences cognitives ; Complexité ; Information ; Monisme ; Régulation moléculaire ; Sciences cognitives ; Système
 cycle de Krebs : Krebs
 cytologie : Gène ; Plasma germinatif ; Schleiden ; Vivant (Théorie du)
 cytoplasme : Cellule

darwinisme* : Biogéographie ; Cellule ; Contingence ; Créationnisme ; Écologie ; Embryogenèse ; Eugénisme ; Gène ; Génération spontanée ; Haeckel ; Huxley ; Lamarck ; Lamarckisme ; Lyell ; Lyssenisme ; Marx et Darwin ; Sélection ; Taxinomie ; Théorie ; Vivant (Théorie du)
 darwinisme social : Darwinisme ; Écologie comportementale ; Eugénisme ; Race ; Sociobiologie
 Décade : Pythagorisme
 décidabilité <dans les théories axiomatiques> : Machine de Turing ; Récurrence
 décision (« problème de la - ») : Formalisme
 décision (théorie de la -) : Probabilité [Logique] ; Rationalité
 décision mathématique : Récurrence
 décohérence : Mesure en mécanique quantique ; Théorie
 découverte* : Abduction ; Analyse et synthèse ; Cercle de Vienne ; Complexité ; Conjecture ; Expérience cruciale ; Fait ; Hanson ; Invention ; Méthode ; Paradigme ; Paricomie ; Popper ; Prix Nobel des sciences ; Réalisme ; Test ; Validation ; Van Fraassen ; Whewell
 déductibilité : Nécessité
 déduction* : Abduction ; Corroboration ; Évidence ; Formalisme ; Induction ; Méthode ; Nécessité ; Récurrence ; Réfutabilité ; Validation
 déduction a priori : A priori ; Cartésianisme
 déduction formelle : Logique et informatique
 définition : Abstraction ; Analogie ; Conventionnalisme ; Opérationnalisme ; Récurrence
 Déluge : Fossile
 démarcation (critère de -) : Rationalité
 démontrabilité : Validation
 démonstration* : Analogie ; Dédiction ; Empirisme ; Euclide ; Gödel ; Langages formels ; Validation ; Vérification
 démonstration mathématique : Analyse et synthèse ; Axiomatisme et formalisation ; Conjecture ; Constructivisme ; Dédiction ; Dialectique ; Duhem ; Induction complète ; Preuve ; Récurrence ; Vérification
 densité : Terre
 dentrites : Neurone
 dépistage : Épidémie ; Sida
 dérivation <log.> : Validation
 dérive des continents* : Courant de convection ; Expansion terrestre ; Tectonique des plaques ; Wegener
 descendance avec modifications (théorie de la -) : Darwinisme ; Vivant (Théorie du)
 déterminisme* : Bohr ; Causalité (Principe de) ; Champ ; Chaos et déterminisme ; Contingence ; Irréversibilité ; Probabilité [Logique] ; Réel ; Téléologie
 développement* : Anatomie comparée ; Darwinisme ; Évolutionnisme ; Gène ; Spencer ; Vivant (Théorie du)
 diagrammes de Feynman : Renormalisation
 dialectique* : Platon

Dieu : Causalité (Principe de) ; Créationnisme ; Éther ; Évolutionnisme ; Infini ; Loi de la nature ; Nature ; Scientisme ; Technique

difféomorphisme : Singularité
 diffraction de la lumière : Éther ; Lumière
 diffraction des rayons X : Cristal
 diffusion des sciences : Académies ; Enseignement des sciences ; Thémata ; Vulgarisation
 dilatation de la terre : Expansion terrestre
 diluvianisme : Fossile
 dinosaure : Catastrophisme
 dioptrique : Lumière
 directionnalisme : Actualisme ou uniformitarisme
 discontinuité épistémologique : Rupture
 dissection : Anatomie comparée
 dissémination des radionucléides : Précaution
 dissociation électrolytique : Arrhenius
 dissymétrie : Probabilité [Physique]
 dissymétrie moléculaire : Pasteur contre Pouchet
 divisibilité à l'infini : Immatérialisme
 division cellulaire : Gène ; Génération spontanée
 division technique du travail : Babbage
 dodécèdre : Pythagorisme
 donné* : A priori ; Cercle de Vienne ; Criticisme ; Empirisme ; Expérience ; Fait ; Phénoménologie ; Russell ; Transcendantal
 drogue : Récepteur
 droit naturel : Loi de la nature
 Droits de l'homme : Bioéthique
 drosophile : Gène ; Vivant (Théorie du)
 Duhem-Quine (loi de) : Conventionnalisme ; Duhem ; Expérience cruciale ; Preuve ; Réalisme ; Test
 durée : Bergsonisme
 durée de vie : Plasma germinatif
 dynamique : Crise de la physique moderne ; Irréversibilité ; Masse
 dynamique newtonienne : Équivalence (Principe d') ; Gravitation
 dynamique terrestre : Courant de convection ; Terre
 dynamométamorphisme : Métamorphisme

écologie* : Biodiversité ; Biogéographie ; Environnement ; Précaution
 écologie comportementale*
 économie : Évolutionnisme ; Travail
 économie de la nature : Écologie
 économie théorique* : Évolutionnisme ; Travail
 écorce terrestre : Orogenèse ; Subsidence ; Terre
 écosystème : Écologie ; Environnement
 ectinite : Métamorphisme
 effet : Causalité classique
 effet Doppler : Expansion de l'univers
 effet Doppler-Fizeau : Constante de Hubble
 effet photoélectrique : Quantique
 effet Zeeman : Pauli
 effondrement gravitationnel sans limite : Trou noir
 égalité : Équation
 Église : Héliocentrisme
 égoïsme : Sociobiologie
 élasticité de l'air : Gaz
 électricité : Catalyse ; Cristal ; Electrochimie ; Éther ; Liaison
 électrochimie* : Affinité ; Chimie physique ; Électron ; Liaison
 électrolyse : Chimie physique ; Electrochimie
 électromagnétisme : Champ ; Constantes physiques ; Corps noir ; Crise de la physique moderne ; Électron ; Équivalence (Principe d') ; Éther ; Laue ; Lumière ; Matière [Physique] ; Maxwell ; Propagation ; Relativité ; Yukawa
 électron* : Acide et base ; Antimatière ; Electrochimie ; Élémentarité ; Liaison ; Pauli ; Quantique ; Schrödinger ; Sommerfeld
 électromagnétisme : Acide et base
 électronique : Image
 électrophysiologie : Monisme ; Neurone

élément* : Alchimie ; Chimie physique ; Loi de nature ; Matière
 élémentarité* : Champ ; Électron ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Quantique
 embryogenèse* : Clone ; Darwinisme ; Développement ; Évolutionnisme ; Haeckel ; Hybride ; Loi biogénétique fondamentale ; Monstre
 embryologie : Anatomie comparée ; Cellule ; Développement ; Embryogenèse ; Gène ; Haeckel ; Hybride ; Régulation moléculaire ; Roux ; Vitalisme et mécanisme
 empiricité : Réfutabilité
 empiriocriticisme : Empirisme ; Empirionisme ; Espace : la critique de Mach ; Mach
 empirionisme* : Monisme ; Théorie ; Travail
 empirisme* : Découverte ; Donné ; Expérience ; Expérience cruciale ; Épistémologie ; Fait ; Locke ; Rationalité
 empirisme logique : Carnap ; Cercle de Vienne ; Concept ; Découverte ; Donné ; Feigl ; Hempel ; Opérationnalisme ; Physicalisme ; Pragmatisme ; Quine ; Réfutabilité ; Validation ; Vérification
 enaction : Cognition et sciences cognitives ; Sciences cognitives
 endocrinologie : Récepteur
 énergétisme* : Chaleur ; Empirionisme ; Énergie ; Mach ; Probabilité [Physique] ; Travail
 énergie* : Chaleur ; Corps noir ; Énergétisme ; Fin thermique de l'univers ; Force ; Probabilité [Physique] ; Travail ; Virtuel
 énergie cinétique : Fin thermique de l'univers
 énergie électromagnétique : Entropie
 engagement ontologique : Abstraction
 énoncé empirique, énoncé protocolaire : Vérification
 enseignement des sciences* : Académies ; Muséum national d'histoire naturelle ; Vulgarisation
 ensemble* (théorie des -) : Bourbaki ; Cantor ; Catégories et foncteurs ; Dedekind ; Extension ; Formalisme ; Infini mathématique ; Structure ; Théorie
 entéléchie : Leibniz
 entomologie : Développement
 entropie* : Chaleur ; Corps noir ; Crise de la physique moderne ; Fin thermique de l'univers ; Irréversibilité ; Probabilité [Physique] ; Temps
 environnement* : Biodiversité ; Biogéographie ; Écologie ; Précaution
 enzyme : Monod ; Récepteur ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Virus
 épidémie* : Immunologie ; Institut Pasteur ; Micro-organisme ; Sida
 épigénèse : Anatomie ; Développement ; Embryogenèse ; Évolutionnisme ; Gène
 épistémologie* : Bachelard ; Canguilhem ; Cercle de Vienne ; Complexité ; Continuité ; Évidence ; Fait ; Feyerabend ; Foucault ; Idonéisme ; Instrument ; Invention ; Koyré ; Kuhn ; Maîtrise de l'erreur ; Modèle ; Objectivité ; Paradigme ; Piaget ; Réalisme ; Réductionnisme ; Réfèrentiel ; Réfutabilité ; Reproductibilité ; Révolution scientifique ; Rupture ; Système ; Théorie ; Validation ; Van Fraassen
 équation algébrique : Analyse diophantienne ; Cardan ; Équation ; Extension ; Géométries ; Groupes et symétrie ; Local et global ; Transformation géométrique
 équation d'état des gaz : Gaz (Théorie des)
 équation de Boltzmann : Irréversibilité
 équation de Navier-Stokes : Chaos et déterminisme
 équation de Schrödinger : Irréversibilité ; Mesure en mécanique quantique ; Temps ; Test
 équation des ondes : Propagation
 équation eikonale : Propagation
 équations de Cauchy-Riemann : Analyse complexe
 équations de Friedmann : Big bang
 équations de Maxwell : Maxwell
 équilibre chimique : Catalyse

équisingularité : Singularité
équivalence (principe d-) : Constantes physiques ; Einstein ; Entropie ; Espace-temps ; Gravitation ; Inertie (Principe d') ; Irréversibilité ; Masse ; Mouvement ; Observable ; Relativité
équivalent <chimie> : Atome
ère de Planck : Expansion de l'univers
ergodicité : Irréversibilité
ergonomie : Automate
erreur : Maîtrise de l'erreur
esclave : Automate
espace : Bergsonisme ; Espace : la critique de Mach ; Géométries ; Infini ; Mouvement
espace de Hilbert : Mesure en mécanique quantique
espace vectoriel : Analyse fonctionnelle ; Catégories et foncteurs
espace-temps : Big bang ; Constantes physiques ; Équivalence (Principe d') ; Gravitation ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Mouvement ; Relativité ; Temps ; Trou noir ; Univers
espace-temps de Minkowski : Espace-temps ; Relativité
espaces de Banach : Analyse fonctionnelle
espaces de Hilbert : Analyse fonctionnelle
espèce : Anatomie comparée ; Cellule ; Classification (Botanique) ; Créationnisme ; Cuvier ; Darwinisme ; De Vries ; Évolutionnisme ; Hybride ; Lamarckisme ; Loi biogénétique fondamentale ; Mayr ; Nominalisme antique ; Sélection ; Taxinomie ; Théorie ; Vie ; Vivant (Théorie du)
esprit-cerveau : Neurophilosophie
esprits animaux : Cartésianisme ; Réflexe
estimation : Probabilité [Logique]
étendue : Cartésianisme ; Immatérialisme
éther : Champ ; Lumière ; Michelson ; Propagation
éthique : Complexité
éthique de la responsabilité : Précaution
éthique médicale : Bioéthique
éthologie : Écologie comportementale ; Sociobiologie
être : Analogie ; Criticisme ; Heidegger et la question de la technique ; Infini
eugénisme : Darwinisme ; Race ; Sélection
évidence : A priori ; Cartésianisme ; Déduction ; Descartes ; Donné ; Fait ; Nécessité ; Phénoménologie ; Pragmatisme ; Preuve ; Rationalisme
environnement : Biodiversité ; Écologie
évolution : Actualisme ou uniformitarisme ; Anatomie ; Bricolage ; Catastrophisme ; Classification (Botanique) ; Contingence ; De Vries ; Embryogenèse ; Espèce ; Lamarck ; Lamarckisme ; Lyell ; Lyssenkisme ; Progrès ; Sélection ; Sociobiologie ; Teilhard de Chardin ; Téléologie ; Théorie ; Vivant (Théorie du)
évolution prébiotique : Origines de la vie
évolutionnisme : Biogéographie ; Créationnisme ; Économie théorique ; Sélection ; Taxinomie
évolutionnisme darwinien : Darwinisme ; Développement ; Espèce ; Évolutionnisme ; Sélection
évolutionnisme haeckelien : Embryogenèse ; Loi biogénétique fondamentale ; Vivant (Théorie du)
évolutionnisme spencérien : Développement ; Évolutionnisme ; Progrès ; Sélection
expansion de l'univers : Antimatière ; Big bang ; Constante de Hubble ; Principe anthropique ; Relativité ; Trou noir ; Univers
expansion des fonds océaniques : Courant de convection ; Subsidence ; Tectonique des plaques
expansion terrestre : Dérive des continents ; Orogenèse ; Tectonique des plaques ; Terre ; Wegener
expérience : Analogie ; A priori ; Découverte ; Donné ; Empiricisme ; Empirisme ; Expérience cruciale ; Fait ;

Idéalisme ; Induction ; Instrument ; Objectivité ; Pragmatisme ; Réalisme ; Reproductibilité ; Test ; Vérification
expérience cruciale : Conventionalisme ; Couleur ; Duhem ; Expérience ; Preuve ; Réfutabilité ; Test
expérimentation : Expérience ; Expérience cruciale ; Idéalisme ; Muséum national d'histoire naturelle ; Observable ; Pasteur contre Pouchet ; Royal Society ; Validation
expérimentation sur l'animal : Instrument ; Récepteur ; Réflexe
expérimentation sur l'homme : Bioéthique
explication : Fait ; Réalisme
extension : Analyse diophantienne ; Ensemble ; Équation ; Groupes et symétrie ; Transformation géométrique
exthèse : Démonstration
extrémale des ensembles (théorie -) : Combinatoire

faciès géologique : Dépéret ; Stratigraphie
facteur d'échelle : Bachelard ; Mesure ; Mesure en mécanique quantique ; Référentiel ; Relativité ; Renormalisation
factorisation : Complexité algorithmique
faille transformante : Tectonique des plaques
fait : Cercle de Vienne ; Découverte ; Donné ; Épistémologie ; Évidence, Expérience ; Méthode ; Nécessité ; Objectivité ; Réalisme ; Validation ; Wittgenstein ; Wittgenstein et le positivisme logique
falsifiabilité, falsificationnisme : Expérience cruciale ; Méthode ; Popper ; Rationalisme ; Rationalité ; Réfutabilité ; Test ; Théorie
fausseté : Rationalité ; Test ; Vérité
faux-hybridisme (pratique du -) : Hybride
fécondation : Embryogenèse
fécondation hétérogène : Hybride
fermion : Élémentarité ; Indiscernabilité
feu : Phlogistique
feuilles : Embryogenèse
fièvre jaune : Épidémie
figure de la terre : Clairaut
filtre de Fréchet : Analyse non standard
fin thermique de l'univers : Entropie
finalité : Téléologie
fixisme : Catastrophisme ; Créationnisme ; Cuvier ; Développement ; Espèce ; Taxinomie ; Vivant (Théorie du)
flèche du temps : Corps noir ; Irréversibilité ; Symétrie ; Temps
fluide élastique aéroforme : Gaz
fluide impondérable : Éther
foetus : Embryogenèse ; Monstre
foi / raison : Créationnisme ; Rationalisme ; Scientisme
foncteur : Axiomatisme et formalisation ; Catégories et foncteurs ; Ensemble ; Géométries ; Structure ; Topologie
fonction <math>> : Analyse complexe ; Analyse fonctionnelle ; Analyse harmonique ; Extension ; Méthodes infinitésimales ; Singularité
fonctionnalisme : Sciences cognitives
force : Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Champ ; Constantes physiques ; Énergie ; Entropie ; Gravitation ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Loi de nature ; Monisme ; Mouvement ; Virtuel
force d'Eötövs : Dérive des continents
force de Coriolis : Équivalence (Principe d')
force vive : Entropie ; Leibniz ; Travail
formalisation de la logique : Langages formels ; Logique et informatique
formalisation, formalisme mathématique : Abduction ; Analyse complexe ; Axiomatisme et formalisation ; Bourbaki ; Déduction ; Ensemble ; Formalisme ; Géométries ; Gödel ; Local et global ; Modèle ; Structure ; Transformation géométrique

formation des espèces : Biogéographie
forme : Image ; Méthode ; Proposition ; Rationalisme ; Wittgenstein
forme de la Terre : Marées
forme symbolique : Criticisme
formule chimique : Symbole
formule de Cauchy-Green : Analyse complexe
fosses océaniques : Tectonique des plaques
fossile : Anatomie comparée ; Catastrophisme ; Gaudry ; Muséum national d'histoire naturelle ; Stratigraphie
fréquence de Bohr : Correspondance (Principe de)
fréquentisme : Statistique
futurs contingents : Nécessité

galaxie : Constante de Hubble ; Masse cachée
gaz : Avogadro (Loi d') ; Avogadro (Nombre d') ; Chaleur ; Chimie physique ; Crise de la physique moderne ; Gaz (Théorie des) ; Lavoisier ; Masse cachée ; Maxwell ; Molécule ; Phlogistique
gène : ADN ; Cellule ; Darwinisme ; De Vries ; Eugénisme ; Génération spontanée ; Génétique ; Information ; Mendel ; Monod ; Morgan ; Oncogène ; Plasma germinatif ; Race ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Sociobiologie ; Vivant (Théorie du) ; Weismann
génération spontanée : Cellule ; Micro-organisme ; Origines de la vie ; Pasteur contre Pouchet ; Plasma germinatif ; Spallanzani
génétique : ADN ; Bioéthique ; Biotecnologies ; Clonage ; De Vries ; Embryogenèse ; Eugénisme ; Gène ; Génération spontanée ; Hybride ; Information ; Jacob ; Mendel ; Monod ; Morgan ; Nature ; Plasma germinatif ; Race ; Régulation moléculaire ; Rétrovirus ; Sociobiologie ; Téléologie ; Théorie
génie génétique : ADN ; Biotecnologies ; Lyssenkisme ; Technique ; Virus
génom : Biotecnologies ; Information ; Lwoff ; Rétrovirus ; Watson
géobotanique : Écologie
géocentrisme : Copernic ; Héliocentrisme ; Marées ; Ptolémée
géoésie : Clairaut
géoésique : Local et global
géognosie : Stratigraphie
géographie : Environnement
géographie botanique : Biogéographie
géographie zoologique : Biogéographie
géologie : Actualisme ou uniformitarisme ; Biogéographie ; Catastrophisme ; Dépéret ; Dérive des continents ; Expansion terrestre ; Fossile ; Lyell ; Métamorphisme ; Orogenèse ; Stratigraphie ; Subsidence ; Tectonique des plaques ; Terre
géométrie : Analyse complexe ; Analyse diophantienne ; Analyse et synthèse ; Analyse fonctionnelle ; Beltrami ; Cartésianisme ; Catégories et foncteurs ; Équation ; Euclide ; Extension ; Géométries ; Local et global ; Logicisme ; Méthodes infinitésimales ; Pythagorisme ; Singularité ; Topologie
géométrie analytique : Espace-temps
géométrie combinatoire extrémale : Combinatoire
géométrie des structures moléculaires : Stéréochimie
géométrie descriptive : Cristal
géométrie euclidienne : Axiomatisme et formalisation ; Démonstration ; Formalisme ; Géométries ; Local et global ; Structure ; Transformation géométrique
géométrie non euclidienne : Axiomatisme et formalisation ; Beltrami ; Formalisme ; Géométries ; Groupes et symétrie ; Structure ; Transformation géométrique
géométrie projective : Géométries ; Isopérimètre ; Transformation géométrique

géophysique : Courant de convection ; Dérive des continents ; Orogenèse ; Terre ; Wegener
géosynclinal : Métamorphisme
germe : Bonnet ; Évolutionnisme
germe pathogène : Micro-organisme
gestaltisme : Forme ; Vision
glande pinéale : Automate ; Cartésianisme
globe en fusion : Terre
glossopêtre : Fossile
gradualisme : Catastrophisme
grammaire générative : Récurrence
grandeur : Infini ; Observable
granite : Métamorphisme
graphes (théorie des -) : Combinatoire
gravitation : Causalité (Principe de) ; Champ ; Expansion de l'univers ; Force ; Inertie (Principe d') ; Marées ; Masse ; Mouvement ; Newton ; Relativité ; Temps ; Trou noir
gravité naturelle : Impetus
gravité quantique : Champ ; Constantes physiques ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre)
graviton : Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre)
groupe <math>> : Analyse harmonique ; Équation ; Extension ; Géométries ; Groupes et symétrie ; Transformation géométrique
groupe de Galois : Équation ; Extension
groupe de Poincaré : Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Relativité ; Topologie
groupe de renormalisation : Renormalisation
groupes de Coxeter : Structure
groupes de Lie : Groupes et symétrie
groupes de transformations : Structure ; Transformation géométrique

harmonie : Pythagorisme
harmonie préétablie : Leibniz
hasard : Contingence ; Probabilité [Logique] ; Probabilité [Physique] ; Statistique ; Téléologie
héliocentrisme : Bruno ; Copernic ; Gravitation ; Kepler
hérédité : ADN ; Cellule ; Crick ; Darwinisme ; De Vries ; Eugénisme ; Gène ; Génération spontanée ; Génétique ; Hybride ; Lyssenkisme ; Mendel ; Morgan ; Plasma germinatif ; Race ; Vivant (Théorie du) ; Watson ; Weismann
hérédité de Mendel : Gène ; Génétique ; Hybride ; Théorie ; Vivant (Théorie du)
hérédité des caractères acquis : Évolutionnisme ; Lamarckisme
heuristique : Computation ; Rationalité
hystérisme : Épidémie
histoire naturelle : Créationnisme
hiv : Biotecnologies ; Rétrovirus
holisme : Objectivité ; Test
homéostasie : Régulation moléculaire
« homme moyen » : Statistique
« homme-année » : Informatique
homme-machine : Automate ; Sciences cognitives
homologie : Régulation moléculaire ; Topologie
homologie sériale : Anatomie comparée
horloge : Automate
hormone : Récepteur
horticulture : Hybride
hybride : Gène ; Mendel ; Monstre ; Vivant (Théorie du)
hybrides simples (technique des -) : Agronomie
hydrate : Chimie physique
hydrogène : Élément ; Phlogistique
hygiène publique : Épidémie
hypersurface : Singularité
hypothèse : Conjecture ; Conventionalisme ; Corroboration ; Découverte ; Donné ; Duhem ; Expérience ; Expérience

cruciale ; Induction ; Méthode ; Objectivité ; Parcimonie ; Positivisme ; Probabilité [Logique] ; Réfutabilité ; Test ; Thématé ; Théorie ; Validation
hypothèse d'Avogadro : Atome ; Avogadro (Nombre d') ; Molécule
hypothèse de Riemann : Conjecture
hypothèse du continu de Cantor : Conjecture
hypothèse mécanique : Énergétisme
hypothético-déductif : Dédution ; Popper

iatro-mécanique : Vitalisme et mécanisme
idéal de complexité : Complexité
idéalisme : Berkeley ; Brunschvicg ; Concept ; Empirionisme ; Immatérialisme ; Leibniz
idéalisme transcendantal : Criticisme ; Kant ; Phénoménologie ; Transcendantal
idée : Concept
idée platonicienne : Platon ; Platonisme
Idées-Nombres : Platonisme
idtoplasma : Gène ; Plasma germinatif
idéalisme : Référéntiel
illation : Proposition
image : Forme ; Lumière ; Vision
imagination : Bachelard
immatérialisme : Berkeley ; Idéalisme ; Réel
immunité : Bactériophage
immunologie : Biotechnologies ; Épidémie ; Institut Pasteur ; Institut Rockefeller ; Récepteur ; Réseau ; Rétrovirus ; Sida ; Spengler
impetus : Bruno ; Causalité classique ; Force ; Inertie (Principe d') ; Mouvement
incertitude (principe d') : Déterminisme
incomplétude (théorème d') : Logique et informatique
indétermination de Heisenberg (relations d') : Controverse Bohr-Einstein ; Indiscernabilité ; Observable
indétermination de la traduction : Réalisme
indéterminisme : Déterminisme
indexicalité de l'assertion : Vérité
indexicalité : Vérité
indiscernabilité : Atome ; Quantique
induction : Abduction ; Axiomatisation et formalisation ; Carnap ; Corroboration ; Dédution ; Empirionisme ; Logicisme ; Méthode ; Mill ; Parcimonie ; Peirce ; Probabilité [Logique] ; Rationalité ; Réalisme ; Réurrence ; Réfutabilité ; Test ; Validation ; Whewell
induction complète : Réurrence
induction embryonnaire : Régulation moléculaire
induction enzymatique : Monoc
induction gratuite : Téléologie
inductivisme : Expérience
inégalité de Clausius : Probabilité [Physique]
inégalité héréditaire : Race
inégalité physiologique : Race
inégalités de Heisenberg : Quantique ; Virtuel
inertie (principe d') : Causalité classique ; Constantes physiques ; Force ; Gravitation ; Impetus ; Masse ; Mouvement ; Relativité
infection : Institut Pasteur ; Pasteur contre Pouchet ; Prion ; Rétrovirus ; Virus
inférence : Dédution ; Induction
inférence abductive : Abduction
inférence déductive : Nécessité
inférence inductive : Méthode ; Validation
infini : Euclide
infini mathématique : Cantor ; Carnot L. ; Ensemble ; Méthodes infinitésimales
infirmabilité : Corroboration

information (théorie de l') : Complexité ; Complexité algorithmique ; Computation ; Information et codage ; Informatique ; Machine de Turing ; Simondon
information génétique : ADN ; Gène ; Génétique ; Information ; Régulation moléculaire
informatique : Automate ; Complexité algorithmique ; Computation ; Gödel ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Monisme ; Réurrence ; Sciences cognitives ; Turing
ingénieur : Travail
innéisme / sensualisme : Vision
insémination artificielle : Agronomie ; Spallanzani
instantia crucis (instance de la croix) : Expérience cruciale
Institut Pasteur : Sida
Institut Rockefeller : Immunologie
instrument : Épistémologie ; Expérience ; Sociologie des sciences ; Technique
instrumentalisme : Réalisme
insuline : Biotechnologies
intégrale : Analyse fonctionnelle ; Analyse harmonique ; Méthodes infinitésimales
intégrale de Cauchy : Local et global
intégrale de Lebesgue : Analyse fonctionnelle
intégrale de Riemann : Analyse fonctionnelle
intégration dans les groupes topologiques : Groupes et symétrie
intelligence : Piaget ; Rationalisme
intelligence artificielle : Automate ; Cognition et sciences cognitives ; Cognitivisme ; Computation ; Informatique ; Logique et informatique ; Sciences cognitives ; Turing
intension : Intentionnalité
intentionnalité : Dennett ; Donné ; Husserl ; Phénoménologie ; Transcendantal
interprétation : Donné ; Modèle
intuition : Donné ; Évidence ; Phénomène
intuition catégoriale : Phénoménologie
intuitionnisme mathématique : Catégories et foncteurs ; Constructivisme ; Démonstration ; Preuve ; Vérification
invariabilité des lois naturelles : Loi de la nature
invariance de jauge : Espace-temps ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Symétrie
invention : Conjecture ; Découverte ; Méthode ; Prix Nobel des sciences ; Test
invertébré : Anatomie comparée ; Lamarck ; Vivant (Théorie du)
ion : Arrhenius ; Chimie physique ; Électrochimie
ionistes / hydratationnistes : Chimie physique
irrationnel : Meyerson
irréversibilité : Corps noir ; Probabilité [Physique] ; Temps
isépiphrane : Isopérimètre
isométrie optique : Stéréochimie
isométrie : Molécule ; Structure
isométrie géométrique : Stéréochimie
isomorphisme : Catégories et foncteurs
isopérimètre
isostatique (mouvements-s) : Dérive des continents
isotopie : Radioactivité
isotype : Neurath
itération : Réurrence
jardin botanique : Muséum national d'histoire naturelle
Jardin du Roi : Muséum national d'histoire naturelle
jeu de pile ou face : Probabilité [Physique]
jeux de langage : Wittgenstein ; Wittgenstein et le positivisme logique
jugement : Fait ; Vérité
jugement kantien : Nécessité
justifiabilité, justification : Méthode ; Validation ; Vérité

kantisme : Couturat ; Criticisme ; Helmholtz ; Phénomène ; Phénoménisme ; Transcendantal
Kekulé-Couper (théorie structurale de -) : Liaison
koinomatère : Antimatère

lamarckisme → **néolamarckisme** ; **transformisme**
lambda calcul : Church ; Informatique ; Logique et informatique ; Machine de Turing
langage : Atomisme logique ; Logicisme ; Logique et informatique ; Objectivité ; Physicalisme ; Positivisme ; Proposition ; Test ; Wittgenstein ; Wittgenstein et le positivisme logique
langage de programmation : Informatique ; Langages formels
langages formels : Axiomatisation et formalisation ; Computation ; Forme ; Frege ; Peirce ; Proposition ; Russell
langue naturelle : Vérité
langue universelle : Topologie
lapidaire : Fossile
lemme d'Eudoxe : Méthodes infinitésimales
liaison chimique : Catalyse ; Electrochimie ; Electron ; Liaison ; Valence
lieu naturel : Mouvement
lithologie, lithosphère océanique : Courant de convection ; Stratigraphie ; Subsidence ; Tectonique des plaques
local et global : Topologie
localisations cérébrales : Loeb ; Progrès
logarithmes : Briggs
logicisme : Axiomatisation et formalisation ; Frege ; Induction ; Proposition ; Russell ; Vérité ; Wittgenstein ; Wittgenstein et le positivisme logique
logique : Axiomatisation et formalisation ; Church ; Couturat ; Dummett ; Gödel ; Induction ; Langages formels ; Logicisme ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Monisme ; Nominalisme moderne ; Phénoménologie ; Preuve ; Probabilité [Logique] ; Proposition ; Quine ; Structure ; Validation ; Vérification ; Vérité ; Wittgenstein ; Wittgenstein et le positivisme logique
logique aristotélicienne : Abstraction ; Analogie ; Axiomatisation et formalisation ; Dédution ; Forme ; Méthode ; Nécessité ; Nominalisme antique ; Proposition
logique combinatoire : Logique et informatique
logique de la découverte : Conjecture ; Découverte ; Popper
logique formelle : Cercle de Vienne ; Forme ; Langages formels
logique inductive : Carnap ; Dédution ; Induction ; Mill ; Nécessité ; Probabilité [Logique] ; Réfutabilité
logique intuitionniste : Catégories et foncteurs
logique mathématique : Computation ; Langages formels ; Topologie
logique modale : Carnap ; Logique et informatique ; Nécessité
logique probabilitaire : Réfutabilité
logique propositionnelle : Réurrence
logoi spermatikoi : Évolutionnisme
loi : Concept
loi biogénétique fondamentale
loi d'Avogadro : Atome ; Avogadro (Loi d') ; Mole ; Molécule ; Symbole
loi de Clausius : Temps
loi de la nature
loi des grands nombres : Probabilité [Logique] ; Statistique
loi éternelle : Loi de la nature
loi scientifique : Conventionalisme ; Invention ; Statistique
lois de développement de von Baer : Développement
lumière : Chaleur ; Couleur ; Corps noir ; Corpuscule ; Cristal ; Éther ; Expansion de l'univers ; Image ; Masse cachée ; Matière [Physique] ; Michelson ; Probabilité [Physique] ; Propagation ; Quantique ; Vision
Lumières : Alembert ; Automate ; Immatérialisme ; Matière ;

Nomenclature ; Origines de la vie ; Progrès ; Sociétés savantes ; Système
Lune : Marées
lutte biologique : Écologie
lutte pour l'existence (Struggle for life) : Darwinisme ; Marx et Darwin ; Roux ; Sélection ; Sociobiologie
lysogénie : Bactériophage ; Jacob ; Lwoff
lysenkisme : Théorie
machine : Automate ; Informatique ; Technique ; Travail ; Vitalisme et mécanisme
machine de Turing : Cognitivisme ; Complexité algorithmique ; Computation ; Information et codage ; Informatique ; Logique et informatique ; Monisme ; Réurrence ; Sciences cognitives ; Turing
machine-outil : Automate
machine thermique : Chaleur ; Crise de la physique moderne ; Énergie ; Entropie
macromolécule : ADN ; Cellule ; Régulation moléculaire
magnatisme : Métamorphisme
magnétisme : Gravitation
maladie de la vache folle : Prion
mathusianisme : Darwinisme ; Marx et Darwin ; Sélection
manipulation génétique : Clonage
manteau terrestre : Courant de convection
marées : Terre
marquage biologique : Embryogenèse
marxisme : Empirionisme ; Lyssenkisme ; Marx et Darwin ; Théorie
masse cachée : Univers
masse inertielle : Équivalence (Principe d') ; Inertie (Principe d') ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Relativité
masse gravitationnelle : Constantes physiques ; Équivalence (Principe d') ; Force ; Gravitation ; Masse ; Matière [Physique] ; Mouvement ; Relativité
masse molaire : Avogadro (Loi d') ; Mole
matérialisme : Bachelard ; Crise de la physique moderne ; Empirionisme ; Idéalisme ; Marx et Darwin ; Physicalisme ; Réductionnisme
matérialisme des Lumières → **Lumières**
matérialisme dialectique : Empirionisme ; Lyssenkisme
matérialisme méthodologique → **physicalisme**
mathématique sociale : Condorcet ; Progrès
mathématiques : Abstraction ; Analyse complexe ; Analyse diophantienne ; Analyse et synthèse ; Analyse fonctionnelle ; Analyse harmonique ; Analyse non standard ; Axiomatisation et formalisation ; Beltrami ; Bourbaki ; Briggs ; Cantor ; Catégories et foncteurs ; Combinatoire ; Complexité algorithmique ; Conjecture ; Constructivisme ; Dedekind ; Démonstration ; Dialectique ; Dummett ; Ensemble ; Équation ; Extension ; Formalisme ; Fourier ; Frege ; Gauss ; Géométries ; Groupes et symétrie ; Hadamard ; Induction ; Induction compétente ; Infini ; Infini mathématique ; Laplace ; Local et global ; Logique et informatique ; Machine de Turing ; Maîtrise de l'erreur ; Modèle ; Monisme ; Platon ; Platonisme ; Poincaré ; Preuve ; Probabilité [Logique] ; Propagation ; Réalisme ; Réurrence ; Singularité ; Statistique ; Structure ; Symétrie ; Théorie ; Topologie ; Vérification ; Weierstrass
mathématiques (fondement des -) : Bourbaki ; Épistémologie ; Logicisme
mathesis universalis : Descartes
matière : Antimatère ; Champ ; Corpuscule ; Lumière ; Masse ; Matière [Physique] ; Maxwell ; Mouvement ; Quantique ; Technique
matière inerte / matière vivante : Origines de la vie
matroïde (structure de -) : Combinatoire
mécanique : Causalité (Principe de) ; Crise de la physique

moderne; Déterminisme; Énergétisme; Énergie; Fourier; Logique et informatique; Lumière; Masse; Mouvement; Réel; Travail

mécanique matricielle: Complémentarité

mécanique newtonienne: Clairaut; Constantes physiques; Déterminisme; Équivalence (Principe d'); Espace: la critique de Mach; Hegel; Irréversibilité; Masse; Naturphilosophie; Réel; Temps; Terre; Virtuel

mécanique quantique: Champ; Complémentarité; Constantes physiques; Controverse Bohr-Einstein; Correspondance (Principe de); Corps noir; Déterminisme; Éléментарité; Espace-temps; Feynman; Indiscernabilité; Invariance de jauge; Irréversibilité; Liaison; Masse; Matière [Physique]; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité 'entre'); Mesure en mécanique quantique; Observable; Pauli; Planck; Probabilité [Physique]; Quantique; Réel; Renormalisation; Schrödinger; Simondon; Sommerfeld; Temps; Théorie; Trou noir; Univers; Virtuel; Weizsäcker

mécanique statistique: Constantes physiques; Corps noir; Irréversibilité; Probabilité [Physique]

mécanisme: Automate; Causalité classique; Nature (Système de la); Technique; Vitalisme et mécanisme

mécanisme cartésien: Lumière; Vitalisme et mécanisme

mécanisme laplacien: Déterminisme

médecin / patient (relation -): Bioéthique

médecine: Anatomie; Automate; Bichat; Bioéthique; Canguilhem; Cartésianisme; Immunologie; Paracelse; Râzi; Récepteur; Vitalisme et mécanisme

médicament: Récepteur

méiose: Cellule

mendélisme: Gène; Génétique; Hybride; Théorie; Vivant (Théorie du)

mesure: Bohr; Facteur d'échelle; Mesure en mécanique quantique; Mole; Observable; Statistique

métalangage: Langages formels

métamathématique: Catégories et foncteurs

métamorphisme: Terre

métamorphogénie: Développement

métaphysique (achèvement de la -): Heidegger et la question de la technique

métaphysique (critique de la -): Cercle de Vienne; Énergétisme; Positivisme; Réfutabilité; Vérification; Wittgenstein et le positivisme logique

méthode: A priori; Découverte; Dédution; Expérience; Induction; Objectivité; Popper; Proposition; Rationalisme; Rationalité; Réfutabilité; Royal Society; Test; Théorie; Validation

méthodes infinitésimales: Euclide; Géométries; Infini mathématique

métis, mulet: Hybride

métrique espace-temps: Trou noir

métrologie: Mesure; Mole

micro-organisme: Cellule; Pasteur contre Pouchet; Régulation moléculaire; Rétrovirus; Virus

microbe: Micro-organisme

microbe d'immunité: Bactériophage

microbiologie: Lwoff; Metchnikoff; Micro-organisme

microcosme-macrocosme: Loi biogénétique fondamentale

microscope: Cellule

microscope achromatique: Neurone

microtome: Neurone

milieu: Environnement

milieu intérieur: Bernard

minéralogie: Cristal; Métamorphisme

miracle: Reproductibilité

mirrors tournants (expérience de Foucault sur les -): Test

mitose: Cellule

modèle standard: Éléментарité

modélisation: Complexité; Modèle

modus ponens: Dédution; Validation

moelle épinière: Réflexe

mole: Avogadro (Loi d'); Avogadro (Nombre d'); Chimie physique

moléculaire (génétique -): Génétique

molécule: Atome; Avogadro (Loi d'); Chimie physique; Cristal; Entropie; Gaz (Théorie des); Matière [Physique]; Mole; Pasteur contre Pouchet; Stéréochimie; Synthèse; Valence

molécule-cible: Synthèse

molécule-gramme: Chimie physique; Mole

monade: Automate; Leibniz; Mouvement

mondes possibles: Génération spontanée; Nécessité

monisme: Empirionisme; Loi biogénétique fondamentale; Objectivité

monstre: Embryogenèse; Hybride

montagne (formation des -s): Orogenèse; Tectonique des plaques

morphisme: Catégories et foncteurs; Singularité

morphogénèse: Vivant (Théorie du)

morphologie: Forme

morphologie transcendantale: Développement

mort: Cellule; Oncogène; Plasma germinatif; Vitalisme et mécanisme

moteur: Force; Inertie (Principe d')

moteur calculant: Computation

moteur perpétuel: Trou noir

motus reflexus: Réflexe

mouvement brownien: Avogadro (Nombre d')

mouvement: Bruno; Causalité (Principe de); Causalité classique; Équivalence (Principe d'); Force; Gravitation; Impetus; Inertie (Principe d'); Kepler; Masse; Nature (Système de la); Relativité

mouvements isotatiques: Dérive des continents

muon: Temps; Yukawa

muscle: Réflexe

Muséum national d'histoire naturelle

musique: Pythagorisme

mutabilité: De Vries; Espèce; Évolutionnisme; Gène; Génétique

mutagenèse: Agronomie

mutation: Évolutionnisme; Hasard; Lyssenkisme; Sélection; Théorie

Mystique: Wittgenstein et le positivisme logique

mythe d'Er: Principe anthropique

nature: Heidegger et la question de la technique; Loi de la nature; Nature (Système de la); Naturphilosophie; Technique

Naturphilosophie: Anatomie comparée; Causalité (Principe de); Développement; Dialectique; Goethe; Hegel; Loi biogénétique fondamentale; Wittgenstein et le positivisme logique

nazisme: Eugénisme

nécessité: Téléologie; Validation

néodarwinisme: Darwinisme; Évolutionnisme; Plasma germinatif; Sociobiologie; Théorie; Vivant (Théorie du)

néolamarckisme: Évolutionnisme; Lamarckisme; Roux

Néoplatoniciens de Cambridge: Platonisme

néopositivisme: Cercle de Vienne; Wittgenstein et le positivisme logique

neptunisme: Métamorphisme; Stratigraphie

neurobiologie: Neurone; Sciences cognitives

neurocybernétique: Monisme

neurone, **neurologie**: Cellule; Cognition et sciences cognitives; Neurophilosophie; Réflexe; Sciences cognitives

neurophilosophie: Sciences cognitives

neurophysiologie: Localisations cérébrales; Récepteur; Réflexe; Vision

neurosciences: Cognition et sciences cognitives; Cognitivisme

neutrino: Antimatière; Matière [Physique]; Pauli

newtonianisme → **mécanique newtonienne**; **physique newtonienne**

niche écologique: Écologie

nombre: Analyse diophantienne; Dedekind; Ensemble; Extension; Frege; Groupes et symétrie; Infini mathématique; Informatique; Logicisme; Pythagorisme; Récurrence

nombre d'Avogadro: Avogadro (Nombre d'); Gaz (Théorie des); Probabilité [Physique]

nomenclature* <chim.>: Lavoisier; Progrès

nominalisme: Conventionalisme; Logique et informatique; Nominalisme antique

nominalisme médiéval: Impetus; Nominalisme antique

non-contradiction (preuve de -): Formalisme; Machine de Turing

normativité: Canguilhem

nomum: Phénomène; Phénoménisme

nucléotide: Information

objectivisme: Objectivité

objectivité*: Einstein; Reproductibilité

objet mathématique: Constructivisme; Platonisme

observable* <phys.>: Bohr; Principe anthropique

observation: Épistémologie; Expérience; Expérience cruciale; Fait; Objectivité; Parcimonie; Réfutabilité

obstacle épistémologique: Continuité; Rupture

océan: Courant de convection; Subsidence; Tectonique des plaques

ockhamisme: Nominalisme antique

œil: Image; Vision

oncogène*: Rétrovirus

onde gravitationnelle: Trou noir

onde sismique: Terre

onde-corpuscule (dualité -): Complémentarité; Corpuscule; Lumière; Matière [Physique]; Quantique

ondes électromagnétiques: Lumière; Propagation

ondes stationnaires: Marées

ontogénèse: Anatomie comparée; Développement; Embryogenèse; Haeckel; Loi biogénétique fondamentale; Plasma germinatif; Vivant (Théorie du)

ontologie: Objectivité; Phénoménologie

opérationnalisme*: Bunge

ophtalmologie: Vision

optimisation: Rationalité

optique: Couleur; Cristal; Éther; Goethe; Image; Lumière; Structure; Vision

ordinateur: Automate; Complexité; Computation; Informatique; Logique et informatique; Machine de Turing; Sciences cognitives; Turing

ordinaux transfinis: Ensemble; Infini mathématique

organe: Anatomie comparée; Vitalisme et mécanisme

origines de la vie*: ADN; Génération spontanée; Pasteur contre Pouchet; Schwann

orogénèse: Catastrophisme; Courant de convection; Expansion terrestre; Tectonique des plaques; Terre

orthogénèse: Évolutionnisme

orthogonalité: Analyse fonctionnelle

ovisme: Harvey; Spallanzani; Van Leeuwenhoek

ovocyte énucléé: Clonage

oxydo-réduction: Stahl

oxygène: Acide et base; Nomenclature; Phlogistique; Sel

paléobiologie: Catastrophisme

paléontologie: Anatomie comparée; Cuvier; Depéret; Fossile; Lamarck

paléontologie des vertébrés: Catastrophisme

paléontologie évolutionniste: Gaudry

palingénésie: Évolutionnisme

pangenèse: Miescher; Weismann

pangenèse intracellulaire: De Vries

panspermie, pangenèse: Gène; Origines de la vie

paradigme*: Controverses; Épistémologie; Expérience; Kuhn; Réalisme; Réfutabilité; Révolution scientifique; Rupture; Simondon; Système; Théorie

paradoxe <log.>: Logicisme

paradoxe des « corbeaux »: Induction

paradoxe du chat de Schrödinger: Mesure en mécanique quantique

paradoxe « vie » de Goodman: Induction

paradoxes de Zénon: Géométries; Immatérialisme; Infini; Platon

parahérédité: Bactériophage

parallèle (postulat euclidien des -s): Géométries

paramètres différentiels de Lamé: Beltrami

parcimonie*: Nominalisme antique

parthénogénèse: Hybride

particule: Avogadro (Loi d'); Champ; Corpuscule; Électron; Indiscernabilité; Virtuel; Yukawa

pascaline: Informatique

pathogène (agent -): Prion

patient / médecin (relation -): Bioéthique

patrimoine génétique: Gène; Génétique; Nature

patristique: Fossile; Platonisme

Pentagramme (Pentalpha): Pythagorisme

perception: Donné; Espace; la critique de Mach; Helmholtz; Phénomène; Rationalisme; Symétrie

perception spatiale: Forme

permutation: Groupes et symétrie

perspective: Géométries; Image; Transformation géométrique; Vision

pesantur: Inertie (Principe d')

peste: Épidémie

phage: Bactériophage; Lwoff

phagocytose: Metchnikoff

pharmacie, pharmacologie: Baumé; Récepteur

phénétique: Classification [Botanique]

phénomène*: Carnap; Criticisme; Découverte; Expérience; Objectivité; Observable; Réalisme; Théorie

phénoménisme*: Immatérialisme

phénoménologie*: A priori; Intentionnalité; Vision

phénoménologie hégélienne: Hegel; Phénomène

phénoménologie husserlienne: Donné; Husserl; Phénoménologie; Transcendantal

philosophie analytique: Cercle de Vienne; Méthode; Quine; Sciences cognitives; Wittgenstein et le positivisme logique

phlogistique*: Chaleur; Élément; Gaz; Matière; Stahl

photon: Corps noir; Matière [Physique]; Probabilité [Physique]; Quantique

phrénologie: Localisations cérébrales

phylogénèse: Anatomie comparée; Vivant (Théorie du)

phylogénie: Classification [Botanique]; Développement; Embryogenèse; Loi biogénétique fondamentale

phylum: Anatomie comparée

physicalisme*: Carnap; Cercle de Vienne; Conventionalisme; Épistémologie; Monisme; Objectivité; Réductionnisme; Smart; Vérification; Wittgenstein; Wittgenstein et le positivisme logique

physiologie: Anatomie comparée; Bernard; Harvey; Hybride; Localisations cérébrales; Loeb; Monisme; Neurone; Pavlov; Récepteur; Réflexe; Régulation moléculaire; Schwann; Sherrington; Spallanzani; Travail; Vitalisme et mécanisme

physique : Antimatière ; Atome ; Avogadro (Loi d') ; Avogadro (Nombre d') ; Becquerel ; Bunge ; Carnot S. ; Cartésianisme ; Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Chaleur ; Champ ; Chaos et déterminisme ; Controverse Bohr-Einstein ; Corps noir ; Corpuscule ; Correspondance (Principe de) ; Crise de la physique moderne ; Cristal ; Déterminisme ; Électron ; Élémentarité ; Énergétisme ; Énergie ; Entropie ; Espace ; la critique de Mach ; Maxwell ; Éther ; Fin thermique de l'univers ; Force ; Gaz (Théorie des) ; Impetus ; Indiscernabilité ; Infini ; Invariance de jauge ; Irréversibilité ; Langevin ; Laue ; Lumière ; Mach ; Masse ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Michelson ; Observable ; Pauli ; Planck ; Principe anthropique ; Propagation ; Quantique ; Réel ; Relativité ; Renormalisation ; Rutherford ; Schrödinger ; Sommerfeld ; Symétrie ; Temps ; Test ; Thématique ; Théorie ; Travail ; Virtuel

physique aristotélicienne : Causalité classique ; Causalité (Principe de) ; Élément ; Expérience ; Force ; Gravitation ; Hasard ; Héliocentrisme ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Loi de la nature ; Mouvement ; Virtuel

physique cartésienne : Cartésianisme ; Inertie (Principe d')
physique galiléenne : Causalité (Principe de) ; Causalité classique ; Expérience ; Force ; Gaillie ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Marées ; Mouvement ; Technique ; Temps ; Terre ; Virtuel

physique leibnizienne : Indiscernabilité ; Leibniz
physique mathématique : Analyse fonctionnelle
physique newtonienne : Causalité classique ; Champ ; Force ; Hasard ; Hegel ; Indiscernabilité ; Inertie (Principe d') ; Lumière ; Marées ; Mouvement ; Univers ; Virtuel

physique nucléaire : Yukawa
physique spéculative : Naturphilosophie
physique statistique : Corps noir ; Gaz (Théorie des)
physis : Loi de la nature

phytosociologie : Ecologie
piézoélectricité : Cristal
pile de Volta : Electrochimie
plan projectif fini : Combinatoire

plante (classification des -s) : Taxinomie
plaques lithosphériques : Courant de convection ; Stratigraphie ; Subsidence ; Tectonique des plaques

plasma germinatif* : Gène ; Génération spontanée ; Vivant (Théorie du) ; Weismann

platonisme* : Dialectique ; Gravitation ; Héliocentrisme ; Nature (Système de la) ; Phénomène ; Platon ; Réalisme

plutonisme : Métamorphisme ; Terre

pneumocoque : Institut Rockefeller
poids : Gravitation ; Masse

poids atomique : Atome ; Electrochimie ; Mole
poids moléculaire : Avogadro (Loi d') ; Chimie physique ; Mole ; Molécule

poison : Récepteur
polarisation de la lumière : Cristal ; Éther

pollution : Environnement ; Précaution

polyèdre : Pythagorisme ; Topologie

positivisme* : Découverte ; Induction ; Scientisme ; Wittgenstein
positivisme comtien : Comte ; Crise de la physique moderne ; Épistémologie ; Loi de la nature ; Phénoménisme ; Positivisme ; Progrès ; Travail

positivisme logique : Cercle de Vienne ; Épistémologie ; Expérience ; Fait ; Nécessité ; Objectivité ; Phénoménisme ; Positivisme ; Réductionnisme ; Wittgenstein et le positivisme logique

positronium : Antimatière
postulat d'Euclide : Conjecture

potentialisme aristotélicien : Infini ; Infini mathématique

potentiel chimique : Affinité
pragmatisme* : Induction ; Vérité

précaution*

prédicat : Abstraction ; Analogie ; Induction ; Nécessité ; Proposition

prédictivisme : Constructivisme
prédiction : Réfutabilité ; Test ; Validation

préformationnisme : Bonnet ; Développement ; Évolutionnisme ; Gène ; Génération spontanée ; Monstre

préformisme : Spallanzani ; Van Leeuwenhoek
prémisse : Proposition

présupposé thématique de base : Thématique
preuve* : Démonstration ; Duhem ; Expérience ; Test ; Vérification ; Vérité ; Wittgenstein

principe anthropique*
principe de complémentarité de Bohr : Controverse Bohr-Einstein

principe de contradiction : Vérité
principe de Dirichlet : Local et global

principe de Huygens-Fresnel : Lumière
principe de Mach : Masse

principe de permanence : Analogie
principe de raison suffisante : Complexité ; Déterminisme ; Nécessité

principe d'identité : Vérité
principe d'inertie : Causalité classique ; Constantes physiques ; Force ; Gravitation ; Impetus ; Inertie (Principe d') ; Masse ; Mouvement ; Relativité

principe ergodique : Probabilité [Physique]
principisme : Bioéthique

printanisation : Lyssenkisme
prion* : ADN ; Micro-organisme

prisme de Newton : Couleur ; Lumière ; Vision
Prix Nobel des sciences*

probabilité : Borel ; Hasard ; Induction ; Méthode ; Probabilité (Logique) ; Rationalité ; Statistique

probabilité bayésienne : Corroboration ; Induction ; Réfutabilité

probabilité physique : Corps noir ; Feynman ; Irréversibilité ; Probabilité [Physique]

problème de Hume : Empirisme ; Popper
problème de Molyneux : Vision

processus de Markov : Récurrence
procréation médicalement assistée : Embryogenèse

profondeur logique : Information et codage
programme d'Erlangen : Géométries ; Groupes et symétrie ; Local et global ; Modèle ; Structure ; Transformation géométrique

programme génétique : ADN ; Gène ; Génétique ; Information
progrès : Continuité ; Paradigme ; Rupture ; Spencer

propagation de la lumière : Éther ; Lumière ; Masse cachée ; Michelson ; Propagation ; Trou noir ; Vision

prophage : Bactériophage
prophylaxie de l'infection : Nicolle

proposition* : Duhem ; Vérité ; Wittgenstein
prospectivité industrielle : Trou noir

protase : Nécessité
protéine : Biotechnologies ; Prion ; Régulation moléculaire

prothèse médicale : Automate
protiste : Micro-organisme

proton : Antimatière
protoplasme : Haeckel ; Origines de la vie ; Weismann

protozoaire : Micro-organisme
psycho-physiologie : Empirionisme

psychologie : Bergsonisme ; Loi biogénétique fondamentale ; Piaget ; Rationalisme

psychologie de la forme : Forme ; Vision
psychologisme : Logicisme

pyroélectricité : Cristal
pythagorisme* : Héliocentrisme ; Platon ; Pythagore

Q : Race
quadrature : Équation ; Méthodes infinitésimales

qualité occulte : Champ
quanta : Complémentarité ; Corps noir ; Quantique

quantification : Langages formels
quantité de matière : Masse ; Matière [Physique]

quanton : Corpuscule ; Indiscernabilité ; Virtuel
quasar : Trou noir

quasi-cristaux : Cristal
querelle des forces vives : Travail

querelle des universaux : Nominalisme antique

race*
racisme : Darwinisme ; Eugénisme ; Race

radioactivité* : Becquerel ; Rutherford
radiocristallographie : Cristal

raison : A priori ; Criticisme ; Rationalisme ; Rationalité
raison automatique : Automate

raison suffisante (principe de -) : Complexité ; Déterminisme ; Nécessité

raisonnement : Abduction
raisonnement heuristique : Computation

raisons séminales : Évolutionnisme
rasoir d'Ockham : Nominalisme antique ; Russell

rationalisme* : Cognition et sciences cognitives ; Cognitivism ; Rationalité ; Sciences cognitives ; Théorie ; Vérification ; Vérité

rationalité* : Cercle de Vienne ; Complexité ; Épistémologie ; Fait ; Induction ; Informatique ; Positivisme

rayon cathodique : Electrochimie ; Électron
rayon visuel : Image ; Lumière ; Vision

rayonnement : Big bang ; Corpuscule ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre)

rayonnement du corps noir : Corps noir ; Planck
rayonnement du fond du ciel : Principe anthropique

rayonnement électromagnétique : Big bang ; Corps noir ; Quantique

rayons uraniques : Radioactivité
rayons X : Cristal ; Laue ; Radioactivité

réaction chimique : Catalyse ; Valence
réalisme* : Atomisme logique ; Découverte ; Donné ; Fait ; Gödel ; Idéalisme ; Meyerson ; Objectivité ; Pragmatisme ; Putnam ; Validation

récepteur* : Cellule ; Immunologie ; Régulation moléculaire
recherche médicale : Immunologie ; Institut Pasteur ; Institut Rockefeller ; Sida

recherche scientifique : Découverte ; Muséum national d'histoire naturelle ; Idonisme

récurrence* : Computation ; Dédution ; Gödel ; Induction complète ; Machine de Turing

reductio ad absurdum : Dédution ; Démonstration
réduction interthéorique : Réductionnisme

réduction phénoménologique : Phénoménologie ; Transcendantal

réductionnisme* : Vérification
réel* : Donné ; Fait

référentiel <phys.> : Facteur d'échelle ; Gravitation ; Relativité
réflexe* : Neurone ; Pavlov ; Sherrington

réfraction de la lumière : Couleur ; Éther ; Lumière
refroidissement (théorie géologique du -) : Actualisme ou uniformitarisme ; Terre

refutabilité*, **réfutation** : Corroboration ; Dialectique ; Duhem ; Expérience ; Objectivité ; Réfutabilité ; Reproductibilité ; Test ; Vérification

régulation moléculaire* : Monod ; Vie
relations d'indétermination de Heisenberg : Controverse Bohr-Einstein ; Indiscernabilité ; Observable

relativité générale : Big bang ; Champ ; Constantes physiques ;

Déterminisme ; Einstein ; Élémentarité ; Équivalence (Principe d') ; Expansion de l'univers ; Facteur d'échelle ; Feynman ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Mesure en mécanique quantique ; Michelson ; Mouvement ; Relativité ; Temps ; Trou noir ; Univers

relativité restreinte : Champ ; Espace ; la critique de Mach ; Espace-temps ; Gravitation ; Masse ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre) ; Michelson ; Relativité

religion et science : Bergsonisme ; Créationnisme ; Loi biogénétique fondamentale ; Scientisme ; Teilhard de Chardin

renormalisation* : Facteur d'échelle ; Feynman ; Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre)

renversement du temps : Irréversibilité
repos de la Terre : Géocentrisme

reproductibilité* : Corroboration ; Expérience ; Objectivité
réseau*

résidu (théorie mathématique des) : Analyse complexe
résolution : Équation

réticulariste (théorie -) : Neurone
rétine : Image

réduction : Abduction
rétrovirus* : Sida ; Virus

reverse-transcriptase : Rétrovirus
révolution copernicienne : Copernic ; Révolution scientifique

révolution scientifique* : Continuité ; Controverses ; Découverte ; Épistémologie ; Kuhn ; Paradigme ; Rupture ; Théorie

rhodopsine : Vision
ribosome : Classification [Botanique]

robot : Automate
roche métamorphique : Métamorphisme

rotondité de la Terre : Héliocentrisme
Royal Society* : Académies ; Progrès ; Réseau

ruban de Möbius : Topologie
rupture épistémologique : Bachelard ; Continuité ; Controverses ; Foucault ; Paradigme ; Révolution scientifique ; Rupture

saint-simonisme : Travail
saltationnisme : Gène

santé publique : Épidémie ; Immunologie ; Sida
« sauver les phénomènes » : Géocentrisme ; Phénomène ; Réalisme ; Théorie ; Virtuel

science naturelle : Anatomie comparée ; Muséum national d'histoire naturelle ; Taxinomie

science unifiée : Physicalisme ; Positivisme
scientisme* : Académies ; Vulgarisation

scolastique : Impetus ; Inertie (Principe d') ; Nécessité ; Nominalisme antique

sécrétion psychique : Pavlov
sédimentation : Subsidence

séisme : Tectonique des plaques
sélection animale : Agronomie

sélection artificielle : Darwinisme ; Eugénisme ; Race ; Sélection

sélection naturelle : Biogéographie ; Darwinisme ; Eugénisme ; Evolutionnisme ; Génération spontanée ; Lamarckisme ; Plasma germinatif ; Sélection ; Sociobiologie ; Taxinomie ; Téléologie ; Vivant (Théorie du) ; Weismann

sélection végétale : Agronomie
sels (théorie des) : Acide et base ; Analyse chimique ; Classification (Chimie) ; Sel

sémantique : Nécessité ; Vérité
semences pétrifiantes : Fossile

sens commun : Continuité
sensation : Automate ; Donné ; Empirionisme ; Espace ; la critique de Mach ; Mach ; Objectivité ; Vision

sensationnisme : Objectivité

sense-data : Donné
sensibilité aux conditions initiales (sci) : Chaos et déterminisme
sensualisme / innéisme : Vision
séries de Fourier : Analyse fonctionnelle ; Analyse harmonique
serment d'Hippocrate : Bioéthique
séropositivité : Sida
sida* : Immunologie ; Institut Pasteur ; Rétrovirus
signification : Nominalisme antique ; Quine ; Vérification ; Vérité
singularité de Schwarzschild : Trou noir
sismologie : Tectonique des plaques ; Terre
sociobiologie* : Écologie comportementale ; Race
sociologie des sciences : Découverte ; Immunologie ; Instrument ; Paradigme ; Reproductibilité ; Réseau ; Thématas
Soleil : Héliocentrisme ; Kepler ; Marées ; Trou noir
solipsisme méthodologique : Objectivité
sondage : Statistique
spectre de la galaxie : Constante de Hubble
spectrométrie : Analyse chimique
sphère : Géocentrisme ; Isopérimètre ; Terre
sphère des fixes : Kepler
sphéroïde : Marées
sphygmographe : Mesure
spin : Espace-temps
stalinisme : Lyssenkisme
stationnariste (modèle-) : Actualisme ou uniformitarisme
statistique* : Induction ; Crise de la physique moderne ; Gaz (Théorie des) ; Probabilité (Logique) ; Réfutabilité
statistique de Boltzmann : Indiscernabilité
stéréochimie* : Cristal ; Miescher
stérilisation humaine : Eugénisme
stoéchiométrie : Atome
stoïcisme ancien : Déduction ; Évolutionnisme
stratigraphie* : Fossile
structuralisme <math.> : Axiomatisme et formalisation ; Ensemble ; Formalisme ; Groupes et symétrie ; Logocisme ; Structure ; Transformation géométrique
structure : Réseau
structure chimique : Stéréochimie
subjectivisme : Objectivité ; Transcendantal
sublunaire : Héliocentrisme
subsidence*
substance : Abstraction ; Immatérialisme ; Infini mathématique ; Leibniz ; Nominalisme antique ; Phénomène ; Vision
substitution algébrique : Groupes et symétrie
sujet / objet : Phénomène
sujet / prédicat : Forme
surcorps : Extension
surface à courbure constante : Beltrami
surface de Riemann : Analyse complexe ; Formalisme ; Local et global
survivance du plus apte : Sélection
syllogisme : Analogie ; Forme ; Validation
syllogisme aristotélicien : Déduction ; Démonstration ; Méthode ; Proposition
symbole* : Cognition et sciences cognitives ; Computation
symbolisme algébrique : Équation
symbolisme logique : Langages formels
symétrie* <math. / phys.> : Groupes et symétrie ; Invariance de jauge ; Structure
symétrisation de Steiner : Isopérimètre
sympathie / antipathie chimiques : Affinité
synapse : Sherrington
synthèse chimique : Chimie physique ; Molécule ; Synthèse
synthèse évolutive : Sélection
synthèse mathématique : Analyse et synthèse
synthèse organique : Synthèse

stématique phylogénétique : Classification [Botanique]
système expert : Computation ; Simondon
système nerveux : Localisations cérébrales ; Monisme ; Neurone ; Réflexe ; Sherrington
système solaire : Masse cachée ; Univers
systémique : Système

table d'affinité
tableau de Mendeleïev : Radioactivité
tautologie : Validation
tautologie : Langages formels ; Validation ; Vérification
taxinomie* : Classification [Botanique] ; Écologie
taylorisme : Automate
technique* : Automate ; Empirionisme ; Heidegger et la question de la technique ; Nature ; Reproductibilité ; Simondon
techno-intelligence : Automate
technologie : Heidegger et la question de la technique ; Instrument ; Technique
technoscience : Heidegger et la question de la technique ; Phénoménologie ; Reproductibilité ; Technique
tectologie : Empirionisme
tectonique des plaques* : Courant de convection ; Dérive des continents ; Expansion terrestre ; Orogenèse ; Wegener
téléologie* : Complexité ; Marx et Darwin
téléonomie : Téléologie
télescope spatial : Constante de Hubble
temps* : Bergsonisme ; Énergie ; Espace-temps ; Infini ; Irréversibilité ; Symétrie
tératogénie : Embryogenèse
tératologie : Anatomie comparée ; Embryogenèse ; Hybride ; Monstre
Terre* : Bruno ; Courant de convection ; Dérive des continents ; Expansion terrestre ; Géocentrisme ; Héliocentrisme ; Inertie (Principe d') ; Marées ; Tectonique des plaques ; Wegener
test* : Expérience cruciale ; Duhem ; Méthode ; Preuve ; Quine ; Réfutabilité ; Validation ; Vérification
test d'intelligence : Race
Tétraktys : Pythagore ; Pythagorisme
tétravalence : Valence
théisme évolutionniste : Évolutionnisme
thémata* : Controverses
théorème de Descartes-Euler : Cartésianisme
théorème de Hasse-Minkowski : Local et global
théorème de Ramsey : Combinatoire
théorème H : Irréversibilité
théorie cellulaire : Cellule ; Génération spontanée ; Neurone ; Schwann ; Vitalisme et mécanisme ; Vivant (Théorie du)
théorie de l'information : Complexité
théorie des nombres : Analyse diophantienne ; Groupes et symétrie
théorie du système général (gst) : Système
théorie scientifique : Continuité ; Conventionalisme ; Corroboration ; Duhem ; Fait ; Modèle ; Objectivité ; Parcimonie ; Rationalisme ; Réalisme ; Réductionnisme ; Réfutabilité ; Révolution scientifique ; Test ; Théorie ; Van Fraassen
thérapie génique : Biotechnologies
thermochimie : Affinité
thermodynamique : Carnot S. ; Chaleur ; Corps noir ; Crise de la physique moderne ; Énergétisme ; Énergie ; Entropie ; Fin thermique de l'univers ; Probabilité [Physique] ; Temps
thermométrie : Chaleur ; Entropie ; Mesure ; Mesure en mécanique quantique
tiers-exclu (principe du-) : Constructivisme ; Démonstration ; Dummett
tissu nerveux : Neurone
tomographie : Terre

topologie* : Catégories et foncteurs ; Local et global ; Singularité
totipotence : Clonage
traduction : Réalisme ; Vulgarisation
transcendantal* : A priori ; Criticisme ; Naturphilosophie ; Objectivité ; Phénomène
transduction : Récepteur
transfini : Infini mathématique
transformation géométrique* : Groupes et symétrie
transformée de Fourier : Analyse harmonique
transformisme : Buffon ; Catastrophisme ; Depéret ; Espèce ; Évolutionnisme ; Fossile ; Gaudry ; Gène ; Lamarck ; Lamarckisme ; Lyell ; Monstre ; Vivant (Théorie du)
translation continentale : Dérive des continents ; Tectonique des plaques
transmission héréditaire des caractères acquis : Plasma germinatif
transmutation : Alchimie
travail* : Économie théorique ; Empirionisme ; Technique
trichromique (théorie-) : Couleur
trigonométrie : Analyse harmonique
trois états (loi des-) : Comte
trope : Déduction
tropisme : Loeb
trou noir* : Mécanique quantique et relativité (Compatibilité entre)
tuberculine : Koch ; Spengler
ultramicrobe : Bactériophage
uniformitarisme : Actualisme ou uniformitarisme ; Catastrophisme ; Lyell
unifimité du cours de la nature (principe d'-/UCN) : Induction
unité de la science : Objectivité ; Réductionnisme
univers* : Constante de Hubble ; Expansion de l'univers ; Fin thermique de l'univers ; Kepler ; Masse cachée ; Principe anthropique
univers en expansion : Constante de Hubble ; Expansion de l'univers
univers primordial : Big bang
universaux : Nominalisme antique ; Platonisme
universaux <math.> : Abstraction
Ure (théorie des-) : Weizsäcker
urne de Bernoulli (modèle de l'-) : Statistique
vaccination : Épidémie ; Immunologie ; Institut Pasteur ; Institut Rockefeller ; Koch ; Pasteur contre Pouchet
valence* : Affinité ; Liaison ; Molécule

validation* : Déduction ; Expérience ; Induction ; Méthode ; Preuve ; Test
vérifiabilité (principe de-) : Rationalité ; Vérification
vérification* : Cercle de Vienne ; Conjecture ; Maîtrise de l'erreur ; Rationalisme ; Rationalité ; Réfutabilité ; Validation ; Wittgenstein
vérificationnisme : Vérification
vérisimilitude : Rationalité ; Test ; Théorie
vérité* : A priori ; Atomisme logique ; Démonstration ; Évidence ; Fait ; Logicisme ; Nécessité ; Pragmatisme ; Preuve ; Rationalisme ; Vérification ; Wittgenstein
vernalisaiton : Lyssenkisme
vertébré : Anatomie comparée
vide : Atome ; Impetus ; Matière [Physique]
vide quantique : Principe anthropique
vie : Automate ; Bergsonisme ; Bichat ; Canguilhem ; Cellule ; Delbrück ; Espèce ; Matière ; Micro-organisme ; Plasma germinatif ; Schwann ; Vitalisme et mécanisme
vie (origines de la-) : ADN ; Génération spontanée ; Origines de la vie ; Pasteur contre Pouchet ; Schwann
VII : Sida
viriculture : Eugénisme
virologie : Bactériophage ; Immunologie ; Sida
virtuel* : Champ ; Constantes physiques ; Énergie ; Force ; Quantique
virus* : Bactériophage ; Immunologie ; Micro-organisme ; Rétrovirus ; Sida
vis impressa : Force ; Gravitation
vis insista : Force ; Gravitation
vis viva (force vive) : Énergie
vision* : Euclide ; Image ; Immatérialisme ; Razi
vitalisme : Bichat ; Cellule ; Déterminisme ; Simondon ; Stahl ; Vie ; Vitalisme et mécanisme
vitesse : Force
vitesse cosmologique : Constante de Hubble
vitesse de la lumière : Constantes physiques ; Lumière ; Michelson ; Trou noir
vitesse radiale : Constante de Hubble
vivant (théorie du-)* : ADN ; Buffon ; Cellule ; Classification [Botanique] ; Cuvier ; Darwinisme ; Espèce ; Gène ; Génétique ; Haeckel ; Lamarckisme ; Mayr ; Mendel ; Plasma germinatif ; Sélection ; Taxinomie ; Vie ; Weismann
volcanisme : Terre
vortex : Antimatière
vulgarisation*
zoologie : Anatomie comparée ; Écologie comportementale ; Haeckel ; Micro-organisme ; Sociobiologie

Cet ouvrage a été mis en pages
par Facompo
5, rue Calmette-et-Guérin
14100 Lisieux

Imprimé en France
par France Quercy
ZA des Grands Camps
46090 Mercuès

N° d'impression : 51035/
Dépôt légal : août 2006