

LES CAHIERS

LE MONDE DES

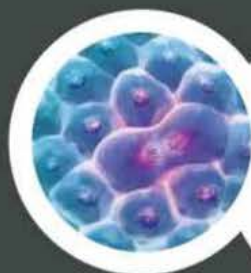
Sciences

Trimestriel - Mai/Juin/Juillet 2014

NewScientist

TOUT SAVOIR SUR...

- **LE GRAPHÈNE**
- LES TREMBLEMENTS DE TERRE
- **L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE**
- LA SÉLECTION DE GROUPE
- **LES FOSSILES**
- L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE
- **L'ÉPIGÉNÉTIQUE**
- LE CERVEAU HUMAIN
- **LE SIDA**



Version Digitale
LEKIOSK.FR

Les 5 sens de l'arbre, des plantes
électriques à cultiver chez soi,
la pharmaculture...

+ un dossier thématique
LA **RÉVOLUTION**
végétale



**Pourquoi lire
Le monde des Sciences
sur iPad ?**

Quoi de plus que le papier ?

- ✓ Des vidéos inédites et des schémas animés pour illustrer les articles,
- ✓ Une mise en page interactive, spécialement conçue pour la lecture sur tablette,
- ✓ Un nouveau système d'abonnement,
- ✓ La possibilité de partager les articles sur les réseaux sociaux ou par email,
- ✓ Des mises à jour après la parution,
- ✓ La sauvegarde des numéros dans le Cloud,
- ✓ Une résolution d'écran proche du papier, etc.

Essayez-le !



Version **digitale enrichie, conçue
spécialement pour les tablettes**



Siège social
Mondeo publishing SAS
27, avenue de l'Opéra 75001 Paris

Coordonnées de la rédaction
Mondeo Publishing SAS
Le Monde des sciences
4, rue Poirier 94160 Saint-Mandé
Tél. : 01 75 43 09 09
Fax : 01 75 43 40 18
redaction@mondeo.fr

Coordonnées du service Lecteurs
(abonnements et correspondances)
Mondeo Publishing SAS
Le Monde des sciences
4, allée Charles V 94300 Vincennes
Tél. : 01 75 43 09 09
lecteur@mondeo.fr
ou retrouvez-nous sur
[Facebook.com/monde.sciences](https://www.facebook.com/monde.sciences)

Directeur de la publication
et de la rédaction
Gilles Harpoutian
(harpoutian@mondeo.fr)

Ont collaboré à ce numéro :

Adrian Bird, Andre Geim, Antonio Castro Neto, Clémence Gueidan, David Sloan Wilson, Elizabeth Pisani, Esther Leburgue, Frank Close, Hélène Perrin, Marine Haquin, Maryse Chaballier, Michael Duff, Michael O'Shea, Nolwenn Le Jannic, Pat Shipman, Peter Norvig, Phil Walker, Richard Garwin, Sabine Casalonga, Stephen Blundell, Susan Hough, Caroline Lormeau (maquette), Séverine Soury (maquette).

NewScientist

© 2012 Reed Business Information Ltd, England
New Scientist is published weekly
by Reed Business Information Ltd.
Ce magazine est publié sous licence
d'exploitation avec Reed Business
Information Ltd. Il est basé pour partie sur
des articles, reportages, ou visuels de la
rédaction de Newscientist publiés dans
son édition anglaise hebdomadaire, avec
l'accord des auteurs et ayants droit.

Service ventes et réassorts
pour les marchands
Pagure Presse
01 44 69 82 82

Distribution
MLP

Commission paritaire et ISSN
CCPAP - en cours
ISSN - 2262-3337

Ce magazine est imprimé en France
à Ruitz (62) chez Léonce-Déprez.

Toute reproduction des textes, photos, graphismes
publiés dans ce magazine est interdite.

LE MONDE DES Sciences

Ce qu'il faut savoir!

1

Ces cahiers sont
trimestriels.
Le prochain
numéro (n° 4)
paraîtra
le 12 septembre
2013.

2

Votre magazine
est conçu avec
NewsScientist,
l'une des plus grandes
rédactions de
journalistes scientifiques
au monde.

3

Son contenu est
basé sur **l'actualité**
la plus récente.
Nos articles sont
le fruit d'un véritable
travail d'investigation
journalistique.

ÉDITORIAL

GILLES HARPOUTIAN, DIRECTEUR DE LA RÉDACTION

À la fin du 19^e siècle, environ 4 milliards de châtaigniers d'Amérique (*Castanea dentata*) recouvraient les États-Unis. Mais aux alentours de 1900, une espèce de châtaignier d'Asie fut introduite, hébergeant en son sein un champignon parasite (*Cryphonectria parasitica*) qui aura fait disparaître la quasi-totalité des châtaigniers américains en une cinquantaine d'années. Il y a vingt ans est né un projet national visant à restaurer cette espèce emblématique. Et il semble enfin porter ses fruits. William Powell et Charles Maynard de la State University of New York à Syracuse ont modifié génétiquement des arbres pour qu'ils résistent au parasite. Ces arbres nommés « Darling4 » contiennent un gène du blé capable de détruire l'acide produit par le parasite qui entraîne des lésions sur l'arbre. Après avoir infecté des feuilles et des racines de Darling4 avec le parasite, l'équipe a constaté que l'arbre, mais aussi ses jeunes pousses, sont beaucoup

plus résistants que les châtaigniers non modifiés. À terme, l'équipe de chercheurs espère pouvoir en planter partout, « les graines seront distribuées au public au cours d'un programme à but non lucratif », nous a confié Charles Maynard. Voilà qui permettrait à tout un pays de s'unir pour sauver l'arbre le plus emblématique de ses forêts. « Les sociétés ont progressé dans la mesure où elles-mêmes, leurs sous-groupes et enfin leurs individus, ont su stabiliser leurs rapports, donner, recevoir, et enfin, rendre » écrivait en 1923 Marcel Mauss, l'un des pères français de l'anthropologie. Dans notre cahier encyclopédique sur la sélection de groupe, nous découvrons que « si certains gènes ne peuvent réussir aux dépens des autres, alors la seule solution est de s'unir en un groupe pour réussir tous ensemble ». Comme souvent

**« POUR CERTAINS GÈNES,
LA SEULE SOLUTION EST
DE S'UNIR POUR RÉUSSIR
TOUS ENSEMBLE »**

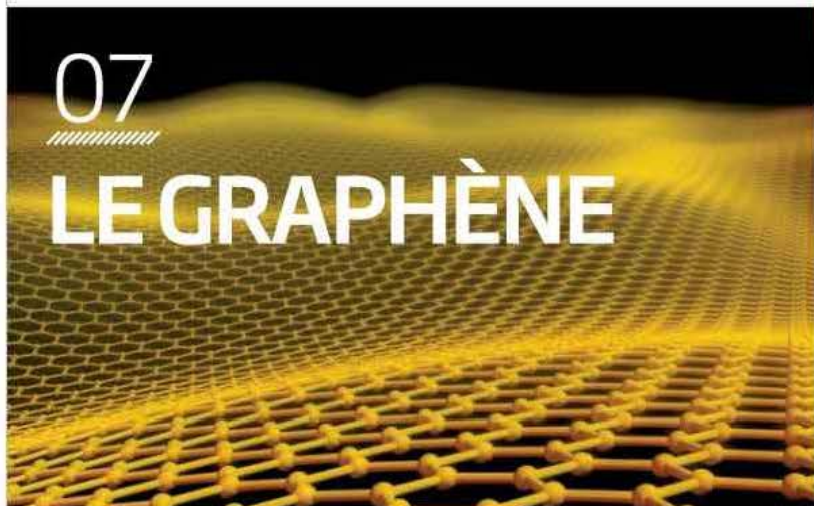
dans le monde vivant, certains modèles se retrouvent, d'un domaine d'étude à un autre, tel un algorithme imposé par la nature. Voilà un merveilleux exemple de la révolution végétale que nous vivons : utiliser les sciences du vivant pour se réconcilier avec la nature.



TOUT **SAVOIR** SUR...

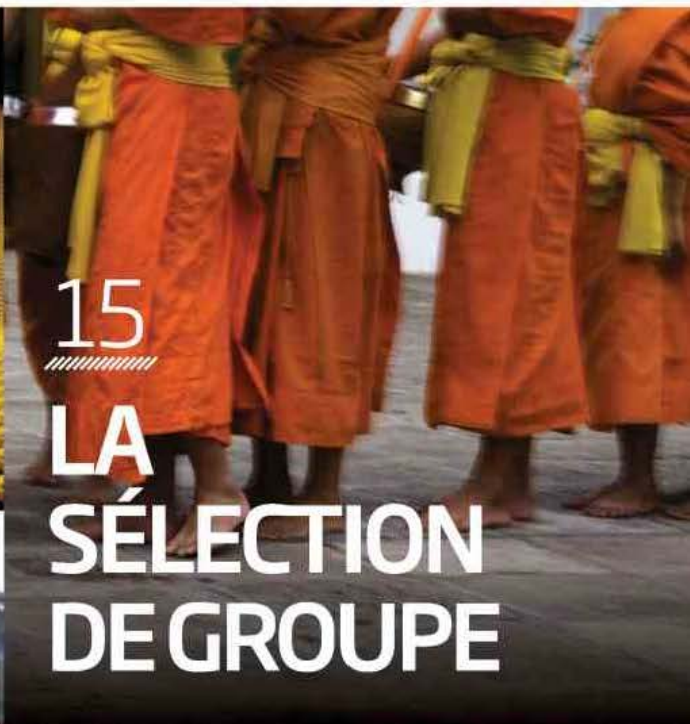
07
////////

LE GRAPHÈNE



15
////////

LA SÉLECTION DE GROUPE



23
////////

LES TREMBLEMENTS DE TERRE



39
////////

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE



31
////////

LES FOSSILES



47
////////

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

55
////////

L'ÉPIGÉNÉTIQUE

LE CERVEAU HUMAIN

63
////////

LE SIDA

71
////////

DOSSIER THÉMATIQUE...

79
////////

LA RÉVOLUTION *végétale*



- ➔ LES FORMES DU VIVANT
- ➔ LES 5 SENS DE L'ARBRE
- ➔ BANANA!
- ➔ DES PLANTES ÉLECTRIQUES À CULTIVER CHEZ SOI
- ➔ MÉDICAMENTS À BAS COÛT : LA PHARMACULTURE PORTE ENFIN SES FRUITS

LE MONDE DES **Sciences**

LE MAGAZINE DU JOURNALISME SCIENTIFIQUE D'INVESTIGATION

1

Chaque mois, un regard inédit
sur **l'actualité la plus récente.**

2

Par **NewScientist**
l'une des plus grandes rédactions
de journalistes scientifiques au monde.

3

L'intervention des **chercheurs**
les plus éminents de la planète.

ABONNEZ-VOUS!

10 NUMÉROS
39€
SEULEMENT
AU LIEU DE
49,90 €

OUI, JE M'ABONNE POUR 1 AN 6 BIMESTRIELS + 4 HORS-SÉRIES
POUR 39 € AU LIEU DE ~~49 €~~

Je règle par chèque
à l'ordre de *Mondeo Publishing*.

Merci d'adresser vos abonnements – coupon
ou papier libre – sous enveloppe
NON AFFRANCHIE à l'adresse suivante :
LIBRE RÉPONSE 19345
94309 VINCENNES CEDEX

Pour les tarifs internationaux ou pour régler par carte
bancaire, vous pouvez vous rendre sur notre site :
WWW.MONDEO.FR ou nous téléphoner au
01.75.43.09.09
LCMs3-T2-2014

Ces informations ne sont utilisées que pour les besoins de l'abonnement.
Nous nous engageons à ne jamais communiquer vos coordonnées postales
ou électroniques à des tiers.

NOM

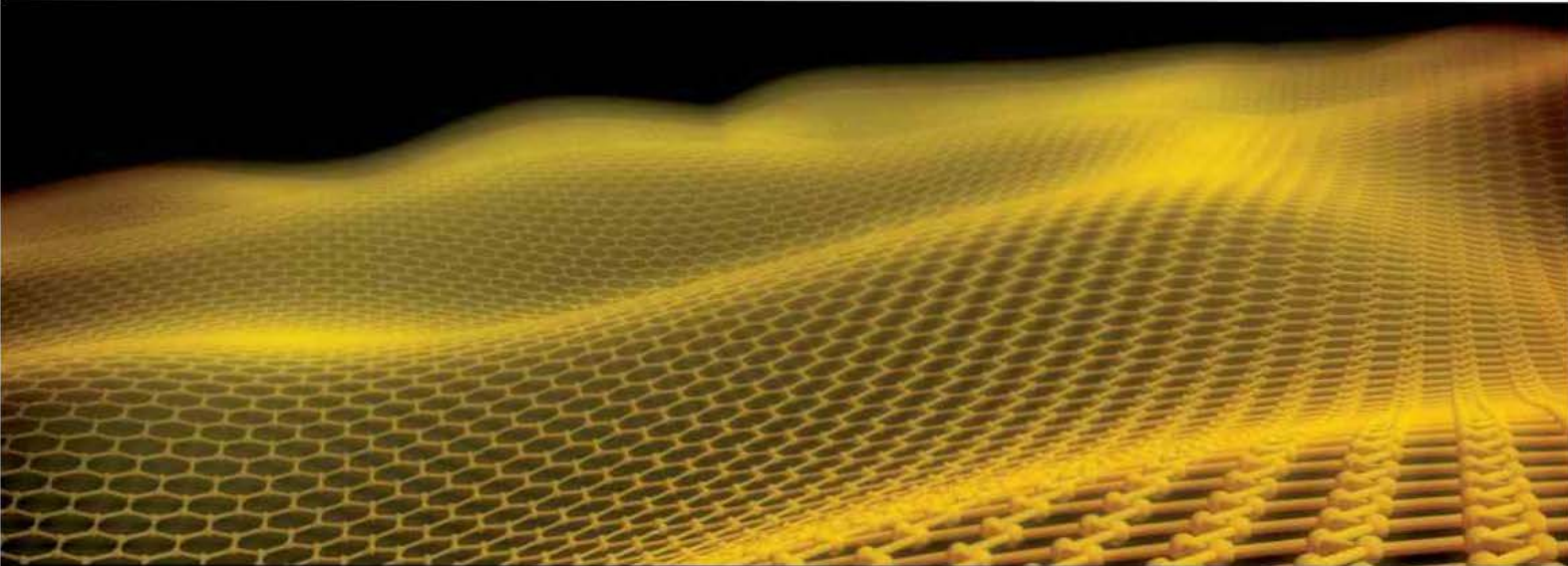
PRÉNOM

ADRESSE

CODE POSTAL

VILLE

E-MAIL



TOUT **SAVOIR**
SUR...

LE GRAPHÈNE

Par Antonio Castro Neto,
Andre Geim et Sabine Casalunga

01

UNE QUESTION D'ASPECT



KARL SVENSSON/SCIENCE PHOTO LIBRARY

La dureté du diamant brillant réside dans les liaisons étroites des atomes de carbone.

FULLERÈNES ET NANOTUBES

La première forme nanométrique de carbone à avoir défrayé la chronique était le fullerène, un ensemble quasi sphérique de 60 atomes de carbone disposés en anneaux hexagonaux et pentagonaux (voir schéma). Son nom officiel est le buckminsterfullerène, d'après le designer américain Buckminster Fuller dont le dôme géodésique a une forme similaire.

Le fullerène a été synthétisé pour la première fois à l'université Rice au Texas (États-Unis), en 1985 par l'irradiation laser intense de graphite. Cela a valu à ses découvreurs Robert Curl, Harold Kroto et Richard Smalley un prix Nobel de chimie en 1996. C'était le premier d'une famille de structures similaires avec différents nombres d'atomes.

Les nanotubes de carbone sont eux cylindriques. Également formés par le bombardement de graphite par lasers, leurs parois peuvent être constituées de couches simples ou multiples. C'est le travail du physicien japonais Sumio Iijima de l'entreprise NEC qui les a rendus célèbres, au début des années 1990. Les nanotubes sont utilisés pour accroître la durée de vie d'une variété de matériaux et de colorants, mais des inquiétudes subsistent quant à leur toxicité possible, par exemple en cas d'inhalation. Cela, couplé avec des difficultés à contrôler les propriétés mécaniques et électriques des nanotubes et des fullerènes, a mis un frein à leur utilisation plus large.

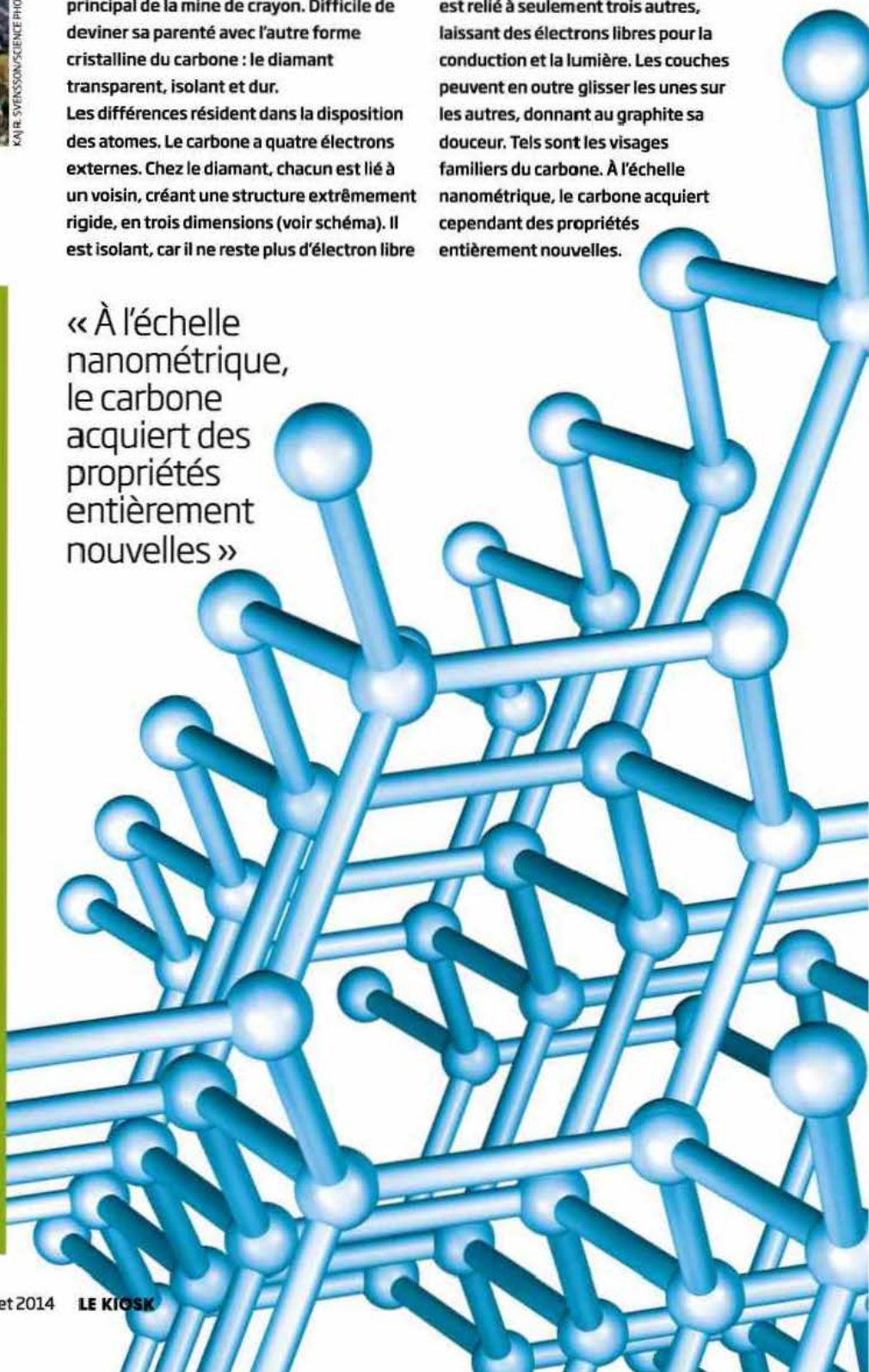
Les formes les plus familières du carbone – la suie et le charbon – sont des assemblages amorphes d'atomes de carbone. Leur couleur noire est aussi une caractéristique du graphite, l'une de ses formes cristallines pures. Celui-ci est un bon conducteur, extrêmement doux et le composant principal de la mine de crayon. Difficile de deviner sa parenté avec l'autre forme cristalline du carbone : le diamant transparent, isolant et dur.

Les différences résident dans la disposition des atomes. Le carbone a quatre électrons externes. Chez le diamant, chacun est lié à un voisin, créant une structure extrêmement rigide, en trois dimensions (voir schéma). Il est isolant, car il ne reste plus d'électron libre

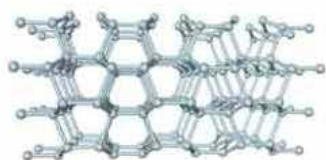
pour la conduction et il est transparent parce que la lumière ne peut pas exciter les électrons liés, ainsi, elle n'est pas absorbée.

Le graphite, quant à lui, est un empilement de couches hexagonales d'atomes de carbone. Chaque atome est relié à seulement trois autres, laissant des électrons libres pour la conduction et la lumière. Les couches peuvent en outre glisser les unes sur les autres, donnant au graphite sa douceur. Tels sont les visages familiers du carbone. À l'échelle nanométrique, le carbone acquiert cependant des propriétés entièrement nouvelles.

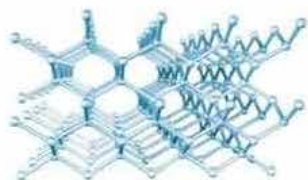
« À l'échelle nanométrique, le carbone acquiert des propriétés entièrement nouvelles »



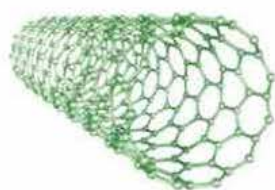
LE GRAPHÈNE : L'INGÉNIERIE DU CARBONE



Diamant



Graphite



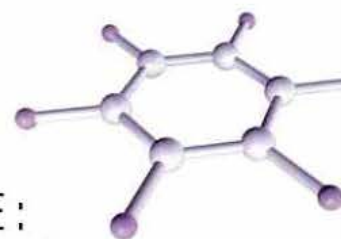
Nanotube de carbone à une seule paroi



Buckminsterfullerène ou footballène

Le carbone est un élément miraculeux. Sans lui, la vie ne serait pas possible. Il existe naturellement sous deux formes cristallines radicalement différentes – le graphite noir malléable et le diamant dur étincelant.

Depuis plusieurs décennies, de nouvelles formes créées par l'ingénierie se sont multipliées. Leurs propriétés inédites suscitent beaucoup d'intérêt. Le graphène en est le dernier et le plus passionnant exemple.



LE BENZÈNE : L'UNITÉ DE BASE

Il y a 150 ans, le chimiste Friedrich Auguste Kekulé tentait de résoudre une énigme ancienne : la structure du benzène. Découvert dans les résidus brûlés de l'huile de lampe par le chimiste et physicien anglais Michael Faraday en 1825, le benzène est une des molécules d'hydrocarbures les plus importantes, largement utilisées dans les parfums et les produits pharmaceutiques. Si sa composition de six atomes de carbone et six d'hydrogène était connue, son architecture restait un mystère. Dans les années 1860, il n'y avait pas moyen de déterminer directement la structure d'une molécule. Il fallait la reconstituer à partir d'indices tels que la façon dont la molécule réagit.

Un jour, au cours d'une rêverie, l'image d'un serpent se mordant la queue surgit dans l'esprit de Friedrich Kekulé. Il a alors réalisé que le benzène était un anneau hexagonal de six atomes de carbone avec un atome d'hydrogène accroché sur chacun d'eux. Aujourd'hui, ce motif hexagonal de base se retrouve au cœur de la plupart des matériaux à base de carbone, comme le graphite et les formes nanométriques découvertes au cours des dernières décennies : les nanotubes, les fullerènes et le graphène. C'est l'unité de base du Nouveau Monde de carbone.

📌 Friedrich Auguste Kekulé (ci-dessous) a découvert la structure du benzène, l'unité de base du monde nanométrique du carbone.



SCIENCE PHOTO LIBRARY

DES ÉLECTRONS BALISTIQUES

En général, plus un matériau solide est fin, plus sa conductivité est faible : l'espace de manœuvre pour les électrons est réduit et ils risquent d'entrer en collision avec les surfaces rugueuses, d'être capturés par les atomes des autres éléments présents sous forme d'impuretés, ou d'être éliminés par des vibrations atomiques. Pourtant, le film d'un atome d'épaisseur de graphène a de meilleures qualités électroniques que n'importe quel matériau en trois dimensions, que ce soit un métal comme l'or, ou un semi-conducteur comme le silicium.

Cela s'explique par des effets quantiques. Selon la théorie quantique des solides, les électrons libres dans les métaux et les semi-conducteurs ne se déplacent pas selon des trajectoires bien définies, comme les particules, mais plutôt comme des ondes dont la propagation est influencée par la matière environnante. Dans le cas du graphène, le nid d'abeilles hexagonal du réseau provoque un motif d'interférence destructeur entre les ondes d'électrons qui provoque l'équivalent d'une perte de masse des électrons. En conséquence, à l'instar de projectiles balistiques, ils se meuvent à travers le matériau à une vitesse seulement 300 fois moins rapide que celle de la lumière. Ces électrons très rapides et sans masse justifient le choix du graphène comme « accélérateur de bureau » pour sonder le comportement des particules se déplaçant presque à la vitesse de la lumière par exemple à proximité des étoiles à neutrons et des trous noirs. Les électrons du graphène devraient aussi se comporter d'une manière similaire aux électrons entourant les noyaux ultra-lourds qui sont difficiles à créer et étudier en laboratoire. Dans ces atomes, on s'attend à ce que l'attraction électrostatique du noyau soit si élevée qu'elle provoque l'écrasement de l'électron en orbite sur le noyau, précipitant sa décomposition. Observer un tel « effondrement atomique » en action dans un matériau pourrait donner un aperçu sur des questions fondamentales telles que comprendre ce qui rend les atomes stables en premier lieu.

UN CONDUCTEUR CAMÉLÉON

Ce n'est pas seulement la vitesse des électrons dans le graphène qui est impressionnante : la grande force de liaison de la structure lui permet de transporter un grand nombre d'électrons sans se briser. De plus, ce nombre peut être modifié de plusieurs ordres de grandeur en appliquant une tension externe, transformant le matériau hautement conducteur avec de nombreux électrons libres, en un semi-conducteur avec quelques électrons libres ou (au moins en théorie) en isolant.

Un matériau présentant ces caractéristiques « caméléon » est appelé un semi-métal. La réponse des électrons du graphène à une tension appliquée – sa mobilité d'électrons – est près de 100 fois supérieure à celle des électrons dans le silicium. Il est, en fait, le matériau le plus électriquement sensible connu. Des changements de conductivité similaires

peuvent être obtenus en exerçant une contrainte sur le réseau de graphène ou en ajoutant d'autres éléments. Mis en contact avec de l'hydrogène à des températures élevées, par exemple, les électrons libres du graphène se lient avec l'hydrogène, le transformant en un isolant – un matériau entièrement nouveau appelé graphane. Il suffit alors de le chauffer à nouveau pour détacher l'hydrogène et que le graphane redevienne graphène. Cela suggère le rôle potentiellement capital du graphène pour stocker l'hydrogène dans une économie où ce dernier aurait remplacé les combustibles fossiles.

« Le graphène est le matériau connu le plus sensible électriquement »

GRAPHÈNE : DES SUPER-PROPRIÉTÉS

Le graphène est un matériau miracle. De l'épaisseur d'un seul atome, il est un million de fois plus fin qu'un morceau de papier et peut être plié et roulé comme un film plastique. Pourtant, il est plus résistant que le diamant et conduit la chaleur et l'électricité mieux que le cuivre ou l'or. Il n'est pas étonnant que de toutes les nouvelles formes de carbone, le graphène soit celui qui attire le plus d'attention.

ISOLER LE GRAPHÈNE

Graphite, fullerènes et nanotubes sont des déclinaisons empilées, enveloppées et enroulées d'un matériau plus fondamental : le graphène. Si le diamant est en trois dimensions, le graphène se compose d'une seule couche de graphite de l'épaisseur d'un atome. La nature a horreur des structures de basse dimensionnalité. Pour les créer, les vibrations thermiques doivent être supprimées sinon la couche se froisse. Ainsi, bien que le graphène soit la forme la plus élémentaire de carbone cristallin, il a été le dernier à être isolé, à l'université de Manchester, au Royaume-Uni, en 2004. Cela a été fait de façon peu

conventionnelle, en utilisant des bandes de plastique collantes pour enlever des couches simples d'atomes de carbone à partir d'un bloc de graphite. En général, la tendance du graphène à se froisser peut être contrée en le plaçant sur le bon substrat, affaiblissant ainsi ses vibrations thermiques, puis en utilisant des techniques lithographiques modernes pour le tailler dans la forme requise.

LE GRAND BOSS DE LA MÉCANIQUE

Grâce à son épaisseur atomique, le graphène est un matériau souple et très doux, comme un tissu. Son existence même est un miracle. Un film mince de tout autre métal – comme l'or, par exemple – même 10 fois plus épaisses que le graphène, ne survivrait pas aux températures et pressions ambiantes, ses vibrations thermiques le feraient coaguler en pièces arrondies. Le carbone doit sa stabilité à un effet de mécanique quantique appelé hybridation, qui rend quatre de ses six électrons en orbite disponibles pour créer des liaisons courtes, mais très fortes. Cela fait du graphène un excellent conducteur de chaleur, parce que la structure peut vibrer à des fréquences très élevées sans rompre. Cela le rend chimiquement inerte ; le graphène résiste jusqu'à 300 °C dans l'air. Et enfin, cela explique sa résistance : un hamac en graphène pourrait balancer un chat d'un

kilogramme. L'application d'une force latérale similaire étirerait une feuille de graphène d'environ un quart de sa longueur. Cependant, alors que la plupart des matériaux se comportent comme du plastique, s'étirant en filaments, le graphène maintient sa structure, la distance entre les atomes de carbone augmente tout simplement. Ce qui à son tour affecte l'hybridation des électrons, et donc l'adhérence du matériau. En appliquant une tension dans la bonne direction, il est même possible de manipuler ses propriétés électroniques et de transformer le graphène conducteur en un matériau isolant !

Le graphène consiste en couches de carbone d'un atome d'épaisseur.

PASIEKA/SCIENCE PHOTO LIBRARY

DES GAINS MATÉRIELS

Même réduit en une fine poudre, le graphène conserve sa résistance mécanique et de sa conductivité électronique exceptionnelle. Une idée est d'utiliser cette poudre comme additif pour remplacer des formes plus classiques de carbone. Prenez les pneus de voiture. Ils doivent leur couleur au noir de carbone, une forme amorphe de carbone ajoutée pour leur renforcement. Le graphène pourrait améliorer encore leur durabilité. Dans les piles zinc-carbone, le graphite est utilisé comme matériau de stockage : les ions se déplacent entre l'empilement de couches de graphène qui forment un cristal de graphite et y sont maintenus par des interactions électrostatiques avec les électrons libres dans le cristal. En augmentant la distance entre les couches individuelles, plusieurs ions peuvent être stockés. Toutefois, la pile atteint sa limite quand les couches sont complètement découplées l'une de l'autre - quand le graphite devient graphène. La surface grande et facilement accessible du graphène, couplé avec sa conductivité élevée, pourrait augmenter à la fois la durée de vie et les capacités de stockage de ces batteries. Cette possibilité est étudiée par des sociétés telles que BASF. Malgré les fanfares et l'excitation entourant l'électronique de carbone, le graphène est plus susceptible de faire sa première entrée dans d'autres matériaux déjà familiers (puces, écrans tactiles).

PROBLÈMES À RÉSOUDRE

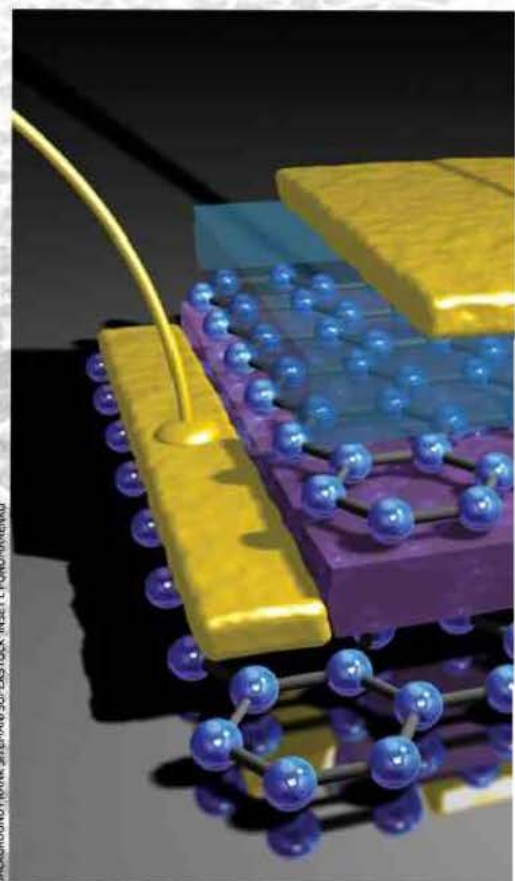
Un des freins à l'utilisation industrielle du graphène est sa production à large échelle. Les premières méthodes impliquant le décapage des couches de graphène à partir de graphite étaient seulement adaptées à de petites quantités. Des films de graphène aussi grand qu'un mètre carré peuvent maintenant être synthétisés sur une surface métallique en utilisant le dépôt chimique en phase vapeur. Cela s'apparente à la réaction catalytique dans les pots d'échappement : un hydrocarbure gazeux frappe une plaque de métal chauffée, la dépouillant de son hydrogène et d'autres atomes et laissant derrière ses atomes de carbone qui, dans les bonnes conditions, vont former un film de graphène. La qualité de ce graphène de masse reste cependant faible. Le même problème qui avait ralenti l'industrie du silicium, il y a 50 ans, a été résolu avec le temps et des investissements. On peut espérer le même dénouement pour le graphène.

VERS DES ÉCRANS FLEXIBLES

De nombreux dispositifs et gadgets modernes disposent d'écrans plats, que ce soient des affichages à cristaux liquides ou à diodes électroluminescentes. Souvent, comme dans les smartphones, ils sont tactiles. Un élément essentiel de ces écrans est une couche de surface à la fois transparente et hautement conductrice, une combinaison peu fréquente. L'oxyde d'indium-étain, le favori actuel pour de telles applications, est loin d'être idéal : il est rare et manque de souplesse et de résistance mécanique. Le graphène est non seulement très conducteur dans les bonnes conditions, mais aussi en grande partie transparent, absorbant seulement 2,3 % de la lumière. Un film composé de plusieurs couches superposées de graphène surpasserait, en théorie, n'importe quel matériau existant. Dans la pratique, cependant, la technologie est très en retard. Pour fonctionner dans un dispositif, la couche de graphène doit être associée

à un substrat isolant, plat et propre, qui n'influence pas le flux d'électrons. Le dioxyde de silicium, le substrat classique en microélectronique, est trop inégal. Des recherches actuelles essayent de le remplacer par du nitrure de bore, extrêmement plat et chimiquement inerte. Ces questions d'ingénierie, nous l'espérons, seront un jour résolues. Quand ce sera le cas, le graphène offrira des qualités uniques : la flexibilité et l'extensibilité. Des sociétés telles que Samsung et Nokia envisagent de produire des gadgets électroniques personnels qui pourront être portés comme des montres et être pliés et dépliés, selon les besoins.

« Grâce au graphène, des gadgets électroniques pourront être portés comme des montres et être pliés et dépliés, selon les besoins »



BACKGROUND: FRANK STEPHAN/SHUTTERSTOCK-INSET: L. PONOMAREV/NO

LE GRAPHÈNE : À QUOI ÇA SERT ?

Des centaines d'applications ont été proposées pour tirer parti des propriétés remarquables du graphène. Certaines sont plus réalistes que d'autres et des difficultés restent à surmonter – mais des puces d'ordinateur aux écrans tactiles, il y a quelques idées prometteuses en chantier.

L'ÉLECTRONIQUE DU CARBONE

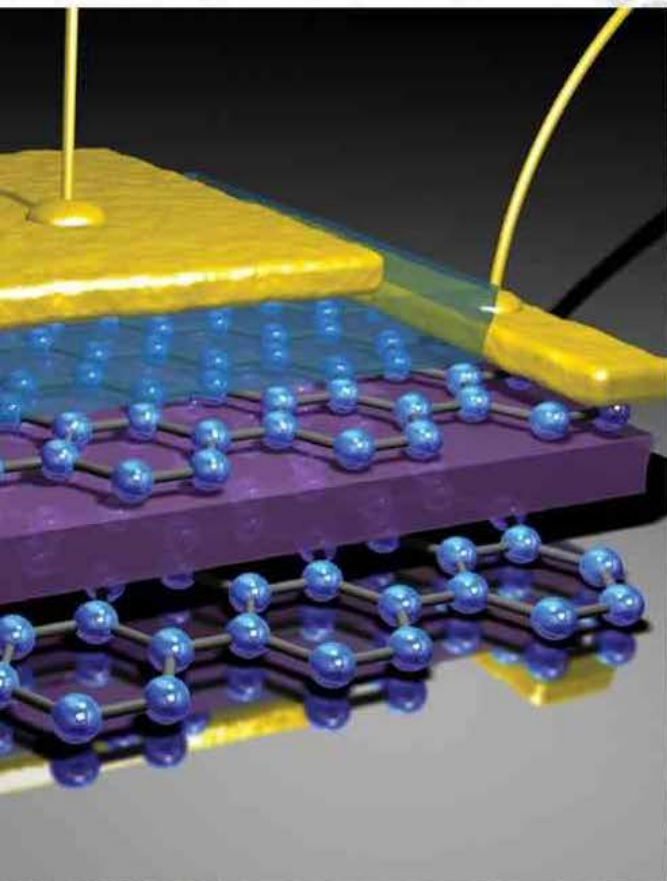
Parce que les électrons dans le graphène se déplacent très rapidement et se dispersent peu, les puces d'ordinateur à base de graphène pourraient en théorie être à la fois plus rapides et moins sujettes au bruit que les puces existantes. Les semi-conducteurs tels que le silicium nécessitent que le champ alternatif qui les

excite oscille au-dessus d'une certaine fréquence. Dans un semi-métal, tel que le graphène, où il y a toujours des électrons libres, cette restriction ne s'applique pas, ce qui pourrait ouvrir une gamme de fréquences plus large pour l'utilisation de l'informatique et des communications. Transistors à haute fréquence, amplificateurs, modulateurs optiques et autres composants électriques à base de graphène sont à l'étude. Une puce faite à 100 % de graphène ne verra cependant pas le jour avant au moins une ou deux décennies. Pour commencer, il est difficile d'éteindre complètement la

conductivité d'un semi-métal, ce qui est pourtant une exigence pour tout matériau de processeur.

Néanmoins, des succès ont déjà été signalés. En 2010, IBM a présenté un transistor de graphène sur un substrat de carbure de silicium qui fonctionne à des fréquences allant jusqu'à 100 gigahertz. On estime que les composants à base de graphène devraient être en mesure de parvenir à 1 000 GHz.

Les premières applications électroniques du graphène devraient se limiter à améliorer la performance de puces en silicium. Une possibilité est de mettre à profit la haute conductivité thermique du graphène pour faire des « puits de chaleur » afin de refroidir les puces. Il faudrait pour cela une meilleure interface entre le silicium et le graphène, car, à l'heure actuelle, la jointure crée une résistance supplémentaire, supprimant la performance de la puce.



🌱 Des transistors à base de graphène pourraient être beaucoup plus rapides que ceux en silicium, et ils deviennent déjà une réalité.



Antonio Castro Neto est professeur de physique à l'université de Boston, aux États unis et directeur du Centre de recherche sur le graphène à l'université nationale de Singapour.



Andre Geim est professeur de physique à l'université de Manchester, au Royaume-Uni. Il a été co-réceptaire du prix Nobel 2010 de physique pour ses expériences révolutionnaires sur le graphène.

UN UNIVERS DE MATÉRIAUX À EXPLORER

Bien que déjà matériau miracle, le graphène en cacherait d'autres. Les perspectives les plus intéressantes pourraient découler de sa modification chimique ou structurelle. Par exemple, nous pourrions associer le graphène avec d'autres formes de carbone comme les nanotubes et les fullerènes afin de créer des échafaudages tridimensionnels avec des propriétés électroniques et structurelles difficiles à anticiper. Dans le même temps, manipuler les propriétés électroniques du graphène en utilisant l'élongation – « l'ingénierie de tension » – est un domaine encore très immature. Le graphène est une des créatures d'un nouveau monde passionnant. C'est le royaume des cristaux bidimensionnels. D'autres exemples incluent l'oxyde de cuivre ou cuprate, des couches ayant une capacité encore mal comprise de conduire l'électricité sans résistance, et le manganite, dont les changements dramatiques de résistance électrique en présence d'un champ magnétique les rendent très prometteurs comme composants pour les disques durs de la dernière vague de smartphones et de tablettes. Tout comme le graphène, ces matériaux sont susceptibles d'avoir des propriétés inhabituelles. Certains pourraient même être magnétiques,

supraconducteurs ou peut-être une combinaison des deux. Une fois que les propriétés de ces couches simples auront été étudiées, il sera possible de les combiner pour produire des matériaux en trois dimensions inconnus dans la nature, avec des comportements complexes créés sur commande. Nous pourrions imaginer, par exemple, une structure faite d'une première couche de graphène transparente et conductrice; d'une deuxième couche pour transformer la lumière en électricité, et enfin une troisième à la conduction optimisée pour transporter cette électricité à une unité de stockage. Un lointain équivalent de la photosynthèse des plantes en quelque sorte – mais sur une structure un million de fois plus fine qu'un cheveu humain. Ce nouvel univers nous réserve des surprises insoupçonnées.

RÉFÉRENCES

- « *Electrons in atomically thin carbon sheets behave like massless particles* », Mark Wilson (*Physics Today*, vol 59, p 21)
- « *Drawing conclusions from graphene* » Antonio Castro Neto, Francisco Guinea et Nuno Miguel Peres (*Physics World*, vol 19, p 33)
- « *Carbon Wonderland* » Andre Geim et Philip Kim (*Scientific American*, avril 2008, p 90)
- « *New directions in Science and Technology: Two-dimensional crystals* » Antonio Castro Neto et Konstantin Novoselov (*Reports on Progress in Physics*, vol 74, p 082501)



TOUT **SAVOIR**
SUR...

LA SÉLECTION DE GROUPE

Par David Sloan Wilson et Marine Haquin

02

● L'altruisme semble être une partie intrinsèque de l'être humain. Pourquoi?



UNE SOLUTION SIMPLE

Darwin a réalisé que le problème serait résolu s'il existait une sélection à l'échelle du groupe et pas seulement une sélection à l'échelle individuelle. Si un groupe composé d'individus agissant de manière prosociale entre en compétition avec un groupe d'individus égoïstes alors les traits favorisant le groupe comme une unité vont évoluer. En bref, la sélection naturelle entre les groupes contrebalance le coût des comportements prosociaux des individus au sein de leur groupe. Ou, comme Darwin le dit « ... une avancée des standards de la moralité donnera certainement l'avantage à une tribu ou à une autre. Une tribu accueillant beaucoup de membres qui; de par leur esprit patriotique, fidèle, obéissant, courageux et sympathique; seraient prêts à se sacrifier pour le bien commun, serait victorieuse des autres tribus; et ceci serait de la sélection naturelle. » C'est le point de départ de la théorie moderne de

sélection à différents niveaux : les systèmes biologiques s'organisent en une hiérarchie d'éléments imbriqués : les gènes appartiennent à un individu, lui-même fait partie d'un groupe au sein d'une population, etc. Et, à chaque niveau, les traits qui favorisent la fitness relative à l'intérieur d'une unité défavorisent l'unité dans son ensemble. Un individu qui entre en compétition avec un autre au sein de son groupe n'agit pas en faveur de celui-ci.

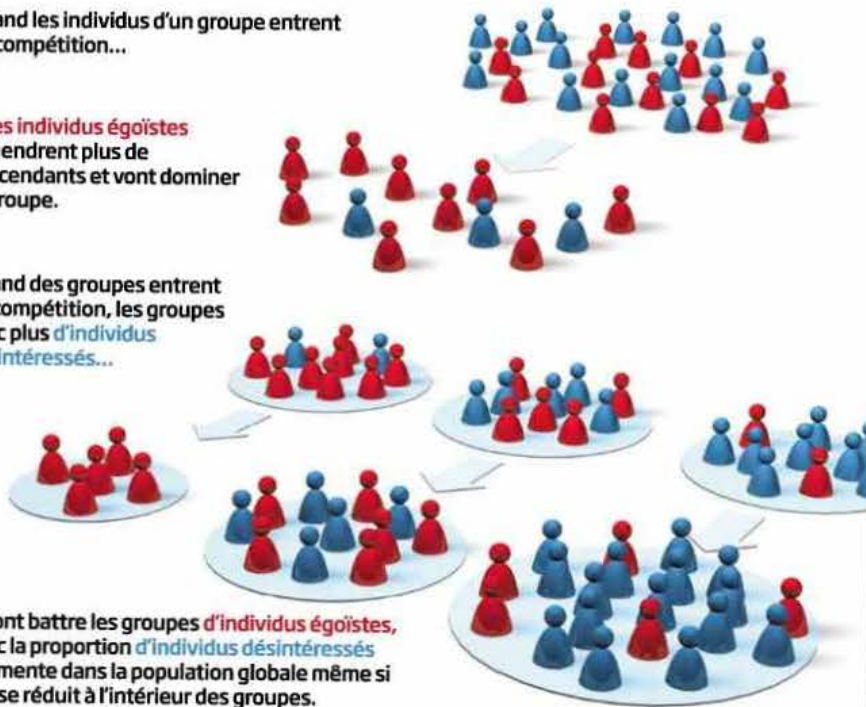
De façon générale : « L'évolution des adaptations à chaque niveau de la hiérarchie requiert un processus de sélection naturel à ce niveau-ci et tend à être sapée par la sélection aux niveaux inférieurs. »

Quand les individus d'un groupe entrent en compétition...

... les individus égoïstes engendrent plus de descendants et vont dominer le groupe.

Quand des groupes entrent en compétition, les groupes avec plus d'individus désintéressés...

... vont battre les groupes d'individus égoïstes, donc la proportion d'individus désintéressés augmente dans la population globale même si elle se réduit à l'intérieur des groupes.



UNE HISTOIRE COMPLEXE

Dès la première partie du XX^e siècle, l'idée d'une sélection dite de groupe a été acceptée par la plupart des biologistes de l'évolution, et ce très – trop – facilement. Influencés par l'idée que la nature était la création d'un dieu bienveillant, de nombreux biologistes pensaient que la nature était adaptative à tous les niveaux – ce qui est bon pour l'individu doit être bon pour son groupe, etc. Lorsque certains biologistes ont réalisé que l'évolution des traits prosociaux serait souvent opposée à la sélection au sein des groupes, ils ont supposé que la sélection à l'échelle du groupe devait prévaloir. Mais, dans les années 1960, lorsque la sélection de groupe a enfin été examinée, sa domination sur l'échelle individuelle a été rejetée. En se basant sur des arguments de plausibilité plutôt que sur des expériences, les biologistes ont conclu que la sélection entre les groupes serait faible comparée à la sélection au sein des groupes. Pire, pour le biologiste George C. Williams « les adaptations liées au groupe n'existent pas ». Ce changement dans la pensée et le rejet de la sélection de groupe représentent un tournant. Durant les décennies qui ont suivi, la plupart des biologistes de l'évolution ont interprété les adaptations sociales comme des formes d'intérêts personnels qui pourraient s'expliquer sans évoquer la sélection de groupe.

Le zoologue Richard Alexander a pourtant osé appeler à une réinterprétation radicale de la moralité. « Je suspecte que la quasi-totalité des humains pense qu'il est normal pour un individu d'aider quelqu'un d'autre à réaliser ses intérêts, et cela aux frais de la personne altruiste, a-t-il écrit dans *The Biology of Moral Systems* (1987). Ce que la grande révolution intellectuelle de ce siècle nous apprend, c'est que malgré nos intuitions, il n'y a pas la moindre preuve supportant cette pensée de bienfaisance, et de nombreuses théories convaincantes suggèrent que ce genre de visions seront finalement jugées fausses. » Ainsi, on a vu renaître la théorie de sélection de groupe, maintenant bien établie. Mais qu'est-ce qui a bien pu provoquer un changement aussi radical?

RIGHT: YADID LEVYANZBERGER/EYEVINE ABOVE: IRENE LAMM/CORBIS

UNE IDÉE REJETÉE

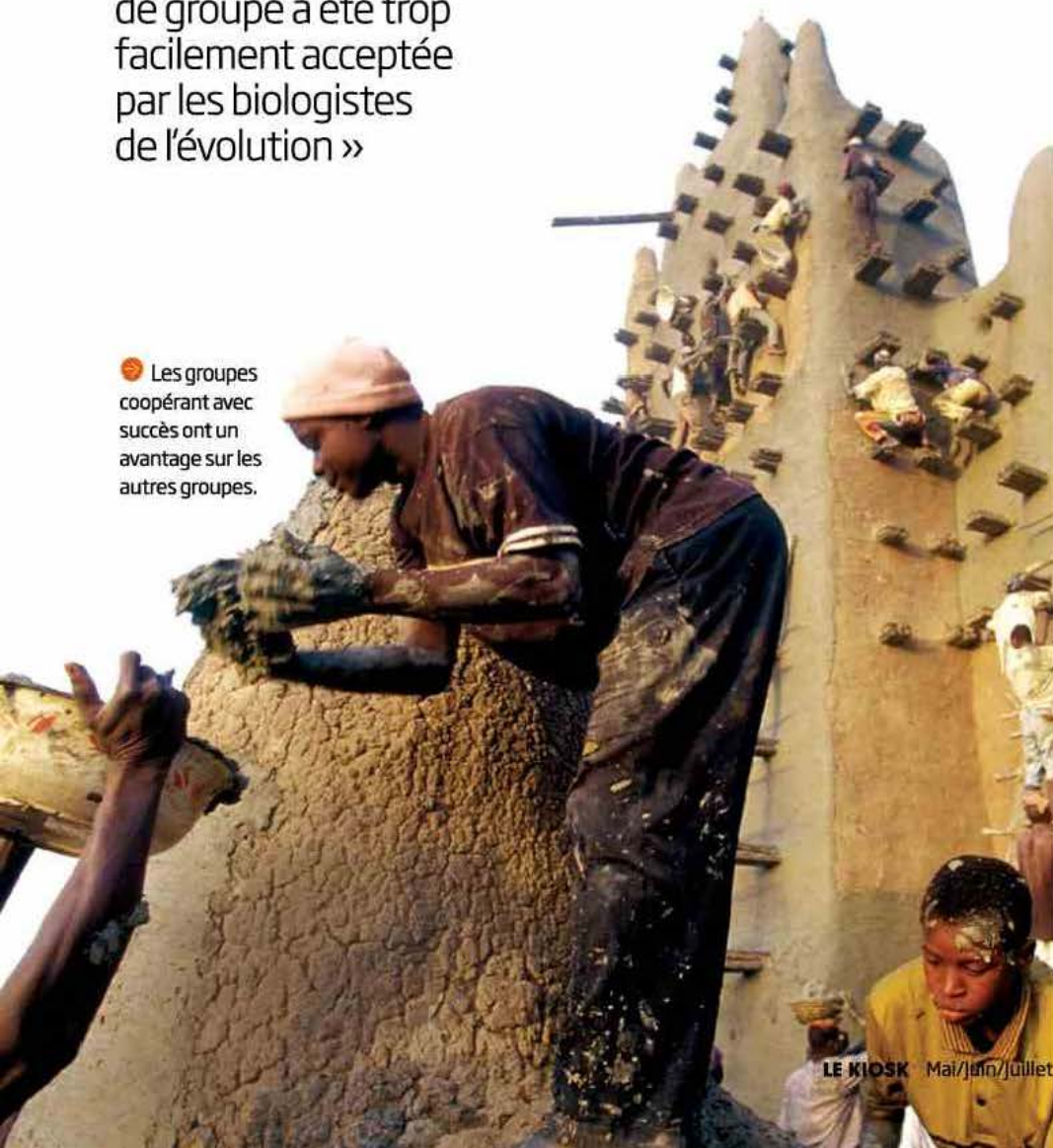
La théorie de la sélection naturelle explique clairement comment des attributs tels que les dents acérées des tigres ou le pelage épais des ours polaires ont évolué. Lorsque les ancêtres des ours polaires ont colonisé l'Arctique, ceux qui avaient un pelage bien épais les protégeant du froid avaient de meilleures chances de survie et de reproduction que les autres ours. Mais certaines espèces présentent des traits qui bénéficient plutôt aux autres ou à l'ensemble de leur groupe et il est bien difficile de retracer leur évolution. D'après Darwin, ceux-ci favorisaient la survie des groupes les plus forts, plutôt que celle d'un individu et étaient ainsi conservés : c'est la sélection de groupe et son histoire est aussi longue que compliquée.

« L'idée de sélection de groupe a été trop facilement acceptée par les biologistes de l'évolution »

👉 Les groupes coopérant avec succès ont un avantage sur les autres groupes.

LE PROBLÈME

Un loup partage sa nourriture avec les autres membres de sa meute. Un vervet (une espèce de petits primates d'Afrique, N.D.L.R.) n'hésite pas à crier pour alermer son groupe s'il repère un prédateur au risque d'attirer l'attention sur lui. Une abeille peut se sacrifier pour sa ruche. Il est difficile de comprendre comment de tels comportements ont pu évoluer grâce à la sélection naturelle puisque les individus qui se comportent ainsi réduisent leur chance de survivre et d'engendrer une descendance par rapport à des individus plus égoïstes. Darwin lui-même était conscient que les comportements suicidaires de ces animaux et autres vertus associées à la moralité humaine (comme le courage ou la charité) représentaient un challenge pour sa théorie. Donc la question est : comment peut évoluer un trait davantage tourné vers les autres ou vers un groupe dans son ensemble – un trait prosocial – alors qu'il semble réduire la fitness (la valeur sélective, dépendant directement des chances de survie et des capacités de reproduction N.D.L.R.) individuelle?



VALEUR SÉLECTIVE INCLUSIVE, GÈNES ÉGOÏSTES, ETC.

Le rejet du concept de sélection de groupe dans les années 1960 signifiait que beaucoup de biologistes ont dû exposer d'autres théories expliquant l'évolution des adaptations sociales. Certaines ont été mises en avant comme la théorie de valeur sélective (fitness) inclusive – ou sélection parentale –, la théorie du gène égoïste et la théorie des jeux évolutionnistes.

William D. Hamilton, qui a mis au point la théorie de fitness inclusive dans les années 1960, fut l'un des premiers à deviner la sélection de groupe derrière toutes ces théories, en examinant le travail du biologiste théoricien George Price, dans les années 1970. La formule de Hamilton pouvait calculer comment un gène altruiste évolue dans l'ensemble de la population, mais ne pouvait suivre ce qui se passe dans un groupe en particulier. À l'inverse, la formule de Price divisait l'évolution du gène au sein d'une population en composantes. Lorsque Hamilton a revu sa propre théorie à travers le prisme de la formule de Price, il s'est aperçu que l'altruisme était en fait un désavantage à l'intérieur des groupes et qu'il n'évolue que grâce à la sélection entre groupes, comme le prédisait Darwin.

Hamilton se souvient : « À travers l'extension de la formule [de Price] à l'échelle du groupe, j'ai eu une bien meilleure compréhension de la sélection de groupe et j'avais en main un bien meilleur outil pour étudier toutes sortes de sélections agissant à un ou plusieurs niveaux ». Malheureusement, peu de biologistes partageaient ce point de vue et ses révisions des années 1970 ont été ignorées. Récemment, il est devenu clair que toutes les théories sur l'évolution des comportements sociaux considèrent implicitement que les interactions sociales ont lieu dans les groupes qui sont petits par rapport à l'ensemble de la population. Mais aussi que les comportements prosociaux, entre autres nommés « coopération » ou « altruisme », sont désavantageux pour les individus et n'évoluent que grâce à la contribution différentielle des groupes au stock de gènes. En d'autres termes, chaque théorie dépend d'une simple logique de sélection à différents niveaux.

La raison pour laquelle tout ceci n'était pas évident depuis le début est que ces théories ne suivent que ce qui évolue dans l'ensemble de la population sans suivre la sélection naturelle qui intervient simultanément au sein de chaque groupe. Il est impossible d'évaluer si la sélection de groupe est nécessaire sans analyser la sélection naturelle à chaque niveau pertinent de la hiérarchie biologique.

« Si certains gènes ne peuvent réussir aux dépens des autres, alors la seule solution est de s'unir en un groupe pour réussir tous ensemble »

DES TRANSITIONS MAJEURES

Jusqu'aux années 1970, on pensait que l'évolution n'était basée que sur l'accumulation de mutations à travers les générations. Puis la biologiste Lynn Margulies a proposé que les cellules complexes n'étaient pas issues des cellules bactériennes ayant vécu de petites étapes mutationnelles, mais plutôt d'associations symbiotiques entre bactéries de différentes sortes qui sont devenues des organismes indépendants de niveau supérieur.

Dans les années 1990, les biologistes de l'évolution John Maynard Smith et Eors Szathmari ont proposé que les transitions évolutives majeures similaires se soient réalisées tout au long de l'histoire de la vie, y compris l'évolution des premières cellules, l'apparition des organismes multicellulaires et le développement des colonies d'insectes sociaux (voir le diagramme). Peut-être même l'apparition de la vie, mais rien n'est démontré dans ce cas. Pour qu'une transition évolutive majeure se concrétise, il faut un changement dans l'équilibre entre « au sein du groupe » et « entre les groupes ». Un groupe ne peut s'unir et former un seul individu

que si la sélection entre groupes est la force évolutive prépondérante. De même, celle-ci ne peut se réaliser que lorsque la sélection à l'intérieur des groupes est supprimée. La méiose par exemple, permet à tous les gènes des chromosomes d'avoir une chance égale d'être représentés dans les gamètes. Si certains gènes ne peuvent réussir aux dépens des autres, alors la seule solution est de s'unir en un groupe pour réussir tous ensemble.

Les transitions évolutives sont des événements rares dans l'histoire de la vie et elles ne sont jamais complètes, ainsi la sélection au sein des groupes ne disparaît jamais. Ainsi, certains gènes réussissent à biaiser les lois de la méiose en leur faveur. Aujourd'hui, de plus en plus, les cancers sont étudiés comme un processus évolutif se déroulant à l'intérieur de l'individu. Dans ce cas, certains gènes réussissent aux dépens des autres, avec un résultat tragique pour le groupe de gènes dans son ensemble puisque l'individu est en danger de mort.



GARY CARLSON/SP/ALAMY

Le cancer résulte d'une fin de la coopération entre les cellules.

Des études expérimentales et l'élaboration de meilleurs modèles valent à la sélection de groupe d'être réhabilitée. Les biologistes se rendent compte que les individus d'aujourd'hui sont les groupes d'hier ! Et il est devenu clair que les explications alternatives de l'évolution des comportements prosociaux sont en fait équivalentes à la sélection de groupe.

DES PREUVES DE LA SÉLECTION DE GROUPE

Le rejet de la sélection de groupe était basé sur le fait que, en pratique, la sélection dans les groupes était plus forte que la sélection entre ces groupes.

Néanmoins, des études récentes ont montré que des traits peuvent évoluer grâce à la sélection entre groupes, bien qu'ils soient désavantageux pour un individu au sein d'un groupe.

Par exemple : *Aquarius remigis*, cette espèce d'insecte qui glisse à la surface des lacs et marais. Les mâles

affichent une grande variation de l'agressivité envers les femelles et des études montrent qu'au sein d'un groupe les mâles agressifs gagnent la compétition pour les femelles face aux autres mâles.

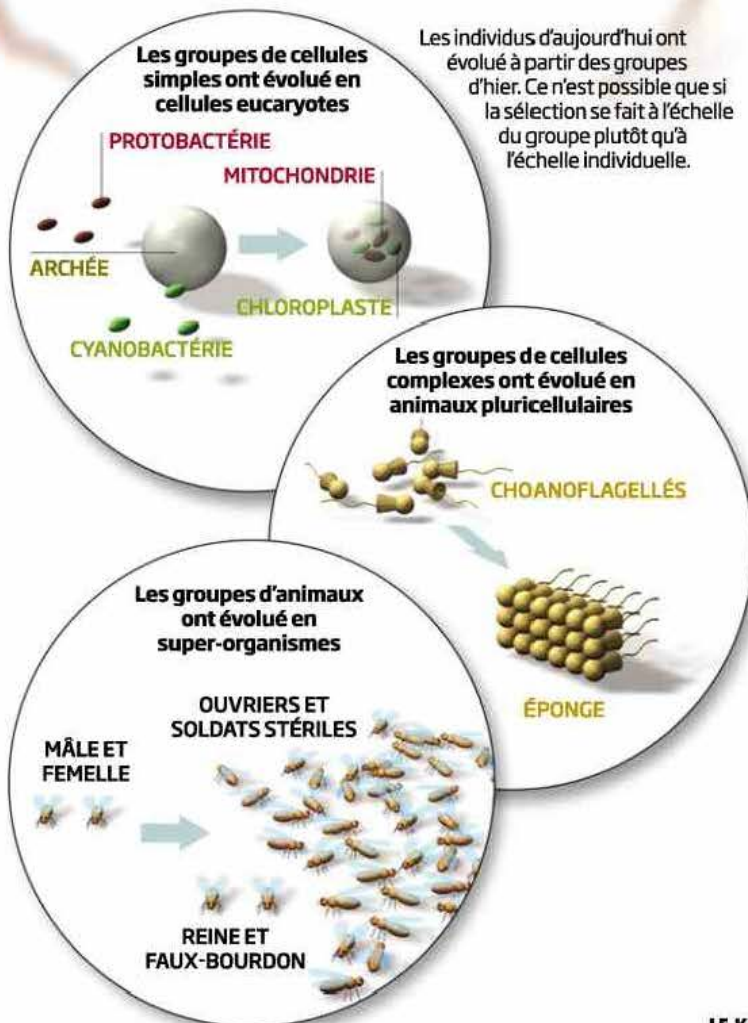
Néanmoins, les mâles agressifs empêchent les femelles de se nourrir et peuvent même les blesser.

En résulte un groupe avec beaucoup de mâles agressifs qui produisent moins de descendants qu'un groupe avec plus de mâles pacifiques.

La variation intergroupe est amplifiée par la fuite des femelles vers les groupes plus sécurisés pour elles. Ainsi la sélection entre les groupes est essentielle pour maintenir des mâles non agressifs dans la population (Evolution, vol 64, p 3183).

Autre étude, une équipe de microbiologistes de l'université de Washington à Seattle (États-Unis) a fait pousser la bactérie *Escherichia coli* dans des puits et a infecté certains de ces puits avec un virus. Ils ont ensuite imité la prolifération naturelle des virus grâce à des transferts du virus entre les puits.

L'équipe a découvert que dans certaines circonstances, une souche du virus poussant lentement, « prudemment », avait plus de réussite qu'une souche se développant rapidement, « vorace ». La souche vorace tue toutes les bactéries d'un puits puis s'éteint elle-même avant de pouvoir se répandre vers un autre puits alors que la souche prudente pousse plus longtemps dans un puits et a donc plus de chance d'en coloniser d'autres. De cette façon, la souche prudente peut persister dans la population même si elle est toujours battue à la compétition par la souche vorace si les deux se trouvent dans un même puits. En d'autres termes, ce n'est que grâce à la force de la sélection entre groupes que la souche prudente survit (Nature, vol 442, p 75). Ces deux études, à des échelles spatiales et temporelles différentes, présentent bien le problème clé et la solution posée par la sélection de groupe : les traits qui bénéficient à l'ensemble d'un groupe ne sont pas forcément avantageux pour un individu appartenant au groupe et ils requièrent d'autres forces sélectives pour évoluer.





JIALING GAO/CGETTY

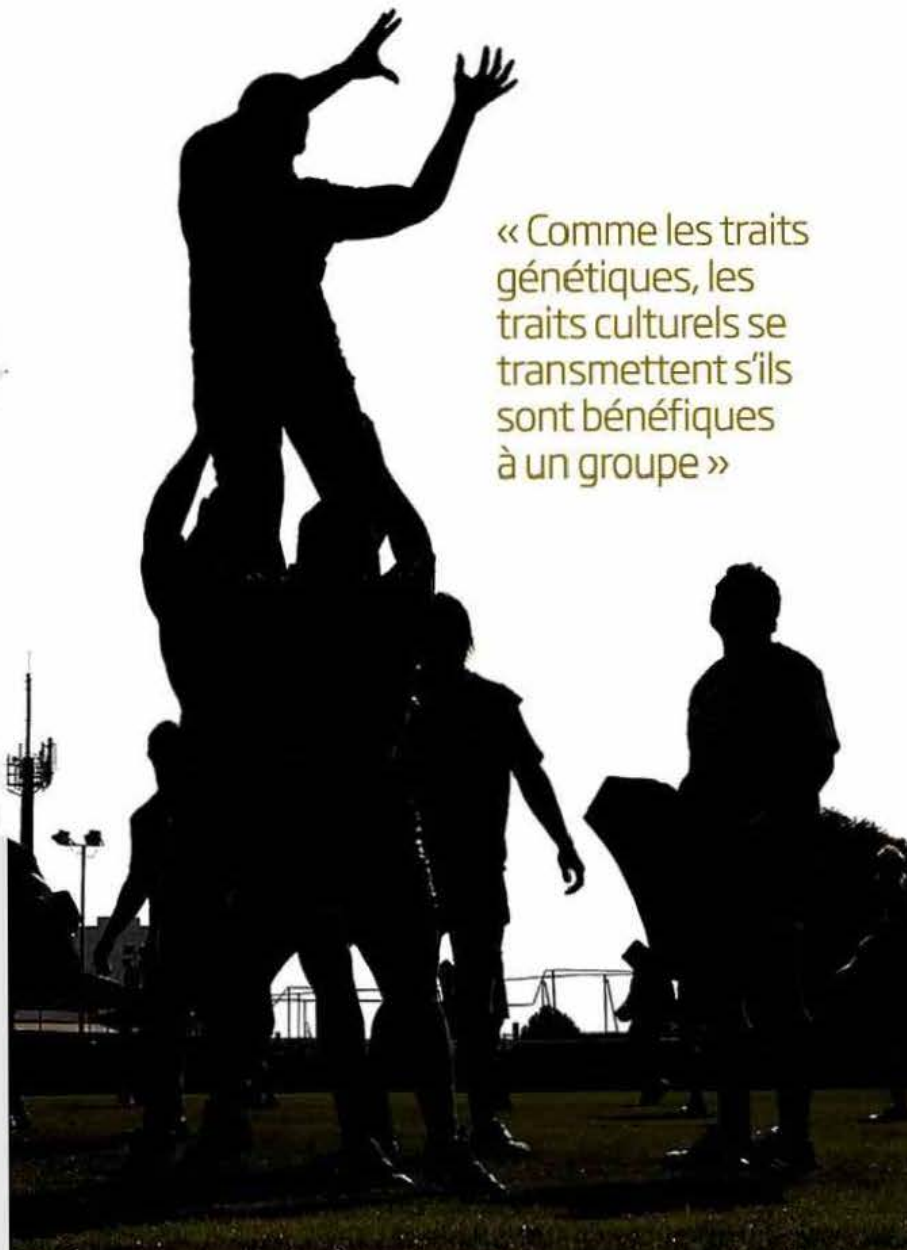
La propagation de l'agriculture a façonné la planète.

LA SÉLECTION DE GROUPE CULTURELLE

L'évolution sociale est un processus à différents niveaux, tout comme l'évolution génétique. Les traits transmis socialement peuvent se répandre, car ils bénéficient à tout le groupe, parce qu'il donne un avantage à l'individu au sein du groupe ou bien parce qu'ils agissent comme des parasites, en ne bénéficiant ni à l'individu ni au groupe. Et des exemples peuvent se trouver à tous les niveaux biologiques. Néanmoins la sélection de groupe semble avoir un rôle encore plus puissant dans l'évolution de la culture humaine que dans l'évolution de la génétique. Dans l'évolution génétique, un gène mutant se trouve à très petite fréquence dans un groupe. Il faut plusieurs générations pour qu'une mutation bénéfique devienne commune dans un groupe avant, éventuellement, de s'installer dans l'ensemble de la population. Dans l'évolution culturelle, par contre, un nouveau trait peut devenir assez fréquent dans un groupe en moins d'une génération. Les variations culturelles entre les groupes peuvent même être maintenues en présence de migration, tant que les individus immigrants abandonnent leurs anciennes coutumes et adoptent les nouvelles. En fin de compte, n'importe quel trait peut s'établir dans un groupe grâce à des normes ou en étant renforcé par des récompenses ou punitions. La sélection de groupe via des normes qui sont stables à l'intérieur de chaque groupe peut être plus puissante que la sélection de groupe pour des traits qui sont simplement sélectivement désavantageux au sein d'un groupe.

La sélection de groupe culturelle a engendré le développement d'une société humaine bien plus coopérative que les sociétés préagricoles ayant vécu il y a 15 000 ans. L'histoire humaine nous fournit un enregistrement détaillé de cette évolution culturelle à différents niveaux, notamment l'expansion des cultures les plus coopératives et organisées ainsi que la chute des cultures gangrenées par les divisions. En effet, cette dynamique devrait expliquer l'ascension et la chute des empires à travers l'histoire de l'humanité, comme le détaille l'écologue Peter Turchin dans *War and Peace and War* (2005).

« Comme les traits génétiques, les traits culturels se transmettent s'ils sont bénéfiques à un groupe »



UN NOUVEAU REGARD SUR L'ÉVOLUTION HUMAINE

Notre habileté à coopérer avec les autres membres d'un groupe montre que la sélection a été particulièrement puissante pour le groupe - par rapport à la sélection individuelle au cours de l'évolution humaine. Elle a dû jouer un rôle crucial en façonnant à la fois nos gènes et notre culture.

LA TRANSITION HUMAINE : UN ÉVÉNEMENT RARE ET CAPITAL

Diverses preuves convergentes suggèrent que l'évolution génétique humaine représente une transition évolutive majeure, de celle qui nous rend uniques. Chez la plupart des primates, les membres d'un groupe coopèrent à différents degrés, mais il y a aussi une intense compétition pour la dominance sociale au sein du groupe. À l'inverse, les sociétés de chasseurs-cueilleurs étaient très à cheval sur l'égalitarisme, supprimant les individus qui essayaient de tirer des bénéfices aux dépens des autres. Or, supprimer la sélection au sein des groupes est la marque de fabrique des transitions majeures. Cette importance de l'égalitarisme s'est certainement manifestée très tôt au cours de l'évolution humaine et a dû être une condition préalable pour d'autres attributs. C'est un exemple de coévolution entre les gènes et la culture.

À l'inverse de nos plus proches parents primates, l'intelligence humaine semble être basée sur la confiance entre les membres d'un même groupe, faisant du partage des connaissances ou la coordination des activités, des avantages au cours de tant de générations qu'ils sont

devenus instinctifs chez notre espèce. Les chiens, qui ont coévolué avec les hommes durant des milliers d'années, surpassent la plupart des primates concernant les adaptations fondées sur la confiance. (Science, vol 298, p 1634). Comme pour toutes transitions évolutives majeures, la transition humaine est un événement rare qui a eu des conséquences capitales. En tant que super-organisme primate, nous nous sommes dispersés sur l'ensemble du globe, occupant des centaines de niches écologiques et déplaçant un nombre incalculable d'espèces - pour le meilleur ou pour le pire. Et la transition humaine n'est, à ce jour, pas encore complète. La sélection au sein des groupes a été réprimée, pas stoppée, donc une vigilance constante est nécessaire pour maintenir les comportements prosociaux.

Des actes de punitions sont la clé pour maintenir la coopération et garder les groupes compétitifs.





David Sloan Wilson est professeur de biologie et anthropologie à l'université de Binghamton dans l'état de New York. Il est reconnu pour ses travaux sur la sélection à différents niveaux, et a joué un rôle majeur dans le retour des idées sur la sélection de groupe.

UN NOUVEAU CONSENSUS

Le problème de Darwin est un fait inévitable dans la vie de chaque espèce : les adaptations prosociales jouent en défaveur d'un individu face aux autres membres de son groupe. La seule façon de les voir évoluer est qu'il y ait un autre niveau de sélection naturelle : c'est la sélection de groupe. Les groupes prosociaux battent les groupes dont les individus sont plus égoïstes, donc les traits prosociaux avantageux pour un groupe rattrapent leur désavantage pour un individu au sein d'un groupe.

L'histoire scientifique de cette sélection de groupe est complexe. Alors qu'elle aurait pu constituer les fondements des études sur l'évolution, elle fut acceptée sans discussion, puis rejetée, réévaluée, de nouveau acceptée. Aujourd'hui encore, la confusion se fait sentir.

Ce n'est probablement pas un hasard si les fluctuations individualistes dans la théorie de l'évolution coïncident avec les fluctuations dans l'économie, les sciences humaines et sociales et la culture occidentale en général. Alors que les évolutionnistes interprétaient toutes les adaptations sociales comme des variétés d'intérêts personnels, les économistes expliquaient tous les comportements humains comme une maximisation de l'utilité individuelle, et la première ministre britannique Margaret Thatcher déclarait

qu'il « n'y a pas de société – seulement des individus et des familles ».

Mais le nouveau consensus affirme que l'organisme individuel n'est pas un niveau privilégié au cœur de la hiérarchie biologique. L'harmonie et la coordination associées au mot « organisme » peuvent exister à n'importe quel niveau et les individus peuvent perdre leurs propriétés quand la sélection s'opère en leur sein, comme c'est le cas lors d'un cancer.

La sélection de groupe est une force exceptionnellement puissante dans la génétique humaine et l'évolution culturelle. L'accepter au pied de la lettre et explorer ses conséquences aura des implications dans toutes les branches des sciences biologiques et liées à l'humain en général, des origines de la vie à la régulation de la société humaine à de grandes échelles spatiales et temporelles.

RÉFÉRENCES

- *The Neighborhood Project : Using evolution to improve my city, one block at a time* de David Sloan Wilson (Little, Brown, 2011)
- *Evolution for Everyone* de David Sloan Wilson (Delta, 2007)
- *Why We Cooperate* de Michael Tomasello (MIT Press, 2009)
- *Why Humans Cooperate : A cultural and evolutionary explanation* de Joseph Henrich et Natalie Henrich (Oxford University Press, 2007)
- *The Price of Altruism : George Price and the search for the origins of kindness* de Oren Harman (Norton, 2010)
- *Evolutionary Restraints : The contentious history of group selection* de Mark Borrello (University of Chicago Press, 2010)



TOUT **SAVOIR**
SUR...

LES TREMBLEMENTS DE TERRE

Par Susan Hough et Nolwenn Le Jannic

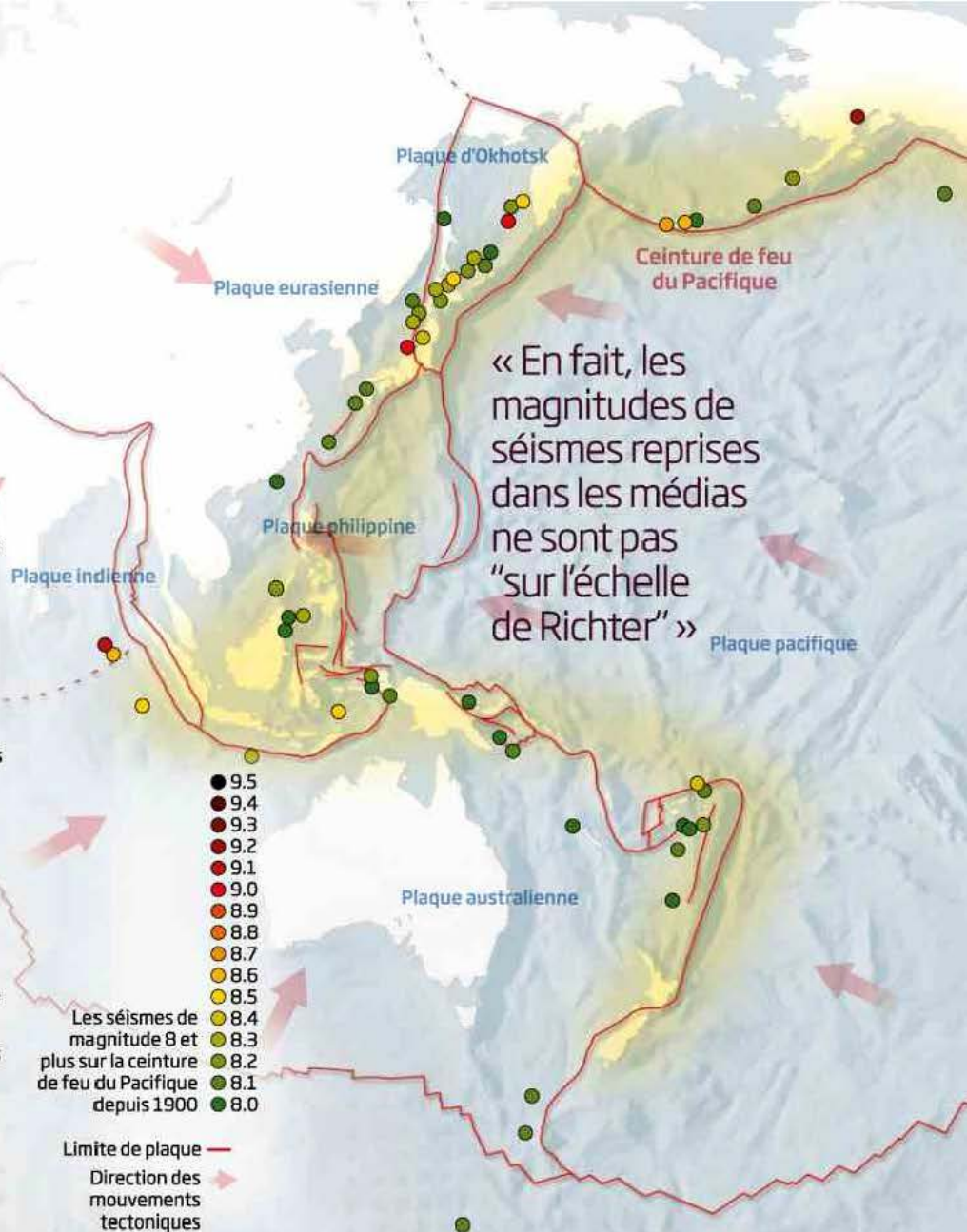
03

MIEUX ÉVALUER

Comment mesurer un tremblement de terre ? Depuis le début du XX^e siècle, les géologues savent que certains séismes créent des fissures à travers la surface de la terre, ce qui donne une idée de leur force. Mais puisque la plupart des failles de rupture sont entièrement souterraines, il fallait d'autres méthodes pour évaluer et comparer les tremblements de terre. Les plus anciennes échelles, les échelles d'intensité, assignaient en général un chiffre à la sévérité de la secousse à un endroit donné. Mais pour évaluer directement un séisme, il faut pouvoir enregistrer et analyser les ondes qu'il génère. Aujourd'hui, c'est possible grâce aux sismographes qui délivrent des enregistrements numériques, mais cela n'a pas toujours été le cas.

Le premier instrument compact capable d'enregistrer fidèlement de petits tremblements de terre locaux était le sismographe Wood-Anderson. Lorsque la terre tremblait, un poids suspendu à un fil tendu se mettait à tourner, déviant la lumière sur un film photosensible. L'image « dessinée » par la lumière reflétait la sévérité des ondes sismiques.

Au début des années 1930, Charles Francis Richter fit appel à ces sismographes pour mettre au point la première échelle de magnitude. Il utilisa un logarithme pour produire des valeurs de magnitude qui puissent être facilement repérées : chaque augmentation d'une unité en magnitude correspond à une multiplication par 30 de l'énergie relâchée. Ainsi, un séisme de magnitude 7 libère 900 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 5. Le sismologue a paramétré son échelle pour que la magnitude 0 corresponde au plus faible tremblement de terre qu'il estimait pouvoir être enregistré par un sismographe de surface. Les séismes de magnitude négative peuvent donc exister, mais ont peu de chance d'être détectés. L'échelle n'a pas non plus de fin, mais son inventeur avait sans doute en tête la magnitude 10 comme limite supérieure. Il s'est en effet arrangé pour que les plus violents séismes enregistrés en Californie et au Nevada correspondent à peu près à la magnitude 7 et il supposait que le tremblement de terre de San Francisco en 1906 était de magnitude 8 environ. Depuis, le record du séisme le plus violent a été atteint en 1960 au Chili avec une magnitude estimée de 9,5. C'est d'ailleurs dans les années 1960 que l'Américano-Japonais Keiichi Aki a introduit une nouvelle unité totalement différente : le moment sismique. Celui-ci fournit toutes



les caractéristiques de taille d'un séisme et est aujourd'hui la mesure utilisée lors des analyses scientifiques. Une échelle de magnitude de moment a donc été créée pour convertir le moment sismique en magnitude de Richter, et c'est ce dernier nombre qui est repris habituellement dans

les médias. Celui-ci n'est donc pas vraiment « sur l'échelle de Richter », car il n'est pas calculé selon les formules de Charles Richter, mais, dans la lignée de l'invention de celui-ci, les valeurs de l'échelle de magnitude de moment permettent efficacement d'évaluer les tremblements de terre.

Charles Richter (à droite) a emprunté le terme de « magnitude » à l'astronomie. San Francisco a été détruit par un séisme en 1906 (en fond).



HISTOIRE ET MESURES

Qu'est-ce qu'un tremblement de terre? Si l'Homme sait depuis toujours que la planète gronde, il lui a fallu des siècles pour en trouver les raisons. Et pour évaluer les séismes, les sismologues n'ont mis au point une échelle de mesure que dans les années 1930.

OÙ ET QUOI?

Notre conscience des tremblements de terre remonte à nos plus anciens jours en tant qu'espèce sensible, mais durant la grande majorité de l'histoire humaine nous n'en avons pas connu les causes. C'est seulement au siècle dernier que les scientifiques ont été capables de répondre à la question : qu'est-ce exactement qu'un tremblement de terre? Dans l'Ancien Monde, y compris autour de la Méditerranée et au Moyen-Orient, les séismes se sont produits suffisamment souvent pour faire partie de la culture des premières civilisations. Chez celles-ci, les légendes attribuant l'agitation géophysique aux caprices et aux fantaisies d'êtres spirituels se retrouvent ainsi fréquemment. Puis les gens ont commencé à chercher des explications physiques aux tremblements de la terre, comme Aristote et Pline l'Ancien, qui ont supposé que les séismes étaient le résultat de vents souterrains. Les études scientifiques les plus anciennes sur le sujet remontent quant à elles au XVIII^e siècle, marqué par une série inhabituelle de cinq violents séismes en Angleterre en 1750, suivis par le grand tremblement de terre de Lisbonne (Portugal) en 1755. Les enquêtes de l'époque consistaient notamment à référencer les

séismes passés et à essayer de comprendre les ondes d'énergie sismique générées lors de tels phénomènes. Ces ondes, qui se répandent depuis le point d'origine du séisme et soulèvent le sol, sont restées au cœur des études scientifiques jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Il est d'ailleurs à noter que le terme « séisme » est dérivé d'un mot grec ancien signifiant « secouer », même si aujourd'hui il s'applique plutôt à la source du tremblement qu'à la secousse en elle-même. Suite aux séismes de Mino-Owari (Japon) en 1891 et de San Francisco en 1906, les recherches se sont orientées vers les mécanismes à l'origine de ces phénomènes. En utilisant les données obtenues par triangulation (un ancêtre du GPS), avant et après le tremblement de 1906, le géophysicien Harry Fielding Reid a développé l'un des principes fondamentaux de la sismologie : la théorie du « rebond élastique ». Celle-ci explique que les séismes ont lieu lorsqu'une faille relâche soudainement les déformations élastiques qui s'étaient lentement accumulées (voir schéma). Il faudra cependant attendre encore un demi-siècle avant que la révolution des plaques tectoniques ne fournisse enfin la réponse à la question : qu'est-ce qui cause les séismes? Nous savons aujourd'hui que la plupart de ceux-ci naissent des contraintes le long des frontières entre les plaques, là où elles convergent ou glissent l'une sur l'autre. La science moderne a donc posé les bases permettant de comprendre où, comment et pourquoi les séismes ont lieu. Mais le diable se cache dans les détails...

Les théories du rebond élastique décrivent comment les séismes apparaissent le long des failles à cause des mouvements tectoniques.

FAILLE DÉCROCHANT

Les plaques tectoniques bougent constamment, mais très lentement

Les contraintes s'accumulent...

Jusqu'à ce que l'énergie soit relâchée d'un coup, générant un séisme

La croûte près de la faille est décalée, les plaques continuent à avancer

FAILLE INVERSE

FAILLE NORMALE

L'UN APRÈS L'AUTRE ?

Les séismes sont souvent associés les uns aux autres, l'un pouvant même déclencher l'autre, mais il subsiste des idées fausses sur ce qui les cause et sur la façon dont ils sont liés. L'une d'elles est qu'un gros séisme ferait faire un écart à une plaque tectonique tout entière. En effet, si l'une des extrémités de la plaque pacifique bouge, le reste de la plaque ne devrait-il pas en faire autant ? Le raisonnement paraît bon... mais il est faux.

Les plaques tectoniques terrestres bougent sans arrêt, environ aussi vite que poussent les ongles d'un humain. Lorsque deux plaques adjacentes se touchent, elles causent une déformation de la croûte terrestre et un stockage d'énergie, mais seulement le long de leur frontière. Lorsqu'un séisme survient et que cette énergie est libérée, cette petite couture rattrape simplement le reste de la plaque.

Les statistiques révèlent cependant que les risques de répliques sont élevés : en moyenne, la plus grosse réplique sera d'une magnitude inférieure d'une unité à la secousse principale. Et celles-ci peuvent se produire le long de failles voisines de la source du séisme.

En plus de ce risque lié aux répliques, un gros séisme peut également en engendrer un autre dans la région, en général dans un rayon d'une dizaine de kilomètres, quelques minutes ou quelques dizaines d'années plus tard. Ainsi, le 23 avril 1992, un séisme de magnitude 6,1 a secoué la région de Joshua Tree en Californie du Sud et a été suivi le 28 juin de la même année par un séisme de magnitude 7,3 à Landers, 35 km au nord. Un tel enchaînement est en fait une conséquence du mouvement de la première faille. Celle-ci va mécaniquement pousser les failles adjacentes, ce qui peut les faire « rompre », en quelques secondes ou en quelques années. Un autre mécanisme est également aujourd'hui reconnu comme la cause de certaines successions de séismes : les ondes sismiques. Les tremblements de terre déclenchés à distance ont souvent lieu, mais pas toujours, dans des zones volcaniques ou géothermiques actives, où le système magmatique souterrain est perturbé par le passage des ondes sismiques. Les récentes avancées en sismologie ainsi que les siècles d'expérience montrent heureusement que les séismes ne se déclenchent pas en cascade apocalyptique. Cependant, durant ces dernières décennies, les scientifiques ont appris que les failles et les tremblements de terre communiquaient entre eux, d'une façon plus variée et plus intéressante que ce que les termes de séisme précurseur, secousse principale et réplique peuvent suggérer.



TKY000/REUTERS

Le tsunami qui a frappé le Japon en 2011 a causé plus de dégâts et de morts que le séisme en lui-même.

TSUNAMI

Les séismes sous-marins peuvent engendrer une cascade d'effets potentiellement mortelle : la rupture d'une faille peut faire bouger le plancher océanique, ce qui va déplacer l'eau en surface et créer un tsunami. Celui-ci déferle alors sur l'océan dans toutes les directions, aussi rapide qu'un jet. S'il a une faible amplitude sur l'eau, il atteint en revanche des hauteurs incroyables lorsqu'il arrive au rivage. Les tsunamis peuvent également apparaître lorsqu'un tremblement de terre déclenche une chute brutale de sédiments, mais il sera alors en général de taille plus modeste.

MUSTAFA OZER/AP PHOTO/GETTY IMAGES/REUTERS



MOUVEMENT TERRESTRE

Comprendre les secousses causées par les séismes est indispensable pour s'y préparer. Mais l'impact d'un tremblement de terre sur les populations et les villes ne dépend pas que de sa magnitude. La croûte terrestre peut amplifier ou réduire la sévérité du choc.

VARIATIONS AUTOUR DU SÉISME

Même s'ils ont la même magnitude, deux séismes ne sont pas pour autant égaux. Or comprendre d'où viennent les différences entre leurs secousses permettrait de mettre au point des structures et des infrastructures capables d'y résister. En fait, la sévérité d'une secousse sismique dépend de trois facteurs principaux : la magnitude du séisme, la diminution de l'énergie au fur et à mesure que les ondes parcourent la croûte terrestre et la modification de la secousse du fait de la structure géologique locale. La secousse peut

dépendre également significativement de facteurs tels que la profondeur du foyer du séisme, l'orientation de la faille, le fait que la rupture de la faille ait lieu plus rapidement ou plus lentement que la moyenne...

L'atténuation des ondes sismiques varie en outre considérablement selon les régions. Dans des endroits comme la Californie ou la Turquie, où la croûte terrestre est fracturée de manière importante et est relativement chaude, les ondes se dissipent rapidement. En revanche, dans les régions éloignées des frontières entre les plaques tectoniques, comme la péninsule indienne ou le centre et l'est des États-Unis, les ondes voyagent plus facilement. Ainsi, suite au tremblement de terre de San Francisco en 1906, le géologue G. K. Gilbert remarquait qu'à trente kilomètres de la faille, « seulement quelques cheminées étaient renversées et tout le monde n'était pas réveillé ». Alors que les séismes qui ont eu lieu en 1811-1812 à New Madrid, dans le centre des États-Unis, ont abîmé les cheminées et réveillé les dormeurs à Louisville, 400 kilomètres plus loin ! Les structures géologiques locales telles que les couches molles de sédiments peuvent même augmenter l'amplitude des ondes. À Port-au-Prince (Haïti), certains des dégâts les plus importants liés au séisme de 2010 ont été le résultat de l'amplification de la secousse par de petites particularités topographiques, comme des collines et des crêtes. Pouvoir caractériser la nature des réponses d'un site reste donc l'une des cibles principales des études des mouvements du sol. Cela permettrait de cartographier les risques et leurs variations sur toute une zone... et donc de pouvoir guider la planification urbaine et la construction de bâtiments appropriés.

« Les séismes peuvent souvent être ressentis dans un rayon de 1 000 kilomètres »

🔍 Pour éviter que les bâtiments ne s'effondrent, les géologues essayent de cartographier les risques liés à la géologie locale.

POURQUOI EST-CE SI DIFFICILE ?

Cet appareil, baptisé « table remuante » teste la réaction des bâtiments en cas de séisme.



COLORADO STATE UNIVERSITY NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

Dans les années 1970 et 1980, les scientifiques cités dans les médias exprimaient leur optimisme sur la découverte imminente d'un moyen de prédiction des séismes à court terme. Depuis, le pessimisme a gagné du terrain. Pourquoi les tremblements de terre sont-ils si difficiles à prévoir ? Un nombre infini de signes précurseurs a été étudié, comme les répétitions de petits séismes, les signaux électromagnétiques ou encore les modifications dans

les concentrations d'un gaz rare, le radon, en passant par les changements hydrogéochimiques. Nombre d'entre eux paraissent prometteurs, mais aucun n'a passé le test d'un examen rigoureux.

C'est le cas du radon par exemple. En se basant sur cet indicateur, le technicien de laboratoire Giampaolo Giuliani avait annoncé publiquement en mars 2009 l'arrivée d'un gros séisme dans la région des Abruzzes, en Italie centrale. Une prédiction démentie par les sismologues locaux. Pourtant, le 6 avril, un séisme de

magnitude 6,3 frappa L'Aquila, faisant 308 victimes. Il est possible que le radon ait été relâché suite à une série de petits séismes ayant précédé la secousse principale. Il est aussi possible que ce n'ait été qu'une coïncidence. Car les scientifiques avaient exploré le potentiel de cet indicateur dans les années 1970 et avaient rapidement découvert qu'il manquait de fiabilité. Ce qui signifie qu'une fois de temps en temps, les fluctuations des concentrations de radon peuvent être associées avec un séisme imminent, mais que la plupart du temps, elles ne le sont pas. Et que certains gros tremblements de terre ont lieu là où aucune anomalie n'a été détectée. Il en va de même avec les autres précurseurs étudiés. Un autre problème majeur se pose également : celui des tests de prédiction. Pour développer une méthode de prédiction des séismes basée sur un type de signal annonciateur, les scientifiques

comparent les tremblements de terre passés avec les données enregistrées disponibles. De telles analyses rétrospectives sont cependant contaminées par de légers biais dans la sélection des données. En effet, une fois le séisme passé, il est aisé de regarder en arrière et de ne choisir que les informations qui semblent dessiner un motif récurrent. Cela est d'ailleurs illustré par la résistance du mythe qui veut que les animaux puissent sentir les tremblements de terre à venir. Là encore, il est possible que ceux-ci répondent à de faibles secousses que les humains ne ressentent pas, mais d'une manière générale, les animaux ont souvent des comportements étranges... et les gens ne leur donnent un sens qu'a posteriori. Or, si les signes précurseurs de séismes existent, il faudra réussir à passer des analyses rétrospectives et anecdotiques à de la science statistique rigoureuse pour espérer les trouver.

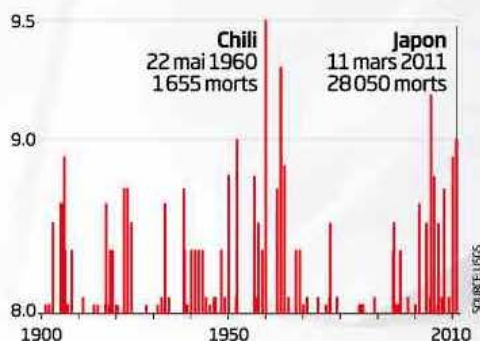
LE MYTHE DES MÉGA SÉISMES

Depuis le séisme de magnitude 9 à Sumatra en 2004, quatre autres tremblements de terre de magnitude 8,5 ou plus ont eu lieu sur la planète, dont celui de Tohoku, au Japon, en 2011. La fréquence des séismes augmenterait-elle ? D'après les analyses statistiques minutieuses, non. Le nombre récent de très gros tremblements est inhabituel, certes, mais ne représente pas une augmentation statistique notable. Et la quantité totale d'énergie relâchée par les séismes

sur les huit dernières années est toujours inférieure à celle émise par les deux plus grosses secousses enregistrées : celle de 1960 au Chili et celle de 1964 en Alaska. Cependant, le changement climatique lié aux activités humaines pourrait influencer à l'avenir le nombre de tremblements de terre : le rebond postglaciaire, qui correspond au soulèvement des masses terrestres du fait de la déglaciation, pourrait générer des séismes. Ceux-ci auraient alors un impact local important, mais l'énergie relâchée serait infime par rapport à celle des séismes associés aux mouvements tectoniques. Si les méga séismes ne sont donc pas à l'ordre du jour, il est en revanche probable que le nombre des mégadésastres causés par les séismes, lui, augmente dans le futur. C'est en effet la conséquence inévitable de la croissance de la population, associée à la construction d'habitations fragiles dans les pays en développement.

« Le changement climatique pourrait modifier la fréquence des séismes dans le futur »

Les séismes de magnitude 8 et plus depuis 1900

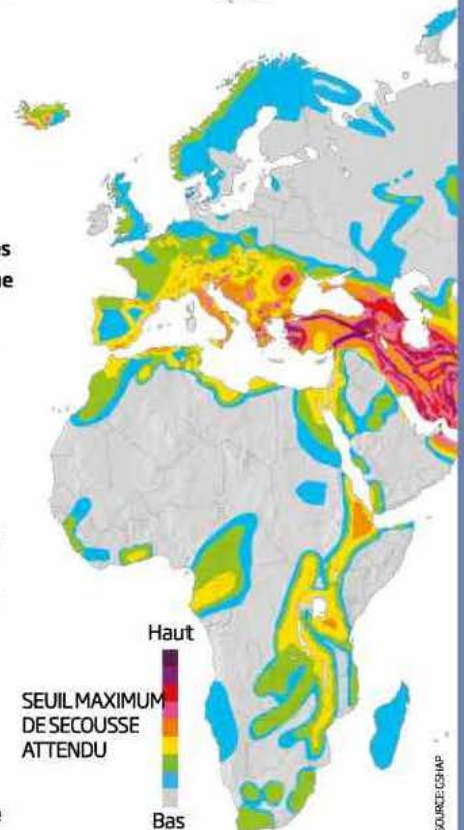


De nombreuses voies vers la prédiction des séismes ont été explorées, et pourtant, savoir exactement quand un tremblement de terre va avoir lieu demeure impossible aujourd'hui. La bonne nouvelle est que les connaissances sur les futures secousses de la Terre ont tout de même augmenté.

FUTURS SÉISMES : CE QUE L'ON SAIT

Lorsque la question leur est posée, les sismologues ont tendance à rapidement répondre que non, ils ne peuvent pas prédire les tremblements de terre. Prédire, non... mais prévoir, oui. Nous savons ainsi dans quelles régions du monde ils sont plus susceptibles de se produire et pour la plupart de celles-ci, nous avons de bonnes estimations du nombre de séismes prévu à long terme (voir la carte). Nous savons également que les tremblements les plus violents ont lieu le long des zones de subduction, là où une plaque tectonique plonge sous une autre, mais que n'importe quelle frontière entre deux plaques tectoniques peut générer un gros séisme. Par exemple, deux ans avant le tremblement de terre à Haïti en 2010, le géophysicien Éric Calais et ses collègues ont publié l'analyse des données GPS de la région et indiqué que « la faille d'Enriquillo peut générer un séisme de magnitude 7,2 si la tension élastique accumulée depuis le dernier gros tremblement de terre est relâchée en une seule fois ». Bien que ce scénario ait été différent en 2010, il s'en est fallu de peu. Les prochains séismes importants sont attendus en Californie. Les recherches de James Lienkaemper et de ses collègues concluent qu'il y a suffisamment de tension accumulée le long de la faille de Hayward à l'est de la baie de San Francisco pour produire un séisme de magnitude 7. En général, une secousse de cette force a lieu tous les 150 ans et la dernière s'est produite en 1868. L'inquiétude locale augmente inévitablement du fait de cette information, et pourtant, les séismes ont lieu selon une horloge irrégulière : si le temps moyen de répétition est de 150 ans, il peut varier de 80 à 220 ans.

Nous restons donc dans une incertitude : le prochain séisme attendu pourrait n'avoir lieu que dans une cinquantaine d'années... ou demain. Sur une échelle



Les géologues utilisent des cartes de danger pour illustrer les risques de séismes dans une région. Celle-ci montre la violence des secousses à laquelle doivent s'attendre les autorités locales dans les 50 prochaines années.

géologique, cela ne fait pas de grande différence, mais à l'échelle humaine, plus tôt au lieu de plus tard, semble tout changer. Si les scientifiques ont fait de grandes avancées sur la prévision du nombre moyen de séismes destructeurs, le défi qu'il reste à relever est à présent donc de trouver la volonté politique et les ressources pour préparer les populations à l'inévitable.

Les élèves californiens en plein exercice de préparation aux séismes.

JUSTIN SULLIVAN/GETTY



Susan Hough est sismologue au Centre des séismes de Californie du Sud et fait partie de l'Union américaine de géophysique. Elle a dirigé une équipe de secours afin d'installer des sismographes à Haïti après le tremblement de terre de janvier 2010.

DE L'UTILITÉ DE LA SISMOLOGIE

Dans les années 1970, à l'apogée des recherches sur la prédiction des séismes, Charles Richter est resté sceptique sur celles-ci et l'a fait savoir, ce qui a jeté un froid entre lui et ses collègues plus optimistes. D'une manière générale, les décennies qui ont suivi ont donné raison au premier. Pourtant, interrogé en 1979 pour savoir s'il pensait que la prévision des séismes serait un jour possible, il répondit : « Rien n'est moins prévisible que le développement d'un domaine scientifique ». Et en effet, 25 ans plus tard, les recherches ont avancé d'une manière que Charles Richter n'aurait pas pu imaginer. Récemment, il a ainsi été établi que de nombreuses zones de subduction pouvaient générer une sorte de murmure sismique doublé d'un trémor (un type de séisme) non volcanique. Ce dernier, qui est supposé apparaître le long des extensions des failles en profondeur, là où les couches géologiques sont trop chaudes pour être vraiment cassantes, a également été identifié le long de quelques failles en dehors des zones de subduction. Ce processus en jeu dans les couches profondes pourrait-il être la clé pour comprendre l'arrivée de gros tremblements de terre ? Les discours scientifiques sur de telles recherches se rassemblent au sein

de débats sur les méthodes de prédiction. Durant ceux-ci, certains se demandent si le pessimisme sur la mise au point de prévisions fiables des séismes n'aurait pas écarté des études qui auraient pu nous aider à comprendre comment les séismes fonctionnent. D'ailleurs, quelques questions basiques subsistent : pourquoi un tremblement de terre commence-t-il à un endroit donné à un moment donné ? Pourquoi s'arrête-t-il ? Et lorsqu'un gros séisme frappe, était-il « programmé » pour être gros ou est-ce plutôt un petit séisme qui a « dérapé » ?

RÉFÉRENCES

- *Predicting the Unpredictable: The tumultuous science of earthquake prediction* par Susan Hough, Princeton University Press, 2009
- *Earthshaking Science: What we know (and don't know) about earthquakes* par Susan Hough, Princeton University Press, 2002
- *Introduction to Seismology* par Peter Shearer, Cambridge University Press, 1999
- *Earthquakes 5th edition* par Bruce Bolt, W. H. Freeman, 2003

SITES INTERNET

- *US Geological Survey Earthquake Hazards Program*
earthquake.usgs.gov
- *European-Mediterranean Seismological Centre*
emsc-csem.org
- *3Global Seismic Hazard Assessment Program*
www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP
- *The Great ShakeOut US earthquake drills*
shakeout.org



TOUT **SAVOIR**
SUR...

LES FOSSILES

Par Pat Shipman et Marine Haquin

04

LA FAUNE D'EDIACARA

Les fossiles des plus anciens organismes multicellulaires se sont formés il y a 585 millions d'années. Nommés d'après les collines d'Ediacara en Australie où ils ont été découverts, ces animaux étaient oxygène-dépendants, ils n'ont donc pu évoluer qu'après la modification de la composition atmosphérique par les micro-organismes photosynthétiques. Ces organismes semblent avoir occupé tous les continents, sauf l'Antarctique. Pourtant leur conservation est une énigme, car leurs corps étaient mous. Des sédiments très fins et des poussières volcaniques pourraient être la clé : les sécrétions de micro-organismes auraient permis la cohésion de ces sédiments qui ont protégé les corps délicats. Les fossiles mesurent entre quelques millimètres et plusieurs mètres de long et leurs formes sont parfois si inhabituelles que leur appartenance au monde animal peut être débattue. Certains rappellent des méduses primitives ou des urochordés, mais *Charnia*, par exemple, pourrait être décrit comme un œuf au plat d'où aurait poussé une plume ou une sorte de fronde de fougère !

Ce qui n'est pas discutable par contre, c'est que ces créatures étaient multicellulaires et complexes. La faune d'Ediacara a disparu au début du Cambrien, il y a environ 542 millions d'années pour une raison inconnue. Des changements d'ordre chimique dans les océans et l'atmosphère ont été suggérés, tout comme la fragmentation du supercontinent et l'émergence de prédateurs.

🕒 Les trois bras du *Tribrachidium heraldicum* sont des curiosités du monde animal.



FRANSLANTING/CORBIS



SINCLAIR STAMMER/SPL/ALAN SHELTON/ROFF/SPL

L'EXPLOSION CAMBRIENNE

Un monde tout aussi bizarre a succédé à celui des Ediacariens. De la mudstone - une roche boueuse à l'origine - sombre, s'est déposée sur le plancher océanique il y a 505 millions d'années, au début du Cambrien : ce sont les schistes de Burgess, aujourd'hui dans les montagnes Rocheuses du Canada. De nombreux fossiles y ont été découverts, suggérant une véritable explosion de la diversité biologique. Ces fossiles ont été compactés en couches si fines que l'on peut les observer en contre-jour. Leurs conditions de fossilisation sont mystérieuses, car tous ont été aplatis et certains ont été détériorés par des mouvements sédimentaires.

La plupart des espèces de la faune de Burgess étaient suspensivores, c'est-à-dire qu'elles se nourrissaient en filtrant la matière organique de l'eau, mais 10 % d'entre elles étaient des espèces prédatrices. L'aspect de ces animaux était bien singulier à l'image des *Anomalocaris*. On pensait qu'il s'agissait de trois organismes différents : ses bras étaient assimilés à des crevettes, sa bouche était classée parmi les méduses et son corps parmi

les éponges ! Ces erreurs sont notamment dues au fait qu'*Anomalocaris* était à la fois mou et dur. Il n'était donc pas conservé uniformément et n'a jamais été retrouvé entier. La révélation s'est faite lors de la découverte d'une connexion indiscutable entre un bras et une bouche. Autre spécimen célèbre, *Hallucigenia*, tellement bizarre qu'on ne sait pas vraiment où est sa tête ! Au début, Simon Conway Morris, découvreur de l'espèce, avait reconstitué l'individu à l'image d'un ver qui devait se déplacer en marchant sur sept paires d'épines et qui pouvait se nourrir grâce à dix tentacules se trouvant sur son dos ! Aujourd'hui la plupart des chercheurs imaginent que la créature était plutôt dans l'autre sens, les tentacules au sol et les épines protectrices sur son dos. Dans tous les cas, *Hallucigenia* était un original !

LES SIGNES D'UNE VIE PASSÉE

Les fossiles ne sont pas seulement des éléments pétrifiés comme des os, des dents ou des coquilles. Ce sont aussi d'anciennes bactéries, des restes de tissus tels que les plumes et la peau ou de simples empreintes de pas et de feuilles. Certains ne sont pas particulièrement vieux : Otzi – ou Hibernatus – n'a que 5 300 ans, mais est considéré comme un fossile, tout comme les momies incas naturellement lyophilisées du Pérou. Même les mouches et grenouilles préservées dans l'ambre sont des fossiles ! Ils ne représentent qu'une infime portion de tous les organismes ayant vécu sur la planète, mais restent notre meilleure source d'information sur les organismes et environnements passés.

☀ Les trilobites se sont diversifiés durant le Cambrien et ont vécu 270 millions d'années.

LA PLUS ANCIENNE TRACE

Il y a peu de chance pour que la première forme de vie terrestre ait été fossilisée, mais déterminer le plus vieux fossile existant pourrait aider à résoudre un double mystère : quand et comment la vie est-elle apparue ? C'est un challenge, car le plus ancien fossile ne doit pas beaucoup ressembler à une forme de vie actuelle donc les candidats au titre de premier fossile sont toujours controversés, les plus sceptiques suggérant qu'il s'agit d'étranges formations géologiques plutôt que les traces d'un organisme ayant vécu. Aujourd'hui, les plus sérieux prétendants sont de minuscules gouttes de 3,4 milliards d'années découvertes à Strelley Pool, en Australie par David Wacey de l'université d'Australie-Occidentale (Nature Geoscience, vol 4, p 698). La vie sur Terre est de type cellulaire donc le plus vieux fossile doit présenter des structures cellulaires régulières et ces gouttelettes semblent remplir cette condition. La plupart sont

ovoïdes ou sphériques et creuses, délimitées par ce qui peut être une paroi cellulaire d'épaisseur uniforme. Les gouttelettes suggèrent un comportement biologique d'après l'équipe de David Wacey. Certaines présentent ce qui ressemble à une paroi déchirée, et le contenu cellulaire extrudé comme on l'observerait chez un organisme cellulaire détérioré. Ces parois sont riches en carbone, azote et soufre, suggérant un métabolisme de ce dernier. Et cette découverte est cruciale pour l'équipe, car, il y a 3,4 milliards d'années, le monde était chaud et quasiment privé d'oxygène et l'activité volcanique aurait produit du soufre en abondance.

Comment se forme un fossile

La carcasse des animaux repose dans un lieu propice, à l'abri des éléments et des charognards. Les fonds de mer et de rivières produisent les meilleurs résultats.



Enterré dans le sable, le sol ou la boue, l'animal se décompose lentement à cause du manque d'oxygène.



Le temps passe et des couches de sédiments recouvrent les restes. La composition chimique des os ou coquilles est modifiée par des minéraux et éléments chimiques s'introduisant par percolation.



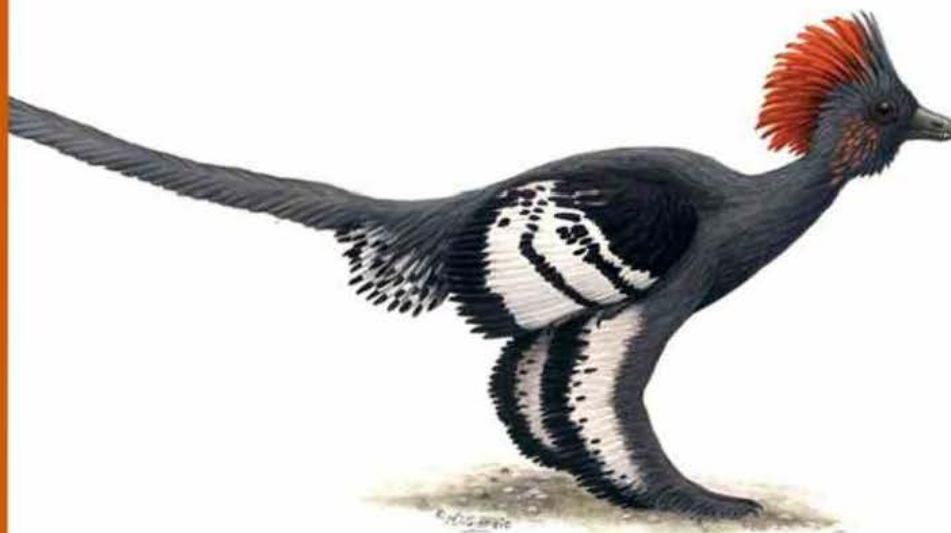
Dans certains cas, des minéraux imprègnent les os ou coquilles pour former un fossile. Dans d'autres cas, l'organisme est dissous ou les restes laissent une empreinte moulée.

« Nous pouvons reconstituer les couleurs et les motifs des plumes de dinosaures »

COLORER LE PASSÉ

En 2008, Jakob Vinther, alors étudiant à l'université de Yale (États-Unis), a fait une découverte extraordinaire : on peut reconstituer la couleur et les motifs des plumes fossilisées d'après la forme de leurs organites pigmentaires, les mélanosomes. Ils peuvent contenir de la mélanine qui crée une pigmentation noire (ou blanche en son absence) et toute sorte

de pigments produisant des nuances de gris, jaune, rouge ou encore bleu. Chaque pigment donne au mélanosome une forme spécifique et leur organisation à l'intérieur de la plume réfracte la lumière spécifiquement, générant des couleurs. Le premier dinosaure à plumes à avoir été colorisé grâce à cette technique est un *Anchiornis huxleyi* de 150 millions d'années découvert dans le Liaoning en Chine. L'équipe menée par Jakob Vinther et Li Quanguo, du Museum d'Histoire Naturelle de Beijing (Chine) a ainsi révélé un animal extravagant avec des taches, des rayures et même une crête de plumes rouges sur la tête (Science, vol 327, p 1369) ! L'équipe suggère que ces couleurs éblouissantes servaient à attirer les femelles.



IMAGINECHINA/CORBIS

☉ *Anchiornis huxley* essayait-il d'attirer une partenaire avec ses couleurs éblouissantes ?

☉ Un instantané de la vie passée : un placoderme du Jurassique découvert à Solnhofen.

UN SITE EXTRAORDINAIRE À MESSEL, EN ALLEMAGNE

L'un des gisements les plus excitants se trouve à Messel, en Allemagne, le site a même été classé au patrimoine mondial de l'UNESCO en 1995. Un écosystème, vieux de 47 millions d'années y a été

conservé à un niveau de précision saisissant, même de petits animaux rarement conservés sont intacts tels que des pangolins, des chauves-souris ou encore des fourmiliers. Même leur peau, leur fourrure et le contenu de leur estomac ont été conservés en plus des parties dures habituellement retrouvées comme les os ou les dents ! La diversité préservée à Messel est tout à fait stupéfiante, elle inclut des espèces de poissons, des serpents, des tortues, des lézards, des crocodiles, des alligators, des oiseaux, deux types de petits chevaux primitifs et certains des tout premiers carnivores. En 2009,

un extraordinaire fossile de primate a été ajouté à la liste. Un temps soupçonné d'être l'ancêtre de tous les hommes, *Darwinius masillae*, surnommé Ida, est tout de même un primate très primitif, ressemblant aux lémuriens actuels. Messel doit son exceptionnelle préservation à un ancien environnement idéal. Le paysage comprenait un lac entouré de forêts tropicales et alimenté par des rivières, créant un habitat humide propice à la sédimentation. Périodiquement, des remous dans les boues lacustres privées d'oxygène entraînaient un relâchement de dioxyde de carbone mortel pour les animaux se trouvant à proximité. Ces sédiments étaient dépourvus de micro-organisme, les animaux n'étaient donc pas décomposés et pouvaient être fossilisés. Aujourd'hui, ne restent que des fossiles emprisonnés dans des schistes bitumineux humides qui se détériorent en séchant. Afin de préserver le matériel, il est essentiel de retirer délicatement les schistes bitumineux, ensuite recouvert de laque, et d'ajouter une résine synthétique pour renforcer les fossiles.



JONATHAN BLAU/CORBIS SYGMA/REUTERS

BIEN PLUS QUE DES OS ET DE LA PIERRE

La fossilisation implique de longs processus de consolidation des sédiments et de remplacement du matériel organique par des minéraux. Ainsi, en principe, les tissus mous disparaissent bien avant d'être fossilisés. Heureusement il n'est pas impossible de retrouver un organisme intact avec ses parties molles dans les gisements nommés *lagerstätten*, que l'on pourrait traduire littéralement par « lieux de stockage ».

LES PREMIERS OISEAUX

L'un des *lagerstätten* les plus connus – des gisements fossilifères à conservation exceptionnelle N.D.L.R. – se situe à Solnhofen en Allemagne où le calcaire est extrait depuis l'époque romaine. Ce gisement s'est formé durant le Jurassique, il y a 151 millions d'années lorsque la région était un lagon peu profond. Sans courant pour mélanger les eaux de la mer Téthys adjacente et les eaux très salées du lagon, la salinité a augmenté et les sédiments se sont vidés de leur oxygène : les conditions étaient parfaites pour préserver les organismes. Tout animal ou plante qui aurait été enfoui dans les sédiments après sa mort suite à une chute dans l'eau est resté ainsi à l'abri des courants, des charognards et autres bactéries. Le potentiel fossilifère des calcaires de Solnhofen a été révélé en 1860 avec la découverte d'une plume fossilisée appartenant au tout premier spécimen du célèbre oiseau *Archaeopteryx lithographica*. Puis, des centaines d'autres organismes ont été sortis du calcaire : des ptérodactyles avec leur tanné, des ailes avec une fourrure intacte, le petit dinosaure *Compsognathus*, des crocodiles marins, des insectes, des poissons, des crustacés, des méduses et tellement d'autres !

LES DINOSAURES À PLUMES

Durant les deux dernières décennies, Liaoning en Chine est devenu le lieu de rendez-vous privilégié des paléontologues. La province doit sa célébrité aux nombreux dinosaures à plumes datant de 120 à 130 millions d'années qui y ont été découverts. En 1996, les photos de *Sinosauropteryx prima* ont ébranlé le monde scientifique en apportant la preuve que les oiseaux actuels descendaient d'un groupe de dinosaures ! Les conditions de préservation exceptionnelle ont permis de révéler toute une gamme de plumes. À l'image de *Sinosauropteryx*, certains spécimens présentaient un duvet non ramifié, ou des

protoplumes. *Anchiornis*, le plus vieux dinosaure à plumes connu, avait des plumes bien reconnaissables, mais il devait être incapable de voler, car ses ailes étaient courtes. Et il y a aussi *Microaptor* qui dont les quatre membres étaient des ailes à plumes ! Malgré des simulations, impossible de déterminer comment il se déplaçait. Ces fossiles nous ont poussés à imaginer d'autres fonctions que le vol pour la plume. Parmi les hypothèses on retrouve la parade étant donné que certaines plumes étaient de couleurs chatoyantes ou encore une fonction d'isolation contre la chaleur et le froid comme chez les Dromaeosauridés.

Un duvet isolant chez un « jeune » Dromaeosauridé de 130 millions d'années.

LE RÉGIME ALIMENTAIRE INSCRIT DANS LES OS

Les os fossilisés peuvent apporter de bonnes indications sur le régime alimentaire d'une espèce disparue et sa place dans la chaîne alimentaire. Les animaux incorporent dans leurs os différents éléments traces de leur nourriture, ceux-ci peuvent être détectés par des analyses chimiques. Le strontium et le calcium dérivent du sol, donc les plantes enregistrent le ratio local de ces éléments dans leurs tissus. Les animaux assimilent préférentiellement le calcium dans leurs os, donc les herbivores présentent un ratio strontium/calcium plus faible que les plantes qu'ils mangent. Un carnivore se nourrissant d'herbivores a un ratio plus faible encore et les prédateurs supérieurs se nourrissant de carnivores affichent les ratios

les plus faibles. Il est même possible de définir le type de plantes qu'un herbivore consommait en examinant les isotopes du carbone des fossiles. Les herbes tropicales utilisent une voie photosynthétique qui résulte sur une incorporation préférentielle du carbone 12 dans leurs tissus alors que les plantes ou les arbres des milieux tempérés produisent plutôt du carbone 13 dans leurs tissus. Le ratio de ces isotopes dans un os fossilisé révèle la proportion de ces deux types de plantes au sein du régime de l'animal.

Mais ce sont les dents fossilisées qui apportent le plus de renseignements. Même le plus moelleux des mets comme un fruit produit des éraflures ou des trous dans l'émail et la dentine.

Construire une collection référençant ces détériorations des dents associées aux différents régimes connus permet de déterminer ceux des espèces éteintes. Récemment, Peter Ungar de l'université de l'Arkansas a développé une approche utilisant la technologie de microscopie électronique pour réaliser des modèles 3D de la surface des dents, permettant ainsi de faire des comparaisons statistiques entre les dents.

Cette approche a révélé que deux hominidés primitifs, éteints depuis environ 1,2 million d'années, avaient des régimes alimentaires bien distincts : *Paranthropus boisei* consommait plutôt des herbes alors que *P. robustus* préférait les aliments mous (Science, vol 334, p 190).



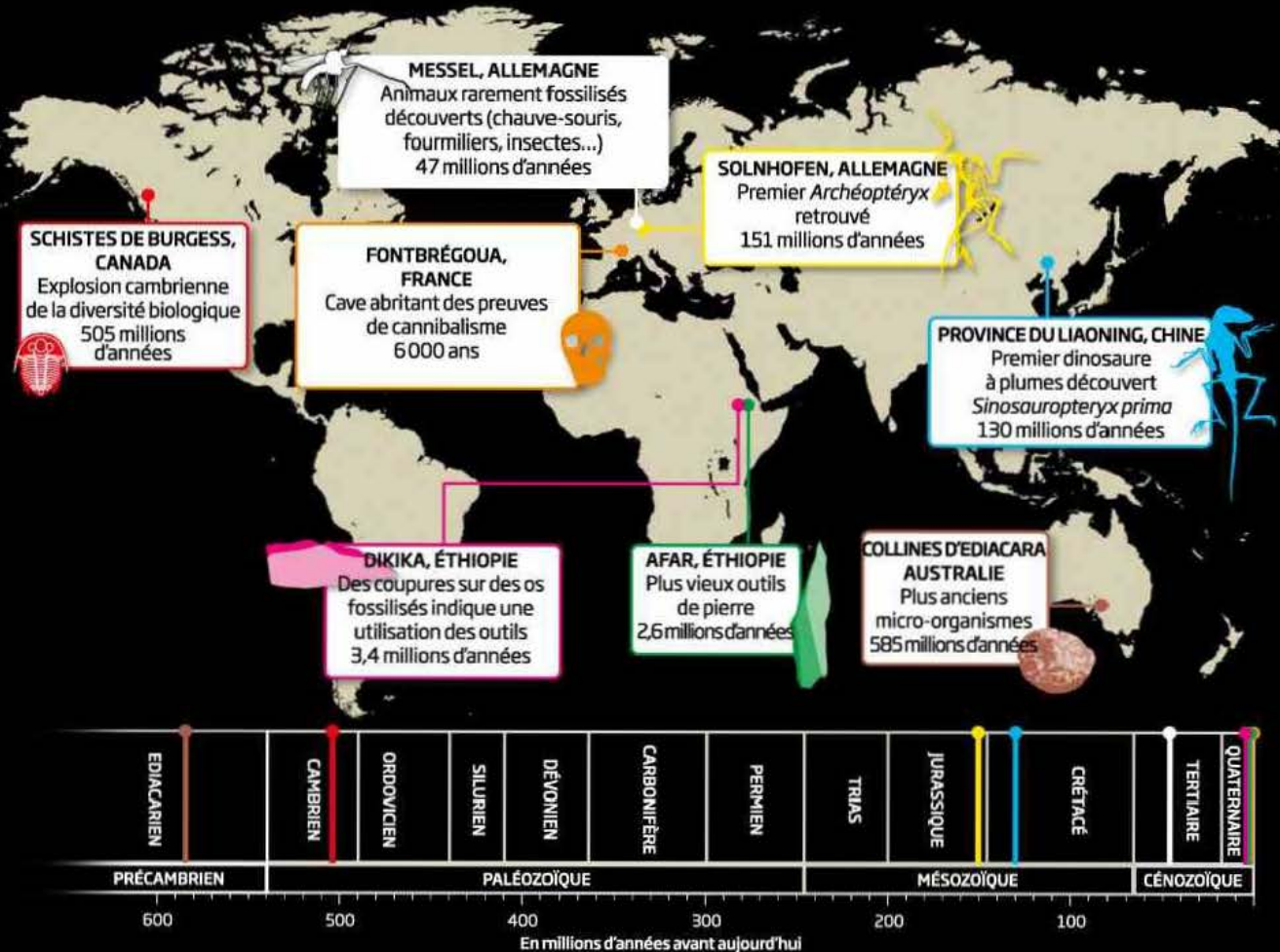
LES CANNIBALES DE FONTBRÉGOUA

En 1986, des restes âgés de 6 000 ans, retrouvés dans la cave de Fontbrégoua en Provence, ont été analysés, et les résultats ont jeté un certain froid. Dix des treize fosses examinées contenaient des restes d'animaux - un renard, un loup, un mouton notamment - portant des traces de boucherie. Les trois autres renfermaient des os humains ayant subi le même traitement : Paola Villa et son équipe de l'université du Colorado ont conclu qu'il s'agissait là de preuves de cannibalisme. Les traces de boucherie sur les restes animaux et humains étaient similaires (que ce soit pour l'emplacement ou la fréquence des coups et coupures), tout comme le motif de cassure sur les os longs pour en extraire la moelle. Aussi, aucune fosse n'était différente des autres, suggérant que toutes avaient la même utilité. Si les animaux ont été mangés - une interprétation indiscutable - alors les humains ont dû l'être aussi. (Science, vol 233, p 431).

L'équipe a également conclu que ce possible cannibalisme n'avait pas été incité par des rituels religieux ou une famine. Les habitants de Fontbrégoua devaient simplement avoir des traditions que nous avons du mal à intégrer aujourd'hui.

CE QUE CONTENT LES FOSSILES

Regardez bien les fossiles, vous pourriez y découvrir comment les anciens organismes vivaient et interagissaient. Pour reconstituer ces histoires, les paléontologues se tournent vers la taphonomie : l'étude des processus de fossilisation. Car la décomposition, l'altération, le transport laissent des indices qui attendent d'être interprétés pour raconter l'histoire du fossile.



DES OUTILS À LA POINTE

L'analyse des marques de coupures sur les os fossilisés a connu un formidable essor ces dernières années. Ces marques laissées par des outils en métal ou en pierre peuvent aujourd'hui être bien distinguées des marques laissées par des dents de carnivores. Les percussions – des coups assénés sur un os avec une pierre, peut-être pour en extraire la moelle – laissent aussi des marques et des fractures caractéristiques. Ainsi, on peut en déduire si un animal a été la proie d'un carnivore ou s'il a été préparé et consommé par nos ancêtres. Cela aide aussi à déterminer l'utilité d'un outil. Le plus vieux outil en pierre connu vient d'un site de la région Afar en Éthiopie et date de 2,6 millions d'années. Bien

qu'aucun reste humain ou quoi que ce soit évoquant un campement ne fût retrouvé, les marques de coupures et de percussions découvertes sur des os d'antilopes et d'autres animaux à proximité prouvent que nos ancêtres utilisaient ces outils pour préparer la viande. La recherche d'outils plus anciens s'avère laborieuse et les chercheurs expliquent ces difficultés par le fait que les tout premiers outils ont sûrement été utilisés par opportunisme, parce qu'une pierre

avait des bords naturellement bien tranchants par exemple. Néanmoins, en 2010, une équipe de la California Academy of Sciences (États-Unis) a découvert de nouvelles traces qui seraient des marques de coupures sur des os fossilisés à Dikika, en Éthiopie. Ces restes, datant de 3,4 millions d'années, repousseraient l'origine de l'utilisation des outils de 800 000 ans en arrière ! Mais, l'interprétation reste controversée tant qu'on n'aura pas retrouvé les outils eux-mêmes.



Pat Shipman est une paléoanthropologue fascinée par la taphonomie et la manière dont on s'en sert pour reconstruire l'écologie ou les comportements de nos ancêtres. Son dernier livre est *The animal connection* (Norton, 2011) et elle tient le blog psychologytoday.com/blog/the-animal-connection

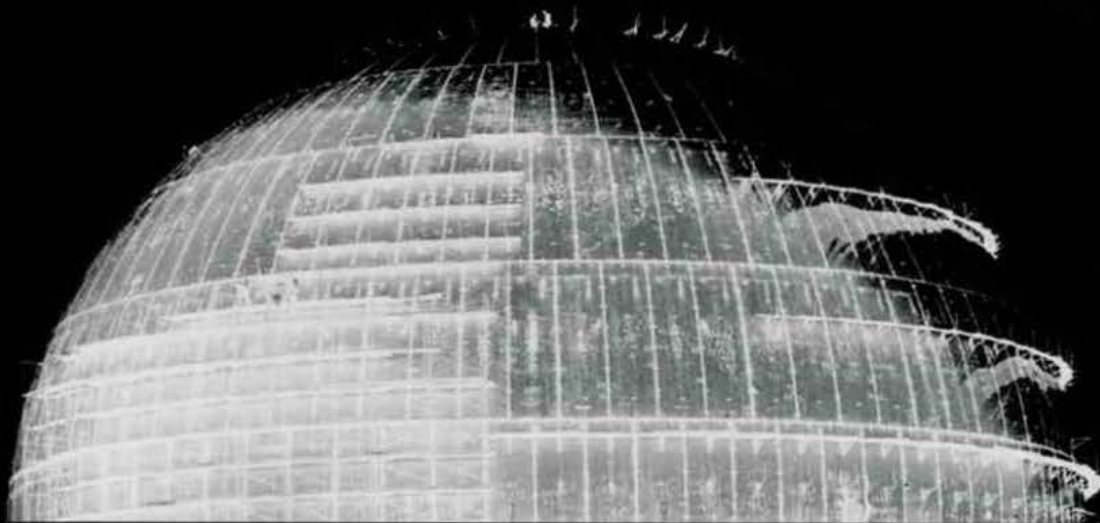
LES RÉVÉLATIONS DE L'ADN

Durant les dix dernières années, les techniques pour extraire l'ADN des fossiles ont connu de belles avancées, nous ouvrant une nouvelle fenêtre sur le monde passé. Aujourd'hui, nous sommes capables de dévoiler la couleur des yeux d'*Hibernatus*, tracer les déplacements des mammoths autour du monde et déterminer si nos ancêtres se sont reproduits avec d'autres hominines. Prenons le cas très médiatisé de l'ADN de Néandertal. En 1997, Svante Pääbo et ses collègues de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste à Leipzig (Allemagne) ont annoncé avoir extrait 379 paires de base d'ADN mitochondrial d'un os de Néandertal. En comparant cet ADN aux séquences correspondantes dans l'ADN d'un millier d'humains actuels, l'équipe a conclu que les hommes de Néandertal n'avaient en rien contribué à notre patrimoine génétique moderne, rien n'indiquait alors que l'homme moderne et Néandertal se soient reproduits entre eux. Puis, en 2010, la même équipe a publié une première version d'un génome de 4 millions de nucléotides construit d'après trois hommes de Néandertal. En comparant ce génome à ceux de cinq hommes modernes, les chercheurs ont découvert que les personnes d'origine

non africaines avaient hérité 1 à 4 % de leurs gènes de Néandertal. Ceci a été interprété comme une preuve du croisement entre les deux espèces, il y a 45 000 ans environ, peu après que des hommes modernes ont quitté l'Afrique. Cependant, certains chercheurs se montrent très sceptiques, il faudrait des échantillons plus larges pour lever les ambiguïtés. Les enregistrements fossiles seront toujours sujets à interprétation, mais plus on perfectionne les analyses d'ADN ancien plus on pourra en apprendre. Les fossiles nous promettent encore bien des révélations surprenantes !

RÉFÉRENCES

- *The Crucible of Creation: The Burgess Shale and the rise of animals* par Simon Conway Morris (Oxford University Press, 1998)
- *Taking Wing: Archaeopteryx and the evolution of bird flight* par Pat Shipman (Simon & Schuster, 1999)
- *The First Human: The race to discover our earliest ancestors* par Ann Gibbons (Doubleday, 2006)
- *Evolution of the Human Diet: The known, the unknown, and the unknowable* par Peter Ungar (Oxford University Press, 2006)
- "Neandertal DNA sequences and the origin of modern humans" par Matthias Krings et al, *Cell*, vol 90, p 19
- « A draft sequence of the Neandertal genome » par Richard Green et al, *Science*, vol 328, p 710



TOUT **SAVOIR** SUR...

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Par Richard Garwin et Sabine Casalonga

05

FISSION NUCLÉAIRE : LES FONDAMENTAUX

Dans une fission auto entretenue, un neutron provoque la fracturation du noyau atomique, ce qui libère plus de neutrons qui engendrent à leur tour la désintégration d'atomes voisins, dans une réaction en chaîne (voir schéma). La chaleur émise par ce processus peut être utilisée pour produire de l'énergie électrique.

Seules les divisions d'atomes d'uranium ou de plutonium peuvent produire les neutrons nécessaires à une réaction de fission. Le plutonium n'existe pas dans la nature. L'uranium a trois isotopes naturels ayant des masses atomiques de 234, 235 et 238. Ce dernier est le plus abondant, mais ne peut pas maintenir une réaction de fission. L'uranium 235, le seul isotope fissile, ne représente qu'une part

de 0,7 %. La grande majorité des réacteurs nucléaires utilisent donc un mélange d'uranium, dans lequel la proportion d'uranium 235 a été enrichie entre 3,5 et 5 %. La première étape consiste à convertir du minerai d'uranium en gaz d'hexafluorure d'uranium par un processus complexe. Étant donné que les molécules du gaz contenant de l'uranium 238 sont plus lourdes que celles contenant l'isotope léger, une centrifugeuse peut les séparer, concentrant l'uranium 235 par étapes. Après enrichissement, l'uranium est transformé en pastilles

qui sont placées dans des barres de combustible, regroupées à l'intérieur du cœur d'un réacteur à eau légère. L'eau est chauffée par la fission nucléaire et transformée en vapeur qui alimente une turbine. Une centrale nucléaire typique peut alimenter environ un million de foyers. Seule une petite fraction de l'uranium existe en concentrations suffisantes pour être extraites. Environ 90 % de l'approvisionnement provient de sept pays : le Canada, l'Australie, le Kazakhstan, la Russie, la Namibie, le Niger et l'Ouzbékistan.

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE VIRTUELLE

Certains pays, comme la Russie, la Chine et l'Inde, sont en train de développer le nucléaire civil. Ensemble, ces trois pays envisagent de construire près de 30 nouveaux réacteurs au cours des deux prochaines décennies, dont sept sont déjà en cours de construction (voir graphique). D'autres s'en détournent dans le sillage de la catastrophe de Fukushima au Japon en 2011. L'Allemagne va ainsi fermer ses centrales nucléaires d'ici la fin de l'année 2022. Cependant, avec les réseaux électriques nationaux maintenant intégrés dans les grands réseaux, il n'y a aucune garantie que les pays non nucléaires ne soient pas alimentés par l'atome. L'Italie par exemple, n'a pas de centrales nucléaires propres, mais reçoit 14 % de son électricité de la France, qui dispose d'un secteur nucléaire dominant. Cette dépendance indirecte est appelée énergie nucléaire virtuelle.

URANIUM 235

NEUTRON

PRODUITS DE FISSION
CÉSIMUM 137
STRONTIUM 90

Les réacteurs nucléaires bombardent les atomes d'uranium avec des neutrons. Lorsque les atomes se fractionnent, ils libèrent de l'énergie et plus de neutrons

LA FISSION DE L'ATOME

Les protons et les neutrons dans le noyau d'un atome sont liés par la force nucléaire forte. En fusionnant les noyaux de deux atomes légers, ou en fractionnant un atome lourd dans un processus de fission, on peut libérer une partie de cette énergie de liaison. Après plus de 50 ans de recherches, la fusion reste technologiquement inaccessible. La fission est exploitée dans des centaines de réacteurs dans le monde. En 2011, elle a fourni environ 13,5 % de l'énergie électrique mondiale.

UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA FISSION

En décembre 1942, Enrico Fermi réalisa la première réaction nucléaire en chaîne auto entretenue, en exploitant le processus qui sera utilisé pour dévaster les villes japonaises de Hiroshima et Nagasaki en août 1945. À la suite de cette destruction, les partisans de l'énergie nucléaire ont fait valoir que la fission pourrait également être utilisée pour fournir de l'énergie propre à tous. Lorsque cette même réaction nucléaire en chaîne est canalisée pour produire de l'électricité, un seul gramme d'uranium peut fournir 1 kilowatt de puissance pendant une année, soit environ la consommation électrique d'un Britannique moyen en 2011. Dans les années 1950, l'énergie nucléaire a commencé à être utilisée pour la production d'électricité ainsi que l'alimentation de sous-marins, de navires de la marine et de brise-glaces. On parlait alors avec engouement des futurs trains et avions nucléaires. Dans les années 1960, l'énergie nucléaire était considérée comme la réponse aux voyages dans l'espace. Des articles dans le New York Times

s'enthousiasmaient de la possibilité des « nuplexes » - des centres commerciaux ou des petites villes construites autour de centrales nucléaires qui auraient fourni leur électricité.

La prise de conscience des effets potentiels sur la santé des accidents nucléaires - et les coûts élevés de la construction d'installations blindées pour protéger la population des radiations nocives - a freiné cet élan. Cependant, les réacteurs nucléaires produisent de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre ou de polluants tels que les oxydes d'azote, de soufre et de carbone. Aujourd'hui, 31 pays s'appuient sur l'énergie nucléaire pour générer une partie de leur électricité.

Proposé

Programme spécifique et propositions de sites. Démarrage prévu dans 15 ans

Planifié

Autorisations et financements en place. Fonctionnement prévu dans 8 à 10 ans

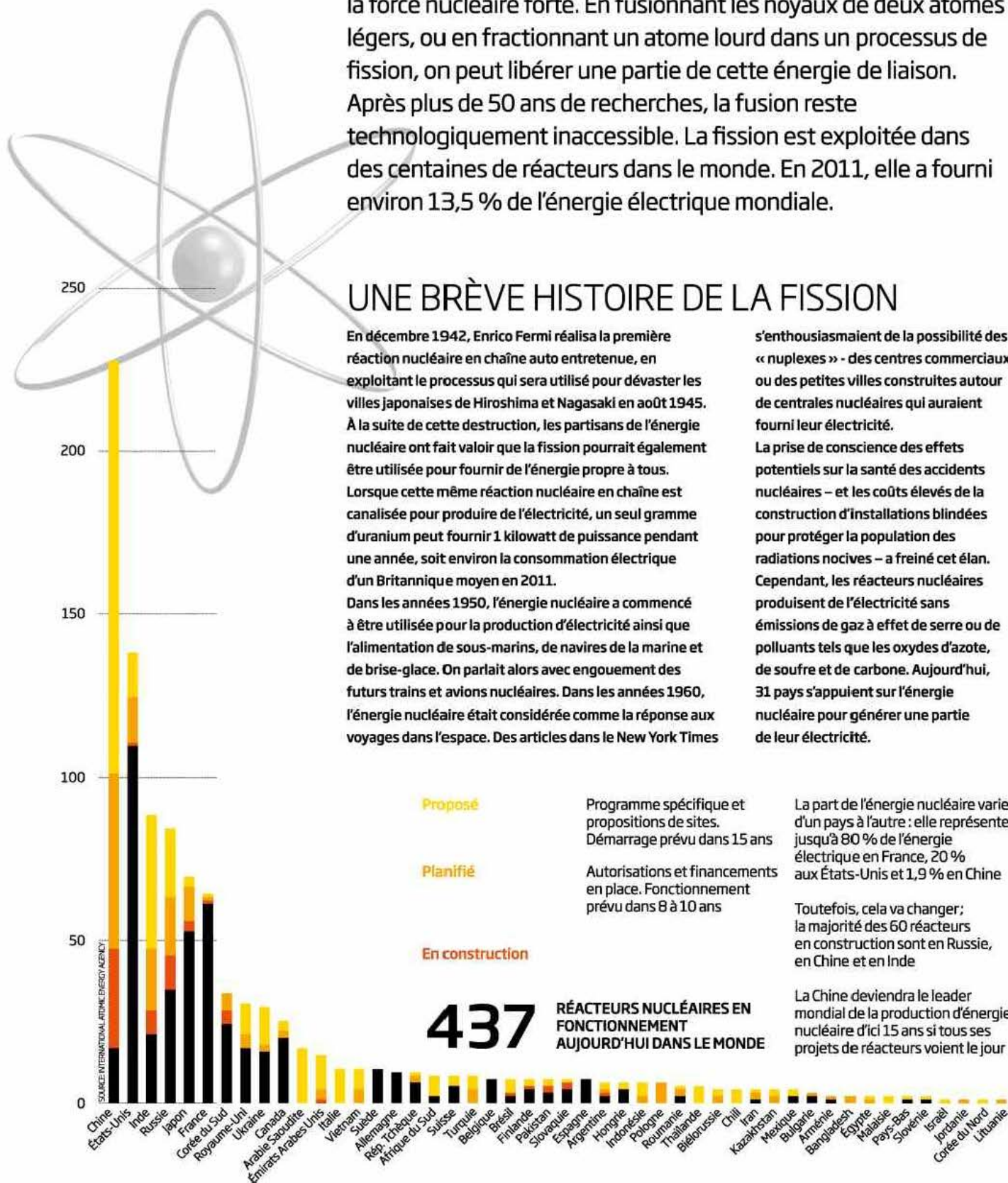
En construction

La part de l'énergie nucléaire varie d'un pays à l'autre : elle représente jusqu'à 80 % de l'énergie électrique en France, 20 % aux États-Unis et 1,9 % en Chine

Toutefois, cela va changer ; la majorité des 60 réacteurs en construction sont en Russie, en Chine et en Inde

La Chine deviendra le leader mondial de la production d'énergie nucléaire d'ici 15 ans si tous ses projets de réacteurs voient le jour

437 RÉACTEURS NUCLÉAIRES EN FONCTIONNEMENT AUJOURD'HUI DANS LE MONDE



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Un problème majeur de l'industrie nucléaire est ses déchets. Un réacteur typique a besoin de se débarrasser de 20 tonnes de combustible usé par an. Les principaux composants radioactifs de ces déchets sont le césium 137 et le strontium 90, leur radioactivité met 1 000 ans à diminuer à des niveaux négligeables. Il y a aussi des produits de fission de plus longue durée et de l'uranium et du plutonium dont l'isotope 239 met plus de 150 000 ans à se décomposer. Le combustible usé est initialement placé dans une piscine du réacteur. Après quelques années, le carburant est mis dans des fûts secs de stockage. Deux de ces fûts peuvent contenir le carburant usé d'une année pendant 100 ans. Après cela, les fûts doivent idéalement être ensevelis dans des tunnels souterrains profonds dans une zone géologiquement stable. Cependant il n'existe pas encore de tels dépôts. Des préoccupations d'ingénierie et la bureaucratie autour de l'implantation ont bloqué le processus. Alors, que devons-nous faire avec les quantités sans cesse croissantes de déchets nucléaires ? Aux États-Unis, près de 65 000 tonnes de combustible usé languissent dans des installations provisoires. Un autre problème sera l'élimination des déchets de démantèlement des réacteurs défunts : une version standard, une fois démolie, produit plus de 100 000 tonnes de déchets, y compris le béton, la cuve du réacteur, les postes de commande et la tuyauterie. À ce jour, seulement 17 des 135 réacteurs défunts dans le monde ont été démantelés.

LE RETRAITEMENT

Le combustible nucléaire usé contient encore des matières fissiles. Cela signifie qu'il peut être traité chimiquement pour éliminer les produits de fission et isoler l'uranium et le plutonium. Tous deux peuvent se substituer à l'uranium 235 comme combustible neuf. Cette opération peut réduire les besoins en uranium d'un réacteur d'environ 20 %. Il permet également de réduire le volume des déchets de haute activité d'environ 80 %. Le retraitement est effectué en France, au Royaume-Uni, en Russie, en Inde et au Japon. Ce processus est politiquement sensible, car le plutonium peut être détourné pour fabriquer des armes nucléaires. Il y avait six kilos de plutonium dans la bombe de Nagasaki. Une quantité similaire

peut être produite en un an par une centrale alimentant une ville de 25 000 personnes. En outre, les usines de retraitement ne sont pas strictement nécessaires : un ensemble de centrifugeuses à gaz utilisé pour alimenter un grand réacteur pourrait, avec des changements mineurs, fournir suffisamment d'uranium hautement enrichi pour 36 missiles. Ces préoccupations sont au cœur des sanctions contre les programmes nucléaires civils dans des pays comme l'Iran.

IGOR KOŠTIN/STYGMACORBIIS

« Les conséquences à long terme de la catastrophe de Tchernobyl sont encore inconnues »

Même avant l'effondrement des trois réacteurs de Fukushima, une renaissance du nucléaire était loin d'être assurée. Aux États-Unis et en Europe, toute transition vers l'énergie nucléaire avait calé en raison de questions sur la sécurité, l'élimination des déchets nucléaires et la production possible de matériaux d'armement par les centrales.

LES CATASTROPHES NUCLÉAIRES

Les accidents impliquant la fusion d'un cœur de réacteur sont peu probables, mais leurs conséquences peuvent être considérables. Deux ont conduit à des pertes humaines : en 1986 à la centrale nucléaire de Tchernobyl en Ukraine et en 2011 à la centrale de Fukushima Daiichi au Japon.

Le processus de fission nucléaire ne peut pas être stoppé en coupant l'alimentation en combustible. Si la réaction en chaîne cesse, la désintégration radioactive continue, émettant des niveaux de chaleur dangereusement élevés. Pour garder le réacteur froid, 75 tonnes d'eau sont nécessaires la première heure et 960 tonnes le premier jour. Si l'alimentation en eau tombe en panne, la fusion résultante peut entraîner des dommages qui exposent le cœur du réacteur. Les effets sur quiconque à proximité seraient désastreux. L'Agence internationale de l'énergie atomique précise que pour un travailleur, la dose annuelle maximale de rayonnement sans effets sur la santé est équivalente à l'absorption de seulement 0,02 joule d'énergie par kilogramme de poids corporel.

Une dose 50 fois plus forte provoque un syndrome aigu d'irradiation dont les symptômes peuvent inclure des éruptions cutanées, des vomissements et de la diarrhée. Dans les cas graves, la mort s'ensuit dans les jours ou semaines. Pour bloquer le rayonnement, un cœur de réacteur a un blindage de 2 mètres d'épaisseur. Si celui-ci se brise, la libération des isotopes radioactifs peut affecter la santé des riverains pour les années à venir. L'iode 131, par exemple, est absorbé par la glande thyroïde, ce qui peut conduire à un cancer. Plus persistants et problématiques, le césium 137 et le strontium 90 sont tous deux absorbés par le corps. Un grand rejet de matières radioactives peut conduire à des milliers de décès supplémentaires par cancer.

L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

En avril 1986, le réacteur n° 4 de Tchernobyl, en Ukraine, a subi une fusion du cœur catastrophique et une explosion de vapeur. La fusion et l'incendie consécutif ont libéré de grandes quantités de matières radioactives y compris des particules d'uranium, dans la fumée.

La catastrophe a conduit à 31 décès directs, mais les effets à long terme sont incertains. Le rapport de 2005 du Forum Tchernobyl estime les cas de mortalité prématurée due au cancer à 4 000 parmi les personnes

plus exposées. Toutefois, 90 % de l'exposition aux rayonnements a été exclue du rapport. Si toutes les données avaient été prises en compte, le rapport aurait prédit 40 000 décès supplémentaires. L'évacuation de 300 000 personnes a eu une conséquence inattendue. Il a créé un refuge pour la faune, y compris sangliers, lynx et bisons, dont les habitats ont été détruits par les industries locales.

LES SURGÉNÉ- RATEURS

Certains critiquent le fait que les réacteurs en cours de construction ont été conçus à l'époque des premières télévisions couleur. Ils ont dû en effet être testés sur des décennies pour garantir leur sûreté. Plusieurs nouveaux modèles sont à l'étude (voir schémas). Avant de créer la prochaine génération de réacteurs, cependant, les concepteurs doivent tenir compte des enseignements de l'accident de la centrale de Fukushima. Une leçon est que l'utilisation de l'eau comme liquide de refroidissement pose des risques, car elle peut évacuer de la vapeur radioactive dans le cas de fusion du cœur d'un réacteur.

Parmi les nouveaux projets, les réacteurs à neutrons (ou surgénérateurs) n'utilisent pas d'eau. Le projet SVBR 100 est ainsi refroidi avec un mélange liquide de plomb et de bismuth, ce qui permet une température de fonctionnement plus élevée et supprime le risque d'explosion en cas de fuite.

Les surgénérateurs utiliseraient moins de combustible que les modèles actuels - environ un centième -, car ils en génèrent eux-mêmes. Ils ne produisent pas de déchets à métaux lourds, mais recyclent leur plutonium, uranium, éléments plus lourds et isotopes. Toutefois, les déchets de produits de fission seraient identiques à ceux d'un réacteur ordinaire.

La Chine espère que les surgénérateurs supplantent les réacteurs à eau légère après 2050. Cependant les expériences passées ont été mauvaises. Le Monju au Japon et le Superphénix en France ont passé plus de temps à l'arrêt qu'en fonctionnement.

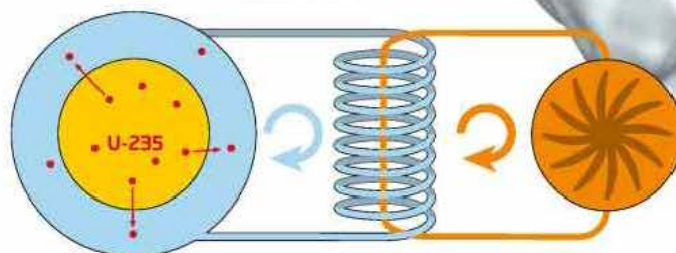
Un réacteur à eau légère standard

Le modèle le plus commun pour un tel réacteur utilise l'eau pour refroidir le cœur et pour freiner les neutrons.

Après la fission, l'eau ralentit les neutrons et...

... transfère la chaleur à l'eau dans une boucle secondaire...

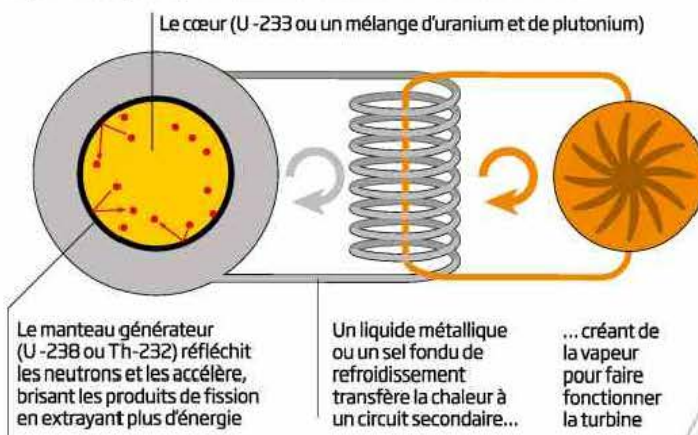
... formant de la vapeur pour faire tourner une turbine



Le cœur doit être remplacé tous les quatre ans. Ces réacteurs utilisent environ 1 % de l'énergie de fission disponible en théorie dans le minerai d'uranium.

Un réacteur surgénérateur

Une nouvelle génération de réacteurs, dits surgénérateurs, consommerait du plutonium, recyclant leurs propres déchets pour produire du combustible neuf. Ils peuvent en principe utiliser le combustible usé d'autres réacteurs.



Le cœur (U-233 ou un mélange d'uranium et de plutonium)

Le manteau générateur (U-238 ou Th-232) réfléchit les neutrons et les accélère, brisant les produits de fission en extrayant plus d'énergie

Un liquide métallique ou un sel fondu de refroidissement transfère la chaleur à un circuit secondaire...

... créant de la vapeur pour faire fonctionner la turbine

LA POUBELLE NUCLÉAIRE

L'endroit le plus approprié pour placer le stock croissant des déchets nucléaires est le sous-sol profond. La Suède et la Finlande sont en train de construire de tels dépôts, mais tous les pays ne possèdent pas les caractéristiques géologiques requises. Une solution consiste à créer des stocks communs qui accepteraient les déchets nucléaires de n'importe quel pays, sous le contrôle de l'Agence internationale de l'énergie atomique. L'Union européenne a récemment autorisé les États membres à utiliser des dépôts partagés, même hors de l'UE. Au cours des 50 dernières années, de nombreuses alternatives pour l'élimination des déchets nucléaires ont été proposées, certaines plus plausibles que d'autres.

« Pourquoi ne pas brûler tous les déchets nucléaires dans le soleil : le four nucléaire ultime ? »

LE FOUR SOLAIRE

Pourquoi ne pas envoyer les déchets des réacteurs dans un four nucléaire lointain qui pourrait facilement les absorber : le soleil ? En raison des risques d'accidents, à l'instar des tragédies de Columbia et Challenger. Si un vaisseau transportant le combustible nucléaire se désintégrait au-dessus d'un continent habité, les déchets dans l'air auraient des conséquences importantes sur la santé.



LES NOUVELLES FRONTIÈRES

Avec 9 milliards d'individus en 2050, l'humanité consommera bientôt plus d'énergie que la quantité totale utilisée au cours de son histoire. Déjà aujourd'hui, nous produisons 1 000 tonnes de gaz à effet de serre (GES) par seconde. L'énergie nucléaire pourrait répondre à nos besoins sans générer de GES, mais il faudrait trouver une solution pour réduire ses risques.

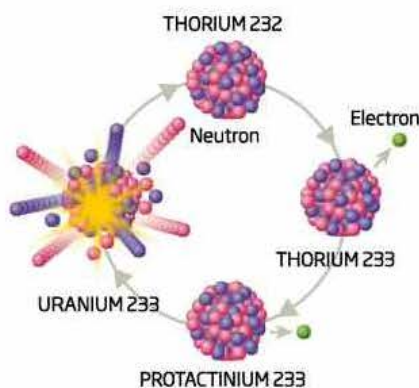
LE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE DE L'OCÉAN

Un réacteur nucléaire exige environ 200 tonnes d'uranium par an. Les coûts de l'exploitation minière sont à la hausse, car les gisements riches en uranium s'épuisent. D'où l'idée de l'extraire de l'océan. Le métal est présent dans l'eau de mer à une concentration d'environ 3,4 parties par milliard, et à hauteur d'environ 4 000 millions de tonnes au total dans les océans. Des chercheurs japonais ont mis au point une algue artificielle qui absorbe préférentiellement l'uranium. Extraire le métal de cette manière coûtera peut-être 1 000 \$ (725 €) par kilogramme, mais l'efficacité du processus pourrait bientôt doubler. L'uranium marin serait aujourd'hui une source abordable de combustible même s'il reste plus cher que son homologue terrestre. Néanmoins les aspects environnementaux n'ont pas encore été analysés.

THORIUM : LE SUPERCARBURANT ?

Pourquoi utiliser de l'uranium quand un autre combustible est aussi « propre » et sans danger ? C'est l'argument des partisans du thorium. Ils affirment que cet élément peut fournir une énergie non carbonée presque illimitée sans générer de déchets à long terme ou de périls liés au retraitement. D'ailleurs, le futur programme nucléaire de l'Inde

dépendra fortement du thorium, et récemment la Chine a également rejoint cette course. Le thorium existe naturellement sous la forme d'un seul isotope stable, le thorium 232. Celui-ci n'est pas fissile, mais peut fournir du combustible s'il est converti en uranium 233 par des tirs à neutrons (voir schéma). La technologie n'a pas encore été pleinement développée, mais les affirmations selon lesquelles elle serait exempte des problèmes qui ont conduit aux catastrophes de Tchernobyl et de Fukushima ne sont pas fondées. Il est vrai que les réacteurs au thorium ne généreraient qu'une fraction des déchets radioactifs à longue durée de vie produits par les réacteurs à uranium. Toutefois, ils doivent extraire une partie de leur énergie de la fission de l'uranium. Il reste donc à voir comment les allégations sur le thorium vont perdurer.



Bien que le thorium 232 ne soit pas fissile, il peut être utilisé dans les réacteurs nucléaires. Quand l'isotope absorbe un neutron, il devient le thorium 233 qui se désintègre en uranium 233 capable de fission.

TRANSMUTATION

Exposer des déchets nucléaires à des neutrons peut les « transmuter » en isotopes qui se désintègrent plus rapidement, réduisant ainsi la durée de vie de leur radioactivité. Bien que cette idée ait longtemps été mise en avant, une étude approfondie par l'Académie nationale des sciences des États-Unis en 1996, financée par le ministère de l'Énergie, a conclu que ce n'était pas pratique en partie à cause des multiples cycles requis. Comme le retraitement, la séparation et la transmutation ajoutent de nouveaux risques au cycle du combustible nucléaire.

ENFOUISSEMENT EN MER

Dans une zone de subduction, la croûte terrestre est entraînée sous une autre par le flux lent du manteau. En mer, une telle région est marquée par un large rift. Certains suggèrent d'y éliminer les déchets nucléaires, d'où ils glisseraient en profondeur sous la terre. Cependant, les accords internationaux interdisent l'élimination des déchets nucléaires en mer. En outre, la subduction progresse d'environ un centimètre par an et cela pourrait prendre 100 000 ans pour enfouir des déchets à un kilomètre sous le fond marin.

FORAGES SOUTERRAINS

Une autre approche consiste à enfouir les déchets dans des forages si profonds qu'ils ne puissent plus remonter. Les placer dans un environnement très salin empêcherait la contamination des aquifères d'eau douce et des sites appropriés pour des puits de 5 km de profondeur semblent plus faciles à identifier que pour des dépôts géologiques. Cependant, le coût pourrait se révéler prohibitif, et toute défaillance lors de la pose serait catastrophique.



Richard Garwin est un membre émérite du Centre de recherche Thomas J. Watson d'IBM à Yorktown Heights, dans l'état de New York, aux États-Unis. Il a travaillé dans le laboratoire d'Enrico Fermi et conseille le gouvernement américain sur l'énergie et les armes nucléaires depuis la guerre froide.

LE PROBLÈME DU PLUTONIUM

Tous les pays qui utilisent l'énergie nucléaire sont confrontés à la question de leurs déchets dangereux. En plus des produits de fission de son installation nucléaire de Sellafield, le Royaume-Uni a accumulé 112 tonnes de plutonium, isolé du combustible usé et stocké sous forme de poudre d'oxyde. Ce qui, selon les calculs de l'Agence internationale de l'énergie atomique, est assez pour concevoir 10 000 armes nucléaires. Le gouvernement britannique dépense des milliards pour protéger ce stock.

Se débarrasser de celui-ci pourrait être aussi simple que de convertir le plutonium en combustible réutilisable. Le processus MOX - du nom du combustible, un oxyde mixte de plutonium et d'uranium - réduirait le volume de plutonium, rendrait le reste trop radioactif pour être volé, et produirait de l'énergie électrique.

Deux réacteurs à eau légère - construits pour fonctionner avec du plutonium - pourraient éliminer les 100 tonnes de plutonium en 50 ans. Le combustible usé peut ensuite être placé dans un dépôt géologique.

GE Hitachi a proposé une autre solution : transformer deux de ses réacteurs PRISM de nouvelle génération pour faire un travail similaire, mais avec un combustible métallique plutonium-uranium au lieu

d'un oxyde mixte.

En attendant, GE propose d'irradier le plutonium de Sellafield afin de le rendre « autoprotecteur » : si radioactif que tout voleur meure en essayant de s'enfuir avec. Convertir et irradier l'ensemble du stock de Sellafield de cette façon requiert cinq ans. Toutefois, la combustion du combustible résultant dans les réacteurs PRISM nécessite 200 ans : beaucoup plus que la durée de vie du champ de protection ou des réacteurs conçus pour fonctionner 50 ans.

Une meilleure solution serait de se passer des réacteurs et d'ajouter l'oxyde de plutonium existant directement dans le verre qui doit être produit afin de contenir en permanence ces liquides hautement radioactifs. La meilleure option pour le plutonium de Sellafield est ce qu'elle a toujours été - l'enfouissement.

RÉFÉRENCES

► *Megawatts and Megatons : A Turning Point in the Nuclear Age ?* par Richard L. Garwin et Georges Charpak (Alfred Knopf, 2001)

► *De Tchernobyl en tchernobyls* par Georges Charpak, Richard L. Garwin et Venance Journé (Odile Jacob, 2005)

SITES INTERNET

► *Les archives de Richard Garwin*
<http://www.fas.org/rig/>



TOUT **SAVOIR** SUR...

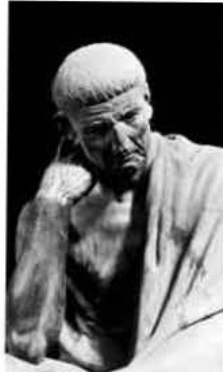
L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Par Peter Norvig et Maryse Chabaliér

06

UN DOMAINE FRAGMENTÉ

Dans les années soixante, les spécialistes de l'intelligence artificielle (IA) pensaient pouvoir atteindre leurs objectifs en quelques décennies, à l'image de l'aviation qui était passée en trente ans du premier avion à réaction à l'envoi d'un homme sur la lune. Mais l'intelligence ne peut pas se décrire en quelques formules simples. Les chercheurs ont réalisé qu'ils n'auraient jamais suffisamment de matériel ni de connaissances pour simuler tout ce que peut faire un humain. Ils se sont donc divisés, chacun se spécialisant dans un domaine, telles la reconnaissance du langage, la vision ou la déduction probabiliste. Toutes ces sous-disciplines ont connu d'importants succès. En 1997, l'ordinateur Deep Blue d'IBM a battu le champion du monde d'échecs, Garry Kasparov. Il était capable d'évaluer 200 millions de positions d'échec par secondes pour trouver le bon mouvement. Si sa victoire est impressionnante, elle ne cache pas la limite de ses compétences. La machine ne pouvait pas discuter des stratégies employées ni jouer un autre jeu. Rien à voir avec l'intelligence humaine.



UNE ORIGINE PHILOSOPHIQUE

Les fondements de l'intelligence artificielle sont bien plus anciens que les ordinateurs. Aristote est en effet l'inventeur

d'une méthode, le syllogisme, qui permet, par un raisonnement logique, de tirer des conclusions à partir de prémices. Un exemple de ce type de raisonnement est : « certains cygnes sont blancs, tous les cygnes sont des oiseaux, donc certains oiseaux sont blancs. » Ceci peut se résumer par « certains A sont B, tous les A sont C, donc certains C sont B. ». Inutile de connaître la signification des mots. Une machine peut ainsi agir de manière intelligente, sans posséder toutes les compétences humaines. Ce n'est qu'à la moitié du XXe siècle que les ordinateurs ont commencé à être assez sophistiqués pour pouvoir passer de la théorie à la pratique. En 1948, Grey Walter, un chercheur de l'université de Bristol, en Angleterre, a conçu des « tortues » mécaniques. Elles pouvaient bouger, réagir à la lumière et apprendre. L'une d'elles, appelée Elsie, réagissait à son environnement, par exemple en baissant sa sensibilité à la lumière à mesure que sa batterie se déchargeait. Ceci la rendait imprévisible, ce que Walter comparait au comportement animal. En 1950, Alan Turing a proposé que, dans la mesure où un ordinateur était capable d'entretenir une conversation

avec une personne, on doit admettre qu'il « pensait ». Le terme « intelligence artificielle » n'a été inventé qu'en 1956. Lors d'un colloque d'été, les fondateurs de ce domaine ont exposé leur vision : « Tous les aspects de l'apprentissage ou autre aspect de l'intelligence peuvent en principe être décrit si précisément qu'une machine peut les simuler ». L'invention de machines ayant une intelligence comparable à celle des humains semblait inévitable.



THE KOBAL COLLECTION/ALAMY/PIRELLA GÖTTSCHE LOWE COLLECTION/BETTMANN/COPIES

Après un départ ambitieux, l'intelligence artificielle se sépare rapidement en plusieurs sous-disciplines interconnectées.

1950

Alan Turing imagine que les ordinateurs pourront être programmés pour répondre à des questions aussi bien que des humains

1958

Allan Newell et Herbert Simon prévoient qu'un ordinateur pourra battre un champion d'échec dans 10 ans. Cela prendra en réalité 40 ans

1965

Le premier agent conversationnel, appelé ELIZA, entretient des conversations rudimentaires

1975

Le programme Meta-Dendral découvre des règles jusque-là inconnues sur les molécules. Elles sont publiées dans le journal de la société américaine de chimie

1956

Le terme « Intelligence artificielle » (IA) est inventé lors d'un congrès à l'Université de Dartmouth

1961

Les programmes d'ordinateur résolvent des calculs du niveau de la première année universitaire

1973

« Freedy Robot » utilise la perception visuelle pour localiser et assembler des modèles

1974

Les agences gouvernementales suspendent leur financement des recherches sur l'IA

1967

Le programme STUDENT résout des problèmes mathématiques du niveau lycée, écrits avec des mots

1980

Des véhicules autonomes se conduisent seuls à l'Université de Munich, atteignant 90 km/h

Origine de l'IA
Représentation et raisonnement
Compréhension du langage naturel
Robotique
Apprentissage par les machines

DES AMBITIONS PRÉCOCES

On a supposé depuis longtemps qu'il était possible de construire des machines capables d'apprendre et de raisonner aussi bien que des humains. Mais ce qui semblait simple au départ s'est révélé être bien plus difficile.

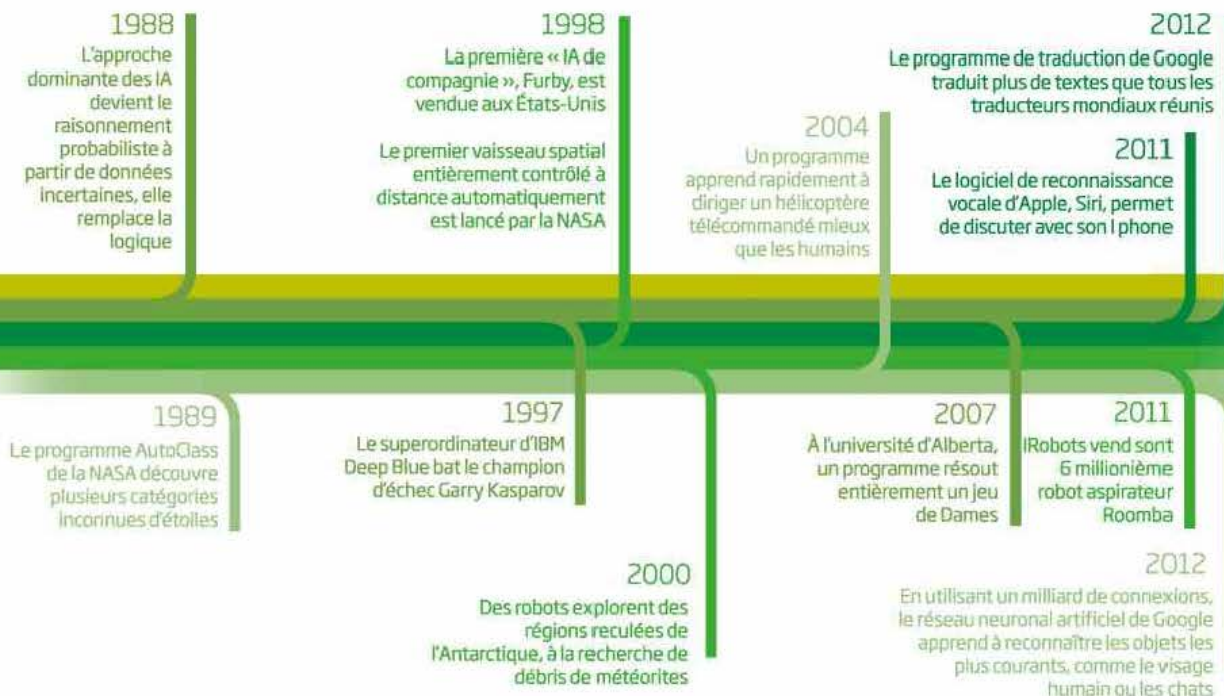
QU'EST-CE QUE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ?

Pour pouvoir parler d'intelligence artificielle, il faut d'abord savoir quand une machine peut être qualifiée d'intelligente. Certains programmes sont capables de calculer bien plus vite que nous, ou de suivre des milliers de comptes bancaires. Pour autant, on ne les considère pas comme intelligents et nous ne nous étonnons pas qu'ils fonctionnent bien. Nous n'employons le terme intelligent que lorsque des machines sont capables de maîtriser des capacités habituellement réservées à l'être humain, comme la reconnaissance faciale ou la maîtrise d'un instrument de musique. Les programmes ordinaires sont conçus pour faire des tâches dont on peut connaître à l'avance le résultat. Mais dans le cas de l'intelligence artificielle, il faut les programmer pour qu'ils trouvent le bon résultat sans que l'on connaisse nous-mêmes la réponse. En effet, une part d'incertitude peut venir

modifier le résultat. Dans la vie réelle, elle peut prendre des formes multiples, que ce soit un adversaire qui cherche à nous empêcher d'atteindre notre but ou les conséquences insoupçonnées d'une action. Un programme intelligent doit donc non seulement modéliser une tâche mais aussi l'environnement dans lequel elle se déroule. Il doit ainsi détecter les modifications de son environnement et agir en conséquence. Une machine peut donc être qualifiée d'intelligente seulement lorsqu'elle peut trouver les bonnes réponses dans un environnement incertain.



Le futur de l'IA change au gré de la culture populaire





CHERCHEUR DE DONNÉES

En 2011, IBM a présenté Watson, un superordinateur capable de comprendre des questions posées dans le langage de tous les jours et d'y répondre. Il s'agit de 3000 ordinateurs connectés en réseau et conservant des millions de documents auxquels ils peuvent accéder instantanément. L'entreprise a fait participer Watson à une émission de questions-réponses américaine, connue pour poser des questions tordues, Jeopardy! Le jeu est bien plus complexe qu'une partie d'échecs : il faut non seulement posséder le savoir humain, mais aussi comprendre les jeux de mots cachés dans les questions. Pourtant, la machine a gagné face à deux champions. Le succès du superordinateur vient du raisonnement probabiliste, qui est la capacité à extraire du sens à partir d'informations incomplètes. Avant le concours, l'ordinateur a été chargé avec des textes provenant d'encyclopédies, de pages web, de travaux de référence et d'anciennes émissions de Jeopardy! Le programme de Watson a été divisé en une centaine de sous-programmes, chacun spécialisé dans un domaine, par exemple les auteurs célèbres. La machine triait l'information conservée par tous ses composants et sélectionnait celle qui avait la plus forte chance d'être correcte. Ces superordinateurs ont une finalité plus sérieuse que de gagner une émission télévisée. IBM projette de les utiliser pour aider les médecins, les entrepreneurs et les agriculteurs en leur fournissant des informations en temps réel.

UN ORDINATEUR AU VOLANT

En 2012, l'état du Nevada a accordé le premier permis pour une voiture automatique. Elle se signale par une plaque d'immatriculation rouge et pleine de symboles. Jusqu'à présent la conduite était réservée aux humains, car elle comprend beaucoup d'inconnues. Il faut par exemple déterminer la vitesse exacte à laquelle arrive une voiture, envisager la possibilité d'un autre véhicule hors du champ de vision ou la réaction des autres conducteurs. Le premier véhicule ayant circulé sans intervention humaine est pourtant plus ancien que ce que l'on pourrait croire. En 1994, deux voitures sans conducteur et bourrées de caméras et d'ordinateurs embarqués ont roulé 1 000 km sur les quatre voies autour de Paris. La conduite en ville, où ont lieu la plupart des trajets, pose bien plus de problèmes aux systèmes dotés d'intelligence artificielle, car dans ces conditions le Code de la route ne suffit pas. Si une voiture automatique respecte à la lettre les règles de priorité dans une intersection, elle n'aura bien souvent jamais la possibilité de passer. Des chercheurs de Google ont donc modifié son comportement, pour qu'elle avance de quelques centimètres au bout d'un

moment, afin de s'imposer. Une autre source d'incertitude est la localisation dans l'espace. Un GPS peut se tromper de plusieurs mètres. Les voitures autonomes utilisent donc simultanément des caméras, un radar et un télémètre laser. Elles combinent leurs données avec celles du GPS, ce qui permet de compenser les imperfections de chaque outil. Sans aller jusqu'aux voitures se conduisant toutes seules, les modèles récents utilisent l'IA pour réguler leur consommation de carburant ou augmenter l'efficacité des freins. Les voitures sans conducteur pourraient-elles se généraliser? Google a fait circuler une flotte de voitures automatiques en Californie. Les véhicules ont parcouru des centaines de milliers de kilomètres sur des quatre-voies comme en ville, sans nécessiter la moindre intervention humaine.

📍 La voiture autonome de l'Université Sandford a gagné la première course sans conducteur.



L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE AU QUOTIDIEN

Sans vous en rendre compte, vous interagissez tous les jours avec l'intelligence artificielle. C'est elle qui dirige vos appels téléphoniques et valide vos achats par carte bancaire. En plus, elle reconnaît vos gestes lors de jeux vidéo ou les visages lorsque vous prenez des photos numériques. Elle peut même aider votre médecin à interpréter les résultats de tests médicaux.

CHASSEURS DE SPAM

« 90 % des mails sont des spams, c'est grâce à des filtres que vous n'êtes pas submergé d'e-mails publicitaires »

Plus de 90 % des mails envoyés sont des spams. Autant dire que si tous se retrouvaient dans votre boîte mail, celle-ci serait ingérable. C'est grâce aux filtres antispam que vous n'êtes pas submergés d'e-mail publicitaire. Ces filtres se basent sur la capacité d'apprentissage des machines. Pour cela, ils retiennent quels types de mails ont été étiquetés ou non comme spam. Différentes caractéristiques aident le programme à décider quelle est la catégorie d'un mail entrant. Ainsi la présence de mots ou de groupes de mots, l'heure

d'envoi ou l'ordinateur émetteur sont autant d'indices. Ensuite, c'est une question de statistiques. Imaginons un message contenant les phrases « bas prix » et « emballage discret ». L'IA va se référer à des statistiques globales, disant que ces phrases apparaissent respectivement dans 8 % et 3 % des spams, contre 0,1 et 0,3 % des messages ordinaires. En appliquant la règle de Bayes, qui calcule la probabilité d'un événement en fonction de l'observation d'événements associés, elle conclut que ce message a 99,9 % de risques d'être un spam. Mais le plus important au sujet des filtres antispam est leur capacité à se mettre à jour. À chaque fois qu'un utilisateur corrige une erreur, par exemple en repêchant un mail de la boîte de courriers indésirables, le système se met à jour automatiquement. Les programmeurs n'ont donc pas besoin de spécifier chaque étape pour identifier un spam. Ils doivent seulement construire un système d'apprentissage général et le soumettre à des exemples de spams et de mails inoffensifs. Le logiciel fait le reste.

TRADUCTEUR UNIVERSEL

En seulement un jour, Google traduit plus de textes que tous les traducteurs professionnels du monde en un an. Il prend en charge 65 langues pour les traduire dans n'importe laquelle des autres possibilités, soit 4 000 combinaisons. Une mission impossible sans un domaine de l'intelligence artificielle, le raisonnement probabiliste. Au départ, les linguistes ont conçu des systèmes de traduction basés sur des dictionnaires bilingues et des règles grammaticales codifiées. Par exemple, l'adjectif vient après le nom en français et avant en anglais. Sauf qu'il y a des exceptions, comme dans la phrase « un beau chien ». Au cours de la dernière décennie, la traduction est passée de règles écrites par des humains à des directives probabilistes, automatiquement apprises à partir d'exemples réels. Les machines traductrices modernes rassemblent d'abord des millions de documents déjà traduits par des humains et présents sur Internet. Même si la traduction automatique n'est pas encore parfaite, elle s'améliore progressivement.



Google travaille sur une application permettant de traduire l'oral. Vous pourrez bientôt parler dans le micro de votre téléphone, laisser l'application traduire ce que vous dites dans la langue de votre choix, et l'envoyer à votre interlocuteur, qui pourra répondre de la même manière.

ÉVOLUTION

La plupart des systèmes d'IA modernes sont trop complexes pour être programmés « à la main ». Une des alternatives est de leur permettre d'évoluer. Les concepteurs construisent une simulation de l'environnement dans lequel fonctionnera le programme, par exemple un désert ou une mare. Ils font fonctionner plusieurs programmes dans cet environnement et mesurent la qualité de leurs décisions. Certains aspects seront rapidement efficaces, tandis que d'autres auront plus de problèmes, ce qui conduira à leur élimination. Des modifications sont effectuées pour prendre en compte les paramètres qui fonctionnent le mieux et le processus recommence. Ce mode de conception rappelle la sélection naturelle. On peut ainsi faire le parallèle entre les modifications d'un paramètre d'un programme et les mutations génétiques. Combiner deux versions pour en produire une troisième fait référence à la reproduction sexuée. C'est pourquoi ce type d'instruction est connu sous le terme d'« algorithmes génétiques ».



Un prototype virtuel de la NASA atteint son but par essais-erreurs.



BACKGROUND: SPL; LEFT: NASA; RIGHT: BOSTON DYNAMICS

Un gros chien utilise l'IA pour escalader les terrains accidentés.

L'INTUITION AIDE LES ORDINATEURS

Parfois, nous prenons des décisions sans savoir clairement ce qui a guidé notre choix. Nous appelons cela « suivre son intuition ». Nous avons tendance à penser que, comme les ordinateurs ne s'embarrassent pas de détails sans importance ni de croyances erronées, ils sont meilleurs. Pourtant, faire appel à l'intuition est bénéfique. Les êtres humains ont deux modes de prise de décision complémentaire : l'une, lente, délibérée et essentiellement rationnelle ; et l'autre, rapide, impulsive et capable de lier une situation présente avec des expériences précédentes pour atteindre rapidement une conclusion. Ce deuxième mode semble être ce qui rend l'intelligence humaine si efficace. La partie rationnelle demande du temps et de l'énergie. Si on devait compter sur elle pour savoir comment réagir face à une voiture qui surgit à l'improviste, la réponse serait certes optimale, mais arriverait trop tard. Ces raccourcis ne sont pas seulement utiles en cas d'urgence. Consacrer trop d'activité cérébrale pour des détails prend du temps et de l'énergie, qui manqueront pour des décisions plus importantes. D'où la question : est-il utile d'incorporer des composantes intuitives à l'intelligence artificielle ? La réponse est oui, puisque la plupart des IA ont désormais deux composantes, une qui réagit instantanément à une situation et l'autre qui utilise un

raisonnement plus délibéré. Certains robots ont été conçus avec une architecture hiérarchique, dans laquelle les niveaux les plus bas sont purement réactifs, et ceux supérieurs inhibent ces réactions et produisent un comportement fixé vers un but. Cette approche est notamment utile pour permettre aux robots munis de jambes de se déplacer en terrain accidenté. De la même manière, doter des robots d'émotions pourrait être utile. Si des robots autonomes pouvaient ressentir de la frustration, ils tenteraient une approche différente après avoir échoué plusieurs fois à réaliser une tâche. Créer des machines qui simulent des émotions est ardu, comme l'a souligné Marvin Minsky, un des fondateurs de l'IA. Les émotions viennent de l'interaction entre plusieurs parties du cerveau et le corps. Pourtant, concevoir un programme d'ordinateur comme s'il était motivé par des émotions aiderait à créer des intelligences plus humaines.

« Si des robots pouvaient ressentir la frustration, ils tenteraient une approche différente après un échec répétitif »

Plus d'un demi-siècle après le début de l'intelligence artificielle, trois éléments permettent de prédire l'invention de machines intelligentes. De nouvelles données en neuroscience guident la conception des logiciels et des équipements. Le développement d'internet donne accès à de nombreuses données. Enfin, l'intelligence artificielle pourra même évoluer toute seule.

LE CERVEAU COMME SOURCE D'INSPIRATION

Pourquoi ne pas copier notre cerveau pour concevoir des machines reproduisant l'intelligence humaine ? Durant la dernière décennie, les recherches en neurosciences ont amélioré nos connaissances sur la façon dont le cerveau stocke et traite l'information. Le cerveau humain se compose d'un réseau de 100 milliards de neurones connectés entre eux par mille fois plus de synapses. La plupart des cellules nerveuses changent d'état dix à

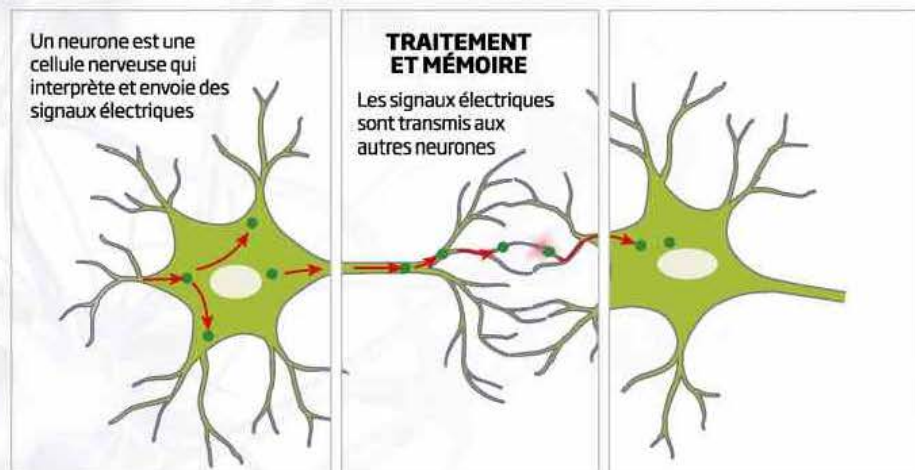
cent fois par seconde. La configuration de notre cerveau nous rend meilleurs pour des tâches comme la reconnaissance d'objets.

Les superordinateurs possèdent quant à eux une mémoire d'environ 100 billions d'octets et peuvent effectuer une opération 100 millions de fois plus vite qu'un humain.

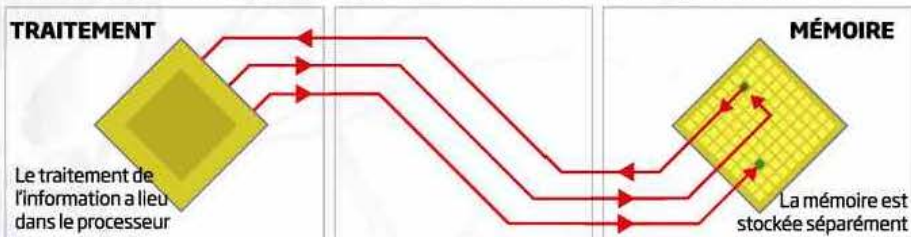
Cette architecture rend les ordinateurs adaptés aux tâches précises et définies. Dans certaines situations, un système semblable au cerveau humain serait bénéfique, malgré l'inconvénient de sa lenteur. Certaines tâches incertaines comme la reconnaissance faciale n'ont pas besoin d'un circuit ultra-précis. Ceci économiserait beaucoup d'énergie. Pour réaliser tous ses traitements de données, le cerveau utilise l'équivalent de 20 W, soit la consommation d'une ampoule électrique. Pour effectuer les mêmes tâches, un superordinateur a lui besoin de 200 000 W. Autre avantage, le cerveau traite l'information au même endroit qu'il la stocke.

Ceci économise du temps et permet d'accomplir plus de tâches en parallèle. Pour ces raisons, des recherches sont en cours pour imiter le cerveau. Les circuits d'ordinateur du futur seront probablement parallèles plutôt qu'en série, analogiques, plus lents, mais consommeront moins d'énergie.

Dans le cerveau des mammifères, le traitement des données et leur mémorisation ont lieu au même endroit, rendant le cerveau meilleur à effectuer plusieurs tâches à la fois.



L'architecture traditionnelle des micro-puces sépare la mémoire du stockage, limitant la vitesse.



De nouvelles architectures, imitant le cerveau, pourraient rendre les puces plus multitâches.



Peter Norvig est directeur de recherche au sein de Google. Il enseigne à l'Université de Californie, qui propose une introduction à l'intelligence artificielle. Il a précédemment dirigé le département des sciences informatiques du centre de recherche de la Nasa, un pionnier dans l'automatisation de la planification et de la détection de défaillances.

LA SUPERINTELLIGENCE EST EN VUE

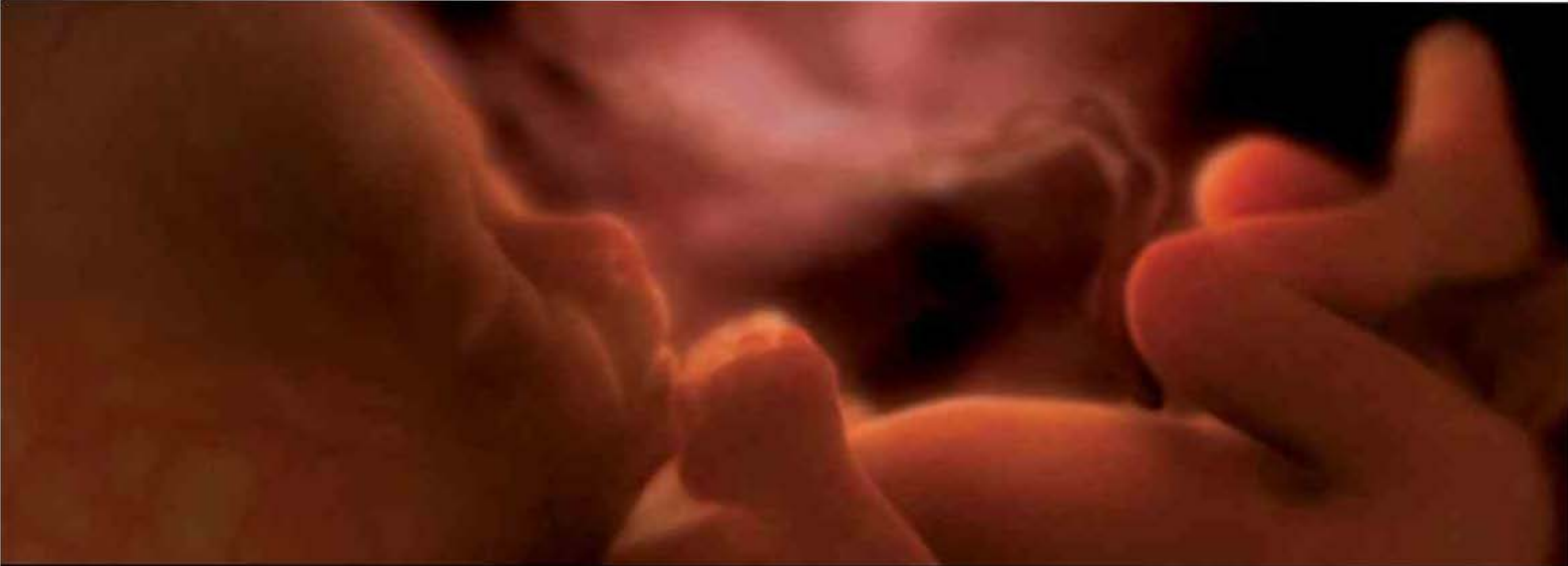
La notion de machine ultra-intelligente, c'est-à-dire qui surpasse l'être humain dans tous les sujets, a été émise par le mathématicien I.J. Good en 1965.

« La première machine ultra-intelligente est la dernière invention que l'homme a besoin de faire », disait-il. En effet, à partir de ce moment, elle pourrait construire d'autres machines encore meilleures sans que l'Homme n'ait rien à faire. Cette perspective a donné naissance à des visions du futur opposées : élimination de l'homme devenu inutile par les machines, comme dans les films *Matrix*, ou futur rempli de loisirs illimités. La technologie a déjà causé des changements sociétaux importants. Il y a 200 ans, la société industrielle a délégué la plupart des travaux manuels aux machines. Puis, en une génération, nous sommes passés à l'ère numérique. Aujourd'hui, nous produisons avant tout de l'information. Les ordinateurs sont omniprésents et la plupart de nos activités manuelles ont été remplacées par des calculs. Même chose pour la robotique. Les robots-aspirateurs font leur apparition. D'ici une décennie, il y aura une explosion de leur utilisation, au bureau comme à la maison.

Peter Norvig, je pense que la dernière invention que nous ayons besoin de faire est le partenariat entre l'Homme et l'outil. De la même manière que les ordinateurs des années soixante-dix ont évolué pour devenir des micro-ordinateurs personnels, la plupart des IA d'aujourd'hui sont passés du statut d'entité autonome à celui d'outils. Ils seront meilleurs à mesure qu'ils deviendront plus intelligents. Ceux-ci seront également bénéfiques pour nous, en nous permettant d'accéder à plus d'informations et d'éducation. Nous nous inquiéterons de la menace de la prise de contrôle des machines dans les films, mais dans la réalité, les humains et leurs outils sophistiqués iront ensemble de l'avant.

RÉFÉRENCES

- *Artificial Intelligence : A Modern Approach* par Stuart Russell et Peter Norvig (Third edition, Prentice Hall, 2009)
- *"Computing Machinery and Intelligence"* par Alan Turing (*Mind*, vol 49, p 433)
- *Machines Who Think* par Pamela McCorduck (First published in 1979. Second edition published in 2004 par A. K. Peters/CRC Press)
- *The Sciences of the Artificial* par Herbert A. Simon (Third edition, 1996, MIT Press)



TOUT **SAVOIR**
SUR...

L'ÉPIGÉNÉTIQUE

Par Adrian Bird et Nolwenn Le Jannic

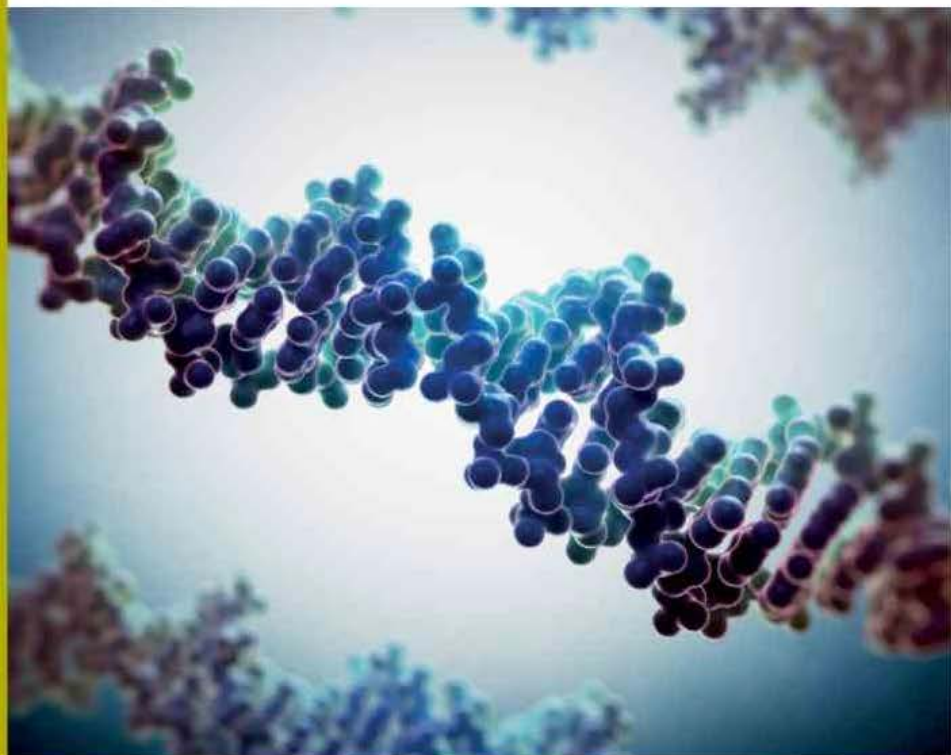
07

RÉSOUTRE LE MYSTÈRE

📌 Ajouter un groupe méthyle à la région contrôle d'un gène revient à l'éteindre pour de bon.

La plupart des mécanismes épigénétiques qui permettent d'activer ou d'inactiver un gène sont des modifications chimiques soit de l'ADN en lui-même, soit des protéines qui le compactent. La première d'entre elles à avoir été découverte est la méthylation, qui consiste à lier à l'ADN une petite

sous-unité chimique (un groupe méthyle). En effet, outre les quatre bases de l'ADN (l'adénine, la cytosine, la guanine et la thymine), les scientifiques ont identifié depuis des dizaines d'années, une cinquième base, la cytosine méthylée. Mais ce n'est qu'à la fin des années 1970 qu'il a été possible de trouver où cette base apparaît dans le génome et les résultats sont étonnants : la méthylation de l'ADN se retrouve un peu partout, mais est en général absente des régions contrôle des gènes. Ces séquences d'ADN se trouvent à proximité des gènes et permettent de les activer ou non. Sauf que si la région contrôle est méthylée, le gène qui en dépend ne peut pas être activé et reste donc silencieux. C'est ce processus de méthylation qui est utilisé pour éteindre l'un des chromosomes X chez les femelles par exemple. Autre découverte importante : les motifs de méthylation de l'ADN sont reproduits lorsque l'ADN est répliqué et donc transmis d'une cellule-mère à ses deux cellules-filles lorsqu'elle se divise. Cette hérédité de cellule à cellule permet d'expliquer pourquoi l'extinction épigénétique des gènes est si stable à travers le temps.

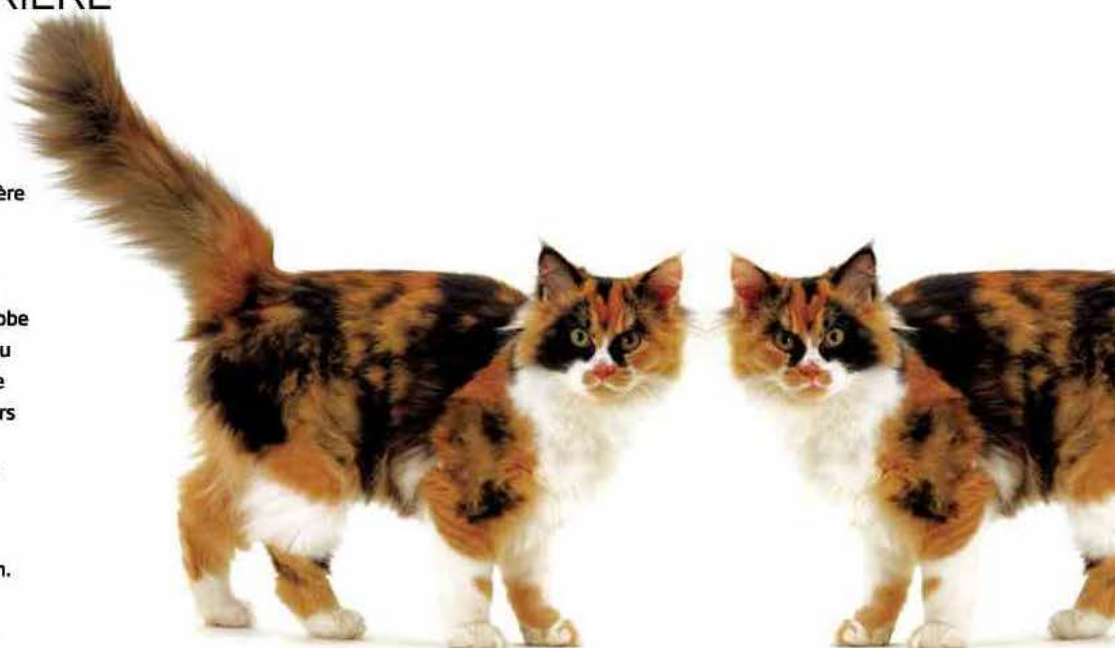


SCIENCE PICTURE CO/SCIENCE FRACTION/CORBIS BRYAN MULLEN/GETTY

QU'Y A-T-IL DERRIÈRE CE MOT ?

L'épigénétique est une jeune science et même la signification du terme en lui-même fait encore débat. Une vue généralement acceptée est qu'il se réfère à des changements héréditaires à l'intérieur d'une cellule et qui n'impliquent pas de modification de la séquence d'ADN. Cette définition englobe les modifications chimiques de l'ADN ou des protéines qui compactent ainsi que d'autres mécanismes, qui n'ont d'ailleurs parfois rien à voir avec l'ADN. Une définition alternative se concentre sur les modifications chimiques de l'ADN et des protéines qui le compactent, que celles-ci soient héréditaires ou non. Les discussions sur la signification de l'épigénétique peuvent être infinies...

PHOTOLIBRARY



L'incroyable révélation eut lieu au XX^e siècle : l'information biologique est enregistrée, lue et répliquée sous forme d'ADN. Nos gènes sont l'équivalent de paquets d'informations écrites sous la forme d'enchaînements, les nucléotides, qui codent pour des protéines, qui à leur tour assurent les fonctions nécessaires à la vie. Lancé en 1990, le projet génome humain n'a été que le début de la quête visant à comprendre le plan architectural du vivant. Les regards se tournent à présent vers l'épigénétique, c'est-à-dire vers l'ensemble des mécanismes moléculaires capables d'augmenter ou de ralentir l'activité des gènes.

☺ La double hélice d'ADN (à droite) n'est pas le seul porteur de l'hérédité. Le pelage des chattes écaillé de tortue (à gauche) vient d'un motif aléatoire d'extinction de gène.



A. BARRINGTON BROWN/SCIENCE PHOTO LIBRARY

PREMIERS INDICES

Dans les années 1950, de nombreux principes sur la façon dont les instructions pour la vie sont codées et transmises entre les générations ont commencé à émerger au sein de la toute jeune science de la génétique. Pourtant, l'hérédité ne semblait pas toujours en suivre les règles. Par exemple, les effets du gène contrôlant la couleur des grains de maïs semblaient parfois disparaître pour réapparaître chez les générations suivantes. Plus tard dans la même décennie, un autre phénomène identique fut observé sur les chromosomes sexuels chez les animaux. Chez les mammifères, les mâles ont un chromosome Y et un chromosome X tandis que les femelles ont deux X. Pour éviter à celles-ci d'avoir cependant une double dose des gènes du chromosome X, l'un des deux chromosomes sexuels est aléatoirement sélectionné dans chaque cellule embryonnaire et désactivé de façon permanente. Ce processus se met en place rapidement lors du développement embryonnaire et se transmet malgré les multiples divisions cellulaires. Cela s'observe facilement chez les chattes avec un pelage écaillé de tortue : le gène qui code pour la couleur des poils se trouve sur le chromosome X, donc les taches de couleur qui composent leur robe viennent du fait qu'un groupe de cellules de la peau a inactivé un chromosome X tandis que le groupe d'à côté a inactivé l'autre. Une version moins évidente de cette extinction de gènes a été découverte quelques années plus tard. Les gènes sont présents en deux exemplaires dans chaque cellule du corps, chaque exemplaire provenant d'un des deux parents. Certains

gènes cependant se comportent différemment en fonction du parent dont ils proviennent. L'exemple classique est le gène qui code la molécule IGF2 (insuline-like growth factor 2), un facteur de croissance chez le fœtus. Or chez celui-ci, le gène de l'IGF 2 hérité du père est activé tandis que celui de la mère est éteint de façon permanente. Mais comment un gène peut-il « savoir » s'il vient du père ou de la mère ? À partir des années 1980, les scientifiques ont commencé à réaliser que ce type de découvertes présentait des points communs et pouvaient être en fait différentes facettes d'un même phénomène. Chacune d'entre elles implique en effet un changement durable dans l'activité d'un gène qui n'a pas de lien avec une mutation de la séquence d'ADN en elle-même. L'ADN est intact, mais quelque chose, au-delà de la génétique, l'empêche d'exercer sa fonction habituelle... C'est la découverte de l'épigénétique.

« Nos gènes sont l'équivalent de paquets d'informations écrites sous la forme d'enchaînements »

INNÉ CONTRE ACQUIS?



Un des aspects les plus controversés de l'épigénétique est la possibilité qu'elle offre à l'environnement d'influencer le corps et les comportements, au-delà des gènes. Il faut cependant garder à l'esprit que la majorité des mécanismes épigénétiques connus répondent à des besoins internes de l'organisme et non à des signaux extérieurs. Il a ainsi été prouvé récemment que le

facteur déterminant le motif de méthylation

de l'ADN est la séquence d'ADN en elle-même, ce qui suggère que les gènes ont bien le dernier mot.

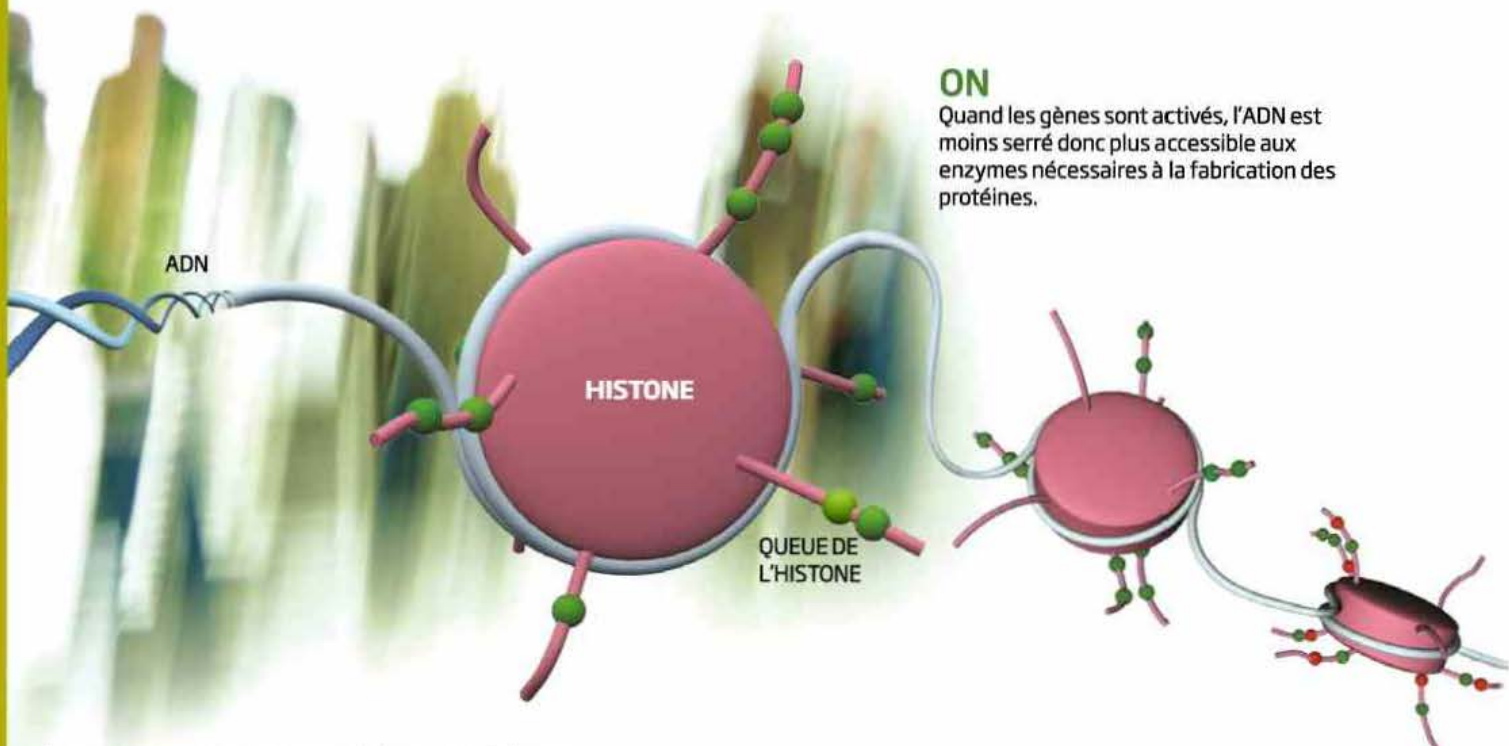
Dans certains cas tout de même, l'environnement influence la méthylation. Le meilleur exemple est d'observer l'effet d'un régime alimentaire particulier chez les souris agouti. Les portées chez ces animaux comprennent des souris avec des pelages allant du jaune au brun foncé, déterminés par le gène agouti. Mais lorsque la mère suit, pendant sa gestation, un régime riche en vitamines et amino-acides méthylés, elle donne naissance à plus de souriceaux bruns. La forte sensibilité du gène agouti à la méthylation est due à un transposon qui se trouve à proximité. Ces courtes séquences d'ADN sont disposées aléatoirement dans le génome. Lorsque la méthylation est faible, le transposon augmente l'expression du gène agouti au-delà du seuil habituel, ce qui donne une souris jaune. Augmenter artificiellement la méthylation en revanche, désactive le transposon et donne des souris brunes. La question reste de savoir si l'environnement peut affecter les mécanismes épigénétiques naturellement... Il est établi que les conditions

durant la grossesse, y compris le régime alimentaire, ont des conséquences à long terme sur la santé des enfants. Par exemple, ceux dont les mères ont été mal alimentées pendant leur grossesse ont plus de risques de développer des maladies cardiaques et du diabète une fois adultes. Des mécanismes épigénétiques pourraient être à l'œuvre derrière ces phénomènes, mais les preuves manquent actuellement. Chez les rats en revanche, il a été possible de prouver l'influence de l'environnement : les petits qui sont négligés par leur mère deviennent des adultes nerveux et peureux, or la mise en place de ce comportement s'effectue grâce à la méthylation de l'ADN d'un gène qui régule la réponse au stress. La justification de ce phénomène pourrait se trouver du côté de l'évolution : la modification épigénétique pourrait viser à préparer les rats délaissés à un environnement difficile en les rendant plus sensibles au danger. Bien sûr, lorsque les conditions s'avèrent finalement favorables, cette stratégie est contre-productive...

Les rats délaissés par leur mère deviennent des adultes plus sensibles au danger. Les souris Agouti (à gauche) ont des épigénomes différents, mais des génomes identiques.



Les modifications épigénétiques permettent d'activer ou de désactiver des gènes en agissant sur le compactage de l'ADN.



ON

Quand les gènes sont activés, l'ADN est moins serré donc plus accessible aux enzymes nécessaires à la fabrication des protéines.

UN PHÉNOMÈNE OMNIPRÉSENT



Outre la méthylation de l'ADN, d'autres mécanismes épigénétiques impliquant des modifications chimiques existent. Ils agissent sur les protéines qui compactent l'ADN et sont non seulement responsables de phénomènes classiques comme la couleur du pelage des chats écaillé de tortues, mais sont également impliqués dans le développement embryonnaire ainsi que dans la régulation des gènes au quotidien... et finalement dans tout ce que « fait » l'ADN. Ces mécanismes offrent de plus une voie d'entrée potentielle pour que le monde qui nous entoure puisse influencer nos gènes, réveillant le vieux débat de l'inné contre l'acquis.

ÉPIGÉNÉTIQUE : MODE D'EMPLOI

« Un des aspects les plus controversés de l'épigénétique est la possibilité qu'elle offre à l'environnement de nous influencer »

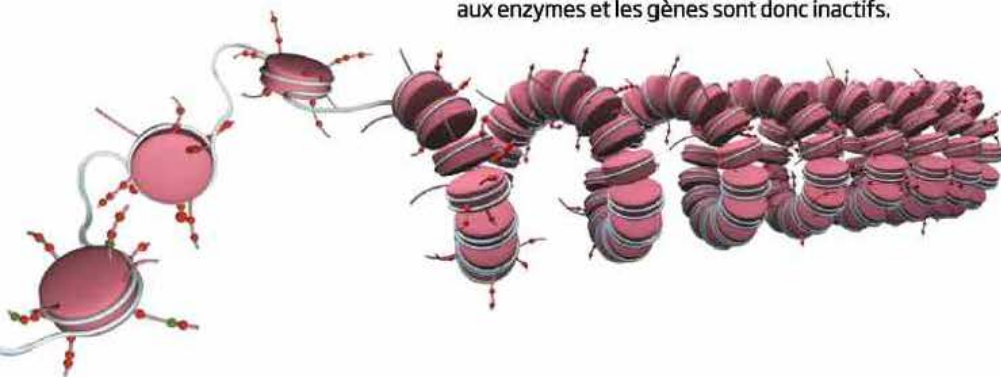
La méthylation de l'ADN a été le premier mécanisme épigénétique découvert dans les années 1970, mais depuis, une foule d'autres modifications chimiques de ce type a été étudiée. Au lieu d'agir sur l'ADN en lui-même, nombre d'entre elles agissent sur les histones. Ces protéines ont pour rôle principal de compacter l'ADN dans les cellules des êtres vivants complexes. La structure ainsi obtenue ressemble à des perles enfilées sur un fil, sauf que l'ADN s'enroule autour des histones au lieu de passer par un trou au milieu (voir le schéma). Les histones ont en plus une longue queue de

GETTY

molécules qui présente de nombreux sites possibles de modifications chimiques. Elles peuvent ainsi être liées à des groupes méthyle, des groupes phosphate, des groupes acétyle ou encore à de petites protéines comme l'ubiquitine. Alors que la méthylation de l'ADN éteint les gènes, celle des histones peut soit augmenter soit empêcher l'activité d'un gène, en fonction de l'endroit où le groupe méthyle est ajouté sur la queue de l'histone. L'acétylation quant à elle active presque toujours les gènes. En tout, une cinquantaine de types de modifications concernant les histones ont été identifiés, et les scientifiques essaient toujours de comprendre leurs effets. Mais comment cela fonctionne-t-il ? D'abord grâce à des enzymes, des types de protéines, spécifiques d'une modification épigénétique (acétylation, méthylation, phosphorylation...) et capables soit de la mettre en place, soit de l'interpréter, soit de l'effacer. Ensuite, il faut savoir que pour qu'un gène soit actif, une autre série d'enzymes doit se lier à l'ADN et fabriquer une molécule intermédiaire : l'ARN messager. Lorsque les premières enzymes installent un marqueur épigénétique sur la queue des histones, cela peut conduire à un compactage plus serré de l'ADN, qui devient inaccessible aux enzymes de fabrication de l'ARN messager et rend donc la « lecture » du gène impossible. À l'inverse, d'autres modifications chimiques déroulent l'ADN afin de le rendre plus « lisible ».

OFF

Quand l'ADN est très compacté, il est inaccessible aux enzymes et les gènes sont donc inactifs.



À TRAVERS LES GÉNÉRATIONS

Les caractères épigénétiques peuvent-ils être transmis de génération en génération ? Chez les plantes, la réponse est oui. Une forme particulière de fleur observée chez certaines plantes dites linéaires se transmet fidèlement entre générations et pourtant la séquence ADN ne semble pas modifiée. Et pour cause : cette spécificité vient en fait de l'extinction d'un gène grâce à la méthylation de l'ADN.

Les preuves d'une telle hérédité chez les animaux sont plus rares, mais elles existent. C'est le cas chez les souris agouti (voir « Inné contre acquis »), dont la couleur du pelage varie de jaune à brun en fonction du niveau de méthylation du gène agouti. Lorsque deux de ces souris de la même couleur se reproduisent, elles donnent naissance à une portée qui comprend les différentes couleurs de pelage, ce qui laisserait croire que les modifications épigénétiques ne sont pas transmises. Mais une analyse minutieuse révèle que les parents jaunes ont plus de souriceaux jaunes que la moyenne ! Ce qui suggère cette fois que les modifications épigénétiques sont transmises, dans une certaine mesure, et bien que ce phénomène disparaisse à la génération suivante.

Et qu'en est-il de l'humain ?

Les conséquences épigénétiques de la famine, de l'abandon ou de la maladie peuvent-elles être transmises ? Une étude a montré que les personnes dont l'un des grands-parents a connu la famine lors de son adolescence meurent plus tôt, en moyenne, si elles sont du même sexe que l'ancêtre en question.

Concrètement, cela pourrait signifier que la famine a modifié l'épigénome et que ces changements se sont transmis sur deux générations. Mais les études de ce type sont statistiques et rétrospectives, ne permettent pas de savoir ce qui se passe au niveau moléculaire ni de séparer le biologique du culturel. Seules les cartographies de l'épigénome permettront d'en savoir plus. L'idée que les caractéristiques acquises durant la vie sont mémorisées grâce à l'épigénétique et transmises à la génération suivante aurait cependant plu à Jean-Baptiste de Lamarck. Ce naturaliste est à l'origine d'une théorie de l'évolution qui prône la transmission de l'acquis entre les générations. Mais s'il est possible que les mécanismes épigénétiques jouent un rôle mineur dans l'évolution, le consensus, supporté par une montagne de preuves, reste que celle-ci procède par sélection naturelle parmi des variations génétiques accidentelles.



🕒 Le jeu des générations : les effets de la culture et de l'hérédité peuvent être difficiles à démêler.

« Les changements épigénétiques chez le fœtus peuvent avoir des conséquences à vie »

ÉPIGÉNÉTIQUE ET MALADIE

Une maladie purement d'origine épigénétique correspondrait à une pathologie où seul l'épigénome est modifié alors que la séquence d'ADN est intacte. Cela est certes dur à prouver (un rôle des mutations de l'ADN est difficile à exclure) et pourtant, certaines maladies semblent remplir ces critères. Ainsi, le syndrome de Beckwith-Wiedemann est un trouble congénital lié au dysfonctionnement du gène codant pour l'IGF2, une molécule qui stimule le développement du fœtus. Normalement, la copie de ce gène héritée du père est exprimée tandis que celle de la mère est « éteinte » par la méthylation de l'ADN. Mais si le gène maternel n'est pas correctement désactivé, une trop grande quantité d'IGF2 conduit à un fœtus trop gros, à des malformations congénitales et à des tumeurs infantiles. Dans de nombreux cas, aucune mutation de l'ADN ne peut être détectée et le risque d'apparition de la maladie dans les familles touchées est plus faible que si une véritable mutation génétique en était à l'origine. Certains syndromes de Beckwith-Wiedemann ont donc sans doute une origine épigénétique.

DES EFFETS DE GRANDE ENVERGURE

Puisque les modifications épigénétiques des gènes peuvent être profondes et durables, il est probable qu'elles aient une influence sur la santé. Jusqu'ici, des erreurs de programmation épigénétique ont été liées à quelques maladies congénitales et à certains cancers. Mais une question subsiste : la susceptibilité épigénétique à une maladie peut-elle passer de génération en génération ?

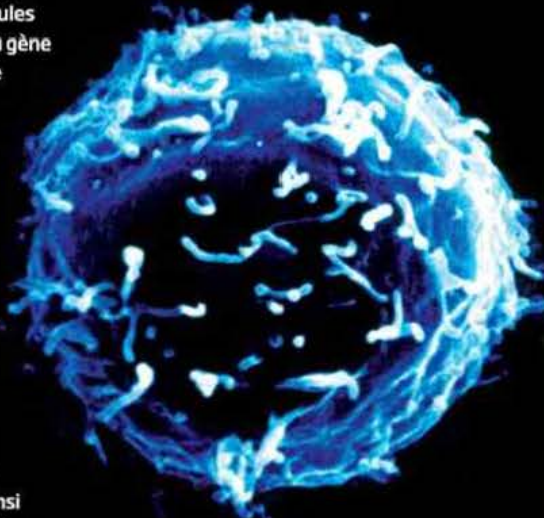
Les technologies d'aide à la reproduction comme la fécondation *in vitro* (FIV) semblent par ailleurs augmenter légèrement les probabilités de l'apparition du syndrome de Beckwith-Wiedemann et d'autres troubles liés à l'extinction de gènes. Comme il existe également un taux élevé de problèmes de ce type chez les animaux clonés, cela suggère qu'il pourrait y avoir des périodes critiques lors des premiers stades du développement embryonnaire durant lesquelles un environnement modifié pourrait engendrer des erreurs épigénétiques.

Les dysfonctionnements épigénétiques sont en outre impliqués dans une des causes de décès les plus fréquentes : le cancer. En effet, quand les cellules sont libérées du mécanisme qui les empêche normalement de se diviser, elles se mettent à proliférer et forment des tumeurs. Il est avéré que des mutations génétiques sont la principale cause de ce phénomène, mais les scientifiques ont également découvert que la méthylation de l'ADN pouvait être impliquée.

Par exemple, le gène *MLH1*, qui code une protéine permettant de réparer les dégâts sur l'ADN, est

souvent muté dans les cas de cancer du côlon. Mais parfois, il est simplement éteint et ne semble pas porter de mutation. Les médicaments capables d'éliminer la méthylation de l'ADN permettent d'ailleurs de réactiver le gène *MLH1* dans les cellules cancéreuses, ce qui prouve que celui-ci n'est pas intrinsèquement défectueux, mais qu'il a été éteint par une modification épigénétique. De plus, certaines mutations de l'ADN à l'origine de cancer entraînent des changements épigénétiques secondaires en altérant la mécanique épigénétique. Ainsi, certains cancers qui touchent les cellules sanguines affichent une mutation du gène *TET2*. Celui-ci code pour une protéine qui permet de supprimer la méthylation de l'ADN, empêchant ainsi l'extinction accidentelle d'un gène. Mais en l'absence de *TET2*, les niveaux de méthylation sont trop élevés et des gènes essentiels sont désactivés. Finalement, la meilleure preuve de l'importance de l'épigénétique dans le cancer est que les médicaments qui ciblent ces mécanismes peuvent être des agents anticancéreux efficaces. La décitabine, une molécule capable d'enlever les groupes méthyle, est ainsi utilisée avec succès pour traiter certaines leucémies. Et s'il pouvait paraître dangereux de perturber les signaux épigénétiques dans le corps tout entier, les cellules cancéreuses sont en fait éliminées avec des doses de médicament relativement faibles, ce qui

laisse penser que l'épigénétique pourrait être le talon d'Achille de certains cancers. De nombreux médicaments de ce type sont actuellement à l'étude et constituent certainement une approche thérapeutique prometteuse dans la lutte contre le cancer. Quant aux autres maladies d'origine épigénétiques encore inconnues pour le moment, elles devraient être découvertes dans les années à venir, puisque de grands projets de cartographie de l'épigénome sont en cours dans ce but.



Les modifications épigénétiques sont le talon d'Achille de certains cancers comme la leucémie.



Adrian Bird est membre du Wellcome Trust Centre pour la biologie cellulaire et dirige la chaire de génétique à l'université d'Édimbourg (Royaume-Uni). Ses recherches concernent la biologie et l'importance médicale de la méthylation de l'ADN et des autres mécanismes épigénétiques. Son laboratoire a été le premier à identifier les motifs de méthylation de l'ADN chez un vertébré.

REVENIR AUX BASES

L'épigénétique a largement dépassé la biologie et est devenu à la mode chez les sociologues, les psychiatres et même les politiciens. Elle est parfois perçue comme une nouvelle science, une version moderne de la génétique et qui remplace la vieille idée selon laquelle les humains sont programmés par leurs gènes. Selon ce paradigme, les marqueurs épigénétiques, contrairement à l'ADN avec lequel nous sommes coincés à vie, peuvent être modifiés et il est facile d'imaginer pouvoir le faire à l'aide de médicaments par exemple.

Ces idées sont attirantes, mais les preuves pour les supporter ne sont pas concluantes. En revanche, ce que nous savons, c'est que les marqueurs épigénétiques servent essentiellement à consolider les motifs existants de l'activité des gènes. Cela signifie qu'ils n'allument ou n'éteignent pas les gènes, mais qu'ils renforcent leur statut, augmentant ainsi l'efficacité du génome. Concrètement, les gènes déjà actifs sont « lubrifiés » pour mieux s'exprimer, tandis que les gènes déjà silencieux sont « fermés à double tour ». Si notre environnement

influencerait notre épigénome, cela se ferait d'abord en agissant sur les facteurs de transcription, qui sont eux capables d'activer ou de désactiver des gènes, et les modifications épigénétiques qui apparaîtraient ne seraient que destinées à consolider ce premier processus.

En attendant de pouvoir vérifier cela, nous en savons déjà assez pour affirmer que les mécanismes épigénétiques ont une grande importance sur le plan médical. Des médicaments ciblant ces processus arrivent sur le marché, de nombreux autres sont en développement, et nous allons découvrir ce que la modification de l'efficacité du génome à travers le corps tout entier peut apporter... et évaluer ainsi réellement le potentiel de l'épigénétique.

RÉFÉRENCES

- *The Epigenetics Revolution : How Modern Biology is Rewriting Our Understanding of Genetics, Disease and Inheritance* par Nessa Carey (Icon Books, 2012)
- "Transgenerational epigenetic inheritance : More questions than answers" *Genome Research*, vol 20, p 1623



TOUT **SAVOIR**
SUR...

LE CERVEAU HUMAIN

Par Michael O'Shea et Clémence Gueidan

08

CÂBLÉS POUR PENSER

En explorant l'anatomie des neurones au XIX^e siècle, Santiago Ramón y Cajal émis l'hypothèse selon laquelle les signaux parcourent les neurones dans un seul sens. Le corps de la cellule et ses projections, appelées dendrites, reçoivent des informations en provenance d'autres cellules qui sont ensuite transportées le long de la fibre nerveuse, l'axone, jusqu'à la synapse, où le message est transmis au neurone suivant (voir diagramme, droit). Nous savons désormais que les messages sont transmis à travers de brèves impulsions électriques appelées potentiels d'action (PA). Ces PA ne durent que quelques centaines de secondes, mais ils peuvent parcourir d'importantes distances pendant ce laps de temps, atteignant une vitesse de 120 mètres par seconde. Le voyage de l'impulsion nerveuse se termine lorsqu'elle parvient à la synapse, déclenchant alors le relâchement de molécules appelées neurotransmetteurs qui vont transmettre le signal

au neurone suivant en se fixant à sa surface. Leur effet peut être soit excitateur, afin que ce nouveau neurone envoie son propre signal, soit inhibiteur, en le rendant temporairement moins réactif à d'autres signaux reçus. La complexité du réseau qui en découle est stupéfiante.

Nous possédons environ 100 milliards de neurones dans notre cerveau, dotés chacun de 1 000 synapses. Il en résulte 100 000 milliards d'interconnexions. Si nous commençons à les compter au rythme d'une par seconde, nous y serions encore dans 30 millions d'années.

Les neurones comptent parmi les cellules les plus diversifiées du corps humain, bien qu'elles partagent toutes les mêmes caractéristiques de base.



MOTEUR

Envoie des signaux à des parties du corps, comme les muscles, pour diriger un mouvement



INTER

Fournit une connexion entre d'autres neurones



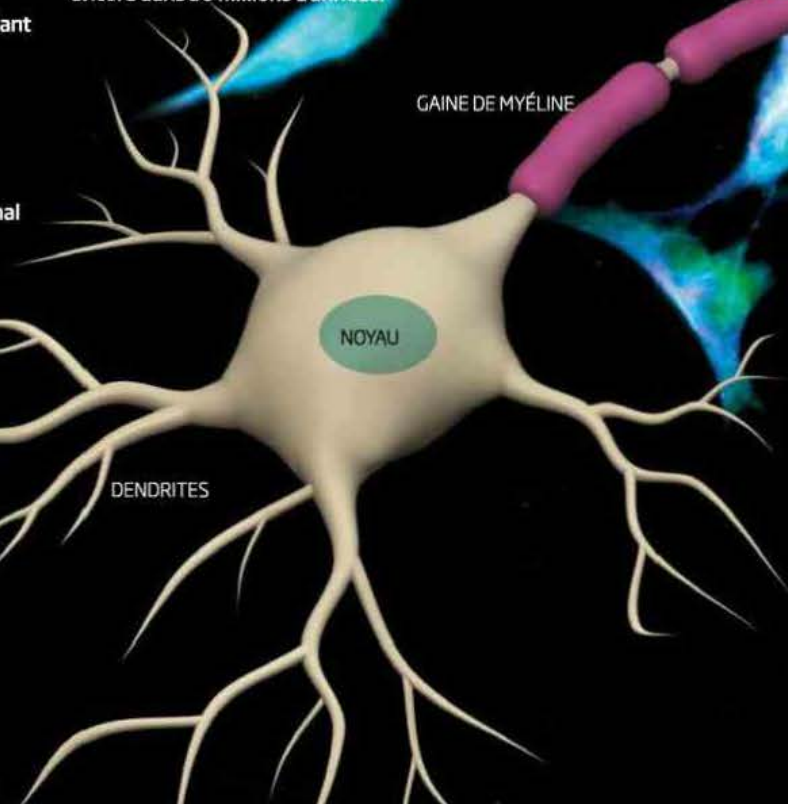
SENSORIEL

Transmet des signaux au cerveau à partir du reste du corps



PYRAMIDAL

Impliqué dans de nombreuses aires de la cognition, comme la reconnaissance d'objet dans le cortex visuel



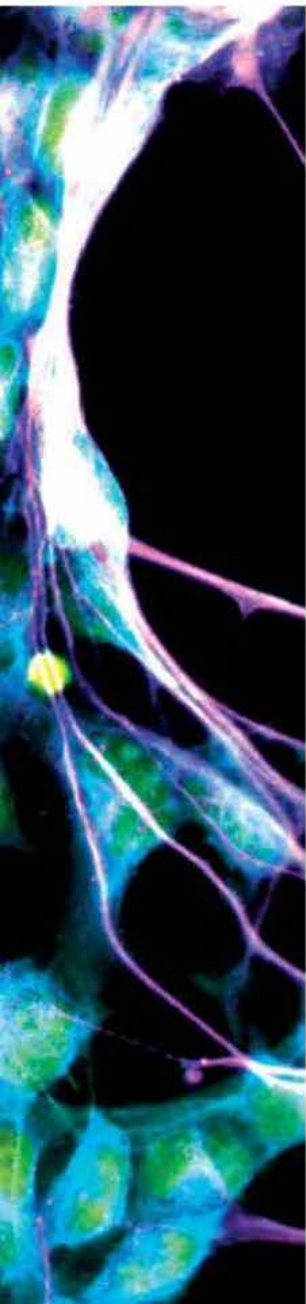
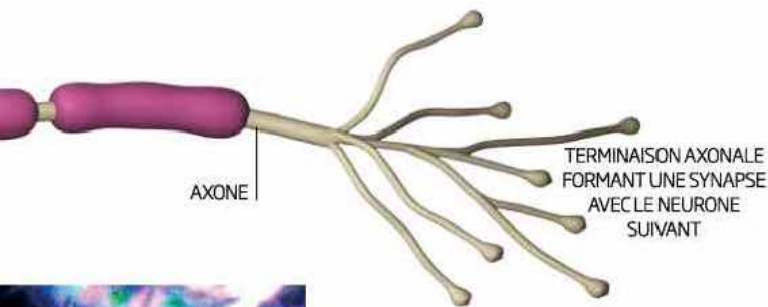
LE CERVEAU PLASTIQUE

À la différence des composants électroniques d'un ordinateur, nos réseaux de neurones sont flexibles : une catégorie particulière de neurotransmetteurs, des neuromodulateurs, est capable de modifier la quantité d'autres neurotransmetteurs relâchés par une synapse et le degré de réponse des neurones aux signaux entrants. Certaines de ces modulations aident à régler finement l'activité cérébrale en réponse à des événements immédiats. D'autres

recablent le cerveau à long terme, ce qui expliquerait comment nos souvenirs sont stockés. De nombreux neuromodulateurs agissent seulement sur quelques neurones, mais il en existe qui sont capables de pénétrer de larges pans de tissu cérébral, créant des changements radicaux. À travers les actions d'une multitude de transmetteurs et de modulateurs chimiques, le cerveau est constamment en train de changer, nous permettant de nous adapter au monde qui nous entoure.

LE CERVEAU À TRAVERS L'HISTOIRE

Il y a environ 250 000 ans, des animaux dotés d'une capacité à penser sans précédent sont apparus dans les savanes africaines. Ces créatures conscientes furent assez intelligentes pour commencer à s'interroger sur les origines de leur propre intelligence. Aujourd'hui, nous commençons tout juste à obtenir des réponses, mais cela n'a pas été sans encombre.



LES DÉBUTS

La naissance des neurosciences a commencé avec Hippocrate il y a quelque 2500 ans. Alors que ses contemporains, Aristote inclus, pensaient que l'esprit résidait dans le cœur, Hippocrate affirma que le cerveau était le siège des pensées, des sensations, des émotions et de la cognition. C'était un pas monumental, mais une compréhension plus profonde de l'anatomie et du fonctionnement du cerveau prit bien plus de temps.

Au II^e siècle, le physicien Claude Galien, pensait que le cerveau humain possédait trois ventricules, des cavités remplies de fluides, et que chacun était responsable d'une faculté mentale différente : l'imagination, le raisonnement et la mémoire. Selon sa théorie, le cerveau contrôlait les activités de notre corps en envoyant les fluides depuis les ventricules jusqu'aux autres organes grâce aux nerfs. L'autorité de Galien était telle que cette idée continua à largement

⬇ Santiago Ramón y Cajal est considéré par beaucoup comme le père des neurosciences modernes.



CAJAL LEGACY. INSTITUTO CAJAL. MADRID, SPAIN. SPIL

dominer jusqu'au XVII^e siècle malgré une faille majeure : un fluide ne peut pas se déplacer assez rapidement pour expliquer la rapidité de nos réactions. En étudiant et en décrivant la structure du cerveau de manière de plus en plus précise, une nouvelle génération d'anatomiste finit par s'intéresser aux tissus cérébraux solides. C'est le cas du docteur britannique Thomas Willis qui, au XVII^e siècle, y voyait la clé pour comprendre comment le cerveau fonctionnait. 100 ans plus tard, Luigi Galvani et



PETER MACDIARMID/GETTY

Alessandro Volta montrèrent qu'une source externe d'électricité pouvait activer les nerfs et les muscles. Mais ce ne fut qu'au XIX^e siècle que le physiologiste allemand Émile du Bois-Reymond confirma que les nerfs et les muscles eux-mêmes généraient des impulsions électriques. À l'aube du XX^e siècle, les travaux spectaculaires de l'anatomiste espagnol Santiago Ramón y Cajal révélèrent que les neurones constituaient la pierre angulaire du cerveau. Il observa notamment que les neurones des insectes rivalisent voire dépassent en complexité les cellules cérébrales humaines. Cela suggère que nos capacités dépendent de la manière dont les neurones sont connectés et pas seulement de leurs caractéristiques intrinsèques. La vision 'connexioniste' de Cajal ouvrit la porte à une nouvelle manière de réfléchir au traitement de l'information dans le cerveau et c'est toujours celle-ci qui domine aujourd'hui.

“Couper le pont entre les deux hémisphères du cerveau peut diviser le “soi”, comme si le corps était contrôlé par deux cerveaux indépendants »

MÉSENCÉPHALE

Le mésencéphale (ou cerveau moyen) joue un rôle dans un grand nombre de nos actions physiques. La substance noire est une de ses structures centrales. On l'appelle ainsi parce qu'elle est une riche source de dopamine, un neurotransmetteur qui devient noir dans les tissus post-mortem. Cette molécule est essentielle pour le contrôle des mouvements, mais est également le neurotransmetteur de la « récompense », nécessaire dans de nombreuses formes d'apprentissage, dans les comportements compulsifs et l'addiction. Les autres régions du mésencéphale sont impliquées dans l'audition, le traitement des informations visuelles, le contrôle des mouvements des yeux et la régulation de l'humeur.

PROSENCÉPHALE

Beaucoup de nos capacités strictement humaines émergent dans le prosencéphale (ou cerveau antérieur), qui s'est développé rapidement pendant l'évolution de nos ancêtres mammifères. Il inclut le thalamus, une station relais qui dirige les informations sensorielles vers le cortex cérébral pour un traitement de plus haut niveau, l'hypothalamus, qui relâche des hormones dans le flux sanguin pour qu'elles soient distribuées dans le reste du corps, l'amygdale, qui est impliquée dans les émotions et l'hippocampe, qui joue un rôle majeur dans la formation de la mémoire spatiale. Parmi les parties les plus récemment évoluées, on trouve les ganglions de la base, qui régulent la vitesse et la finesse des mouvements intentionnels initiés par le cortex cérébral. Les connexions dans cette région sont modulées par la dopamine, fournie par la substance noire du mésencéphale.

Une déficience dans cette source est associée à plusieurs symptômes de la maladie de Parkinson, comme la lenteur des mouvements, les tremblements et les troubles de l'équilibre. Enfin, il y a le cortex cérébral, le siège de notre intelligence

créative, de notre imagination et de notre conscience. C'est là que nous élaborons des plans, que les mots se forment, que les idées sont générées.

Structurellement, le cortex est une feuille de tissu constitué de six couches plissées repliées à l'intérieur du crâne. S'il était mis à plat, il recouvrirait plus de 1,6 mètre². Les informations entrent et sortent du cortex à travers des millions de neurones, mais il possède plus de 10 milliards de connexions internes. En clair, le cortex passe le plus clair de son temps à se parler à lui-même.

Chaque hémisphère cortical possède quatre lobes principaux. Les lobes frontaux hébergent les circuits neuronaux pour la pensée et la planification, et sont également considérés comme responsables de notre personnalité individuelle. Les lobes occipitaux et temporaux sont principalement concernés par le traitement respectif des informations visuelles et auditives. Enfin, les lobes pariétaux sont impliqués dans l'attention et l'intégration des informations sensibles. Nous possédons plusieurs 'cartes' de notre corps reflétant sa structure dans le cerveau. Ainsi, les neurones qui traitent les sensations provenant de nos pieds sont plus proches de ceux concernés par les sensations de nos jambes que de ceux liés à notre nez par exemple. Les proportions sont toutefois distordues, avec plus de tissu cérébral

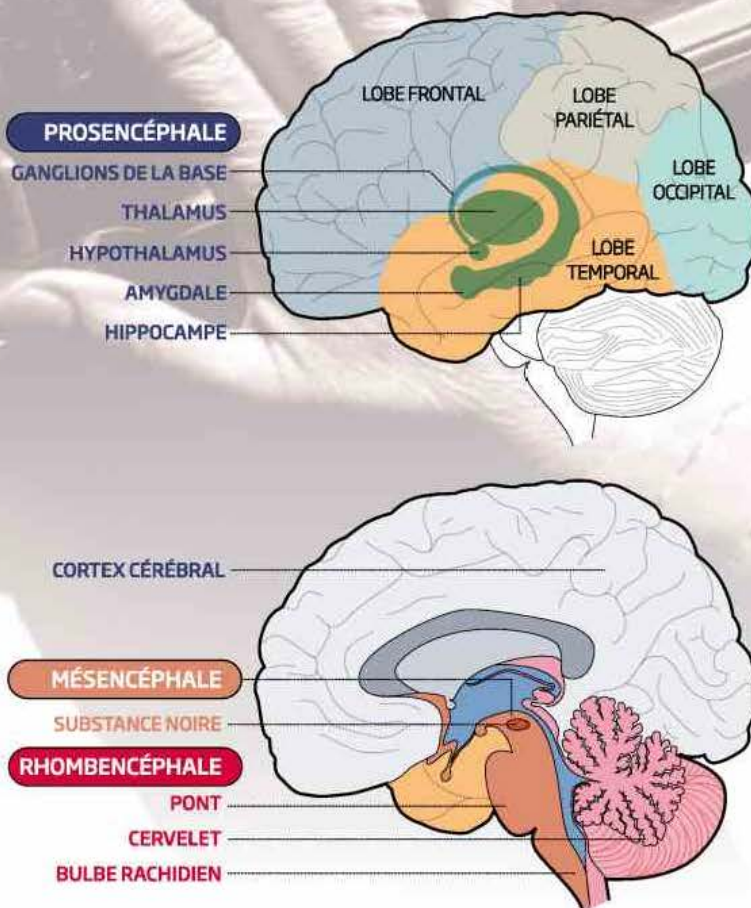
dédié aux mains et aux lèvres qu'au torse ou aux jambes. Redessiner le corps pour représenter ces cartes donne des personnages grotesques comme l'homuncule de Penfield (à gauche).

Le pont de communication entre les deux hémisphères cérébraux est un ensemble de fibres composé d'un million d'axones, appelé corps calleux. Couper ce pont, une procédure parfois employée pour atténuer des crises épileptiques, peut diviser la manifestation unifiée du 'self'. C'est comme si le corps était contrôlé par deux cerveaux pensants de manière indépendante. Si différentes tâches sont gérées par différentes régions corticales, un mystère demeure : comment le cerveau parvient-il à combiner ces tâches fragmentées pour créer une perception unifiée sans même que nous en ayons conscience ? C'est ce qu'on appelle 'le problème de liaison', l'un des plus grands défis pour les scientifiques de demain.



CARTOGRAPHIER LE CERVEAU

Nos milliards de neurones, liés par des milliers de milliards de connexions neuronales, constituent l'organe le plus complexe du corps humain. Les tentatives pour comprendre son architecture ont commencé par l'étude des personnes présentant des dommages cérébraux. Un dommage localisé induit des déficiences très spécifiques concernant des compétences particulières, comme le langage ou le calcul. Cela suggère que notre cerveau est modulaire, avec différentes zones responsables de différentes fonctions mentales. En permettant aux chercheurs de scruter des cerveaux sains de volontaires réalisant différentes tâches cognitives, les techniques d'imagerie récentes ont débouché sur une approche plus détaillée et nuancée.



RHOMBENCÉPHALE

Le rhombencéphale (ou cerveau postérieur) est situé à la base du crâne, juste derrière le cou. Il s'agit de la première structure cérébrale à avoir évolué. Chez les humains, il est constitué de trois structures : le bulbe rachidien, le pont et le cervelet.

Le bulbe rachidien est responsable de beaucoup des comportements automatiques qui nous maintiennent en vie, comme la respiration, la régulation de notre rythme cardiaque et la déglutition. Ses axones se croisent de part en part du cerveau en descendant vers la moelle épinière, ce qui explique pourquoi chaque moitié du cerveau contrôle la partie opposée du corps. Un peu plus haut se trouve le pont, qui contrôle également des fonctions vitales comme la respiration, le rythme cardiaque, la pression sanguine et le sommeil. Il joue aussi un rôle important dans le contrôle des expressions faciales et dans la réception d'informations concernant les mouvements et l'orientation du corps dans l'espace.

Le cervelet, la partie la plus importante du rhombencéphale, présente une surface ridée avec de profondes fissures. Il est approvisionné en informations sensorielles à propos de la position et des mouvements du corps, et peut encoder et mémoriser les informations nécessaires pour réaliser correctement des mouvements fins et complexes.

NEURONES MIROIRS

Plusieurs neuroscientifiques pensent que la découverte des « neurones miroirs » va transformer notre compréhension de l'esprit et du cerveau humain, tout comme l'ADN a transformé la biologie évolutive.

Ils pourraient potentiellement aider à démystifier les plus humaines de nos qualités comme l'empathie.

Mais que sont ces fameux neurones miroirs ? Leur caractéristique est qu'ils s'activent à la fois lorsque nous réalisons une action comme attraper une tasse de café, et lorsque nous voyons quelqu'un faire la même chose. Cela suggère qu'ils incluent une compréhension de la signification ou des intentions des actions des autres, et nous permettent à travers un mécanisme similaire de saisir leurs émotions. Des chercheurs ont également suggéré une implication de ces cellules particulières dans le langage. Selon leur théorie, le langage humain est issu de gestes physiques et à l'origine, les neurones miroirs étaient là pour nous aider à traduire le sens de ces gestes.

UN ORDINATEUR CONSCIENT

« La conscience est un phénomène fascinant, mais insaisissable » écrivait Stuart Sutherland, de l'université du Sussex à Brighton (Royaume-Uni). « Il est impossible de spécifier ce qu'elle est, ce qu'elle fait, ou pourquoi elle est impliquée. Il n'y a rien d'écrit à ce sujet qui vaille la peine d'être lu. » En effet, personne jusqu'à présent n'a été capable de déterminer comment la conscience émerge de notre cerveau. Pour tenter d'y voir plus clair, les scientifiques essayent de créer des robots dotés de cerveaux artificiels et capables de pensée consciente et de compréhension. En construisant des modèles de réseaux neuronaux à large échelle, ils espèrent capter la signature de la cognition humaine.

Le projet Semantic Pointer Architecture Unified Network (SPAUN), par exemple, consiste en 2,5 millions de neurones artificiels. Des articles suggèrent qu'il est capable de réaliser des tâches du type de celles qui contribuent à la cognition humaine. Il peut notamment reconnaître des images visuelles, obtient de bons résultats dans une variété de tâches de mémoire et a même passé un test de QI.

DÉCODER LES SENS

Comment les neurones encodent-ils l'idée de quelque chose, de manière à ce que nous puissions immédiatement reconnaître un visage familier, notre maison ou notre livre préféré ? La plupart des neuroscientifiques pensent que le stockage des concepts relatifs aux objets s'effectue dans plusieurs neurones. Ces derniers doivent travailler ensemble pour reconnaître un objet donné. Selon cette théorie, l'activité d'un neurone seul n'est donc pas représentative d'un objet particulier. C'est plutôt le comportement du groupe qui détermine quel sens vient à l'esprit.

Certains neuroscientifiques affirment toutefois que nous pouvons encoder des concepts en utilisant des réseaux de neurones plus petits et plus sélectifs. Selon ce point de vue, un neurone peut parfois se spécialiser dans une idée unique. Des chercheurs ont par exemple découvert qu'un des neurones qu'ils étudiaient répondait



à beaucoup de photos différentes de l'actrice Jennifer Aniston. D'après leur théorie, c'est presque comme si ces neurones isolés encodent d'une certaine manière l'essence d'une personne ou d'un objet. Cela pourrait expliquer pourquoi nous pouvons reconnaître des choses à partir de différents points de vue ou dans un environnement qui n'est pas familier.

Est-ce que cette photo active votre neurone dédié à Jennifer Aniston ?

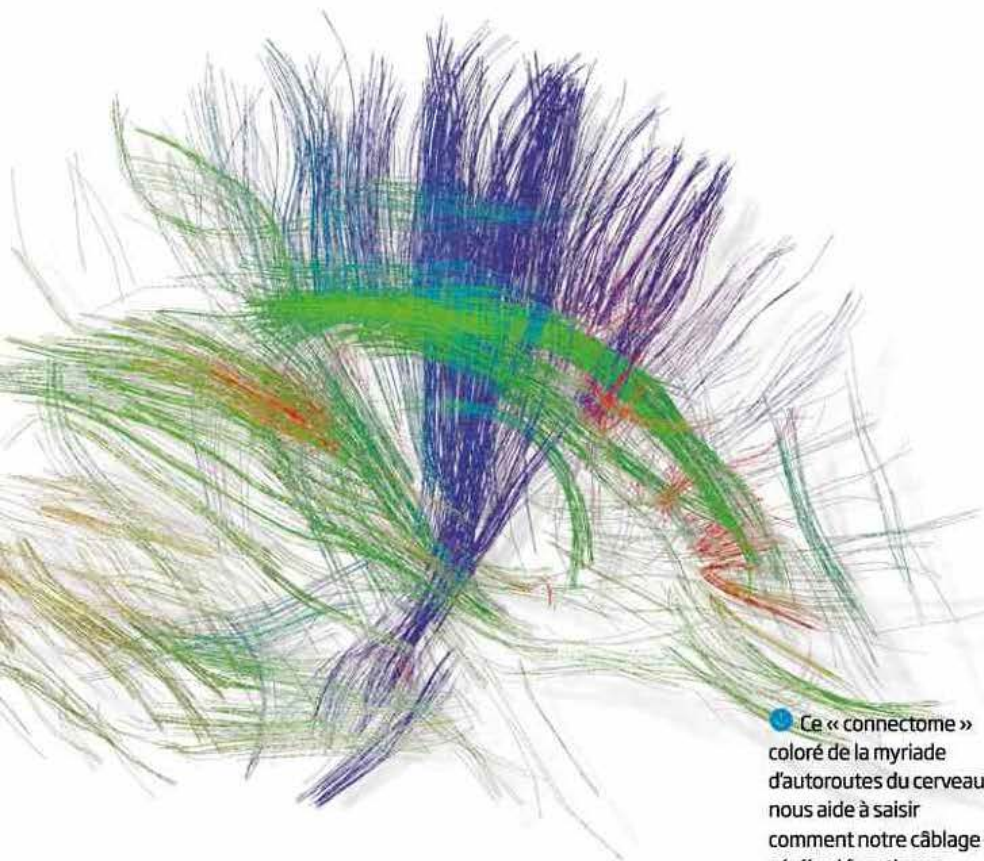
« Le réseau de neurones artificiels SPAUN a même passé un test de QI humain »



STARNAX/XPOSURE, LABORATORY OF NEUROIMAGING AT UCL AND MARTINOS CENTER FOR BIOMEDICAL IMAGING AT MGH CONSORTIUM OF THE HUMAN CONNECTOME PROJECT; RAY DEEPRESCALLERY STOCK

À LA RECHERCHE DE L'ESPRIT HUMAIN

Presque 2500 ans après qu'Hippocrate ait considéré le cerveau comme le centre de nos pensées, nous pouvons maintenant l'explorer grâce aux technologies modernes. Le but ultime est de saisir comment cet organe génère notre esprit conscient. Nous en sommes encore loin, mais nous commençons à venir à bout de nombreux problèmes insolubles jusque-là.

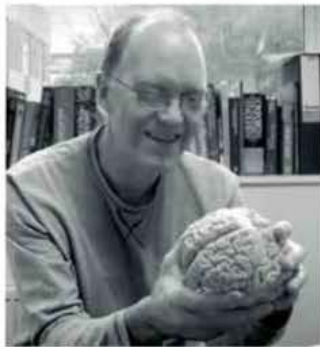


❖ Ce « connectome » coloré de la myriade d'autoroutes du cerveau nous aide à saisir comment notre câblage cérébral fonctionne.

DONNER UNE VUE D'ENSEMBLE

Certains neuroscientifiques veulent utiliser des techniques d'imagerie sophistiquées pour dessiner une carte des connexions cérébrales. Le Human Connectome Project vise ainsi à détailler toutes les longues connexions axonales dans le cerveau humain sain, avec l'aide de 1 200 volontaires. Comparer les connexions entre des paires de vrais et de faux jumeaux devrait permettre de découvrir comment les gènes et l'environnement contribuent chacun à façonner nos circuits cérébraux. Un autre projet tout aussi ambitieux retracera l'expression des gènes à la fois dans des cerveaux en développement et des cerveaux adultes. Les différences entre les neurones sont déterminées par la manière dont nos gènes s'expriment. Comme les propriétés d'un neurone changent pendant le développement, le vieillissement, la formation de souvenirs ou la maladie, l'expression des gènes est elle aussi modifiée. Le projet Human Brain Transcriptome permettra ainsi de comprendre les détails les plus fins des rouages de notre cerveau.





Michael O'Shea est professeur de neurosciences et directeur du Centre for Computational Neuroscience and Robotics à l'Université du Sussex au Royaume-Uni. Il est l'auteur du livre « Le Cerveau : une très courte introduction » (Oxford University Press, 2005).

POUVONS-NOUS RÉELLEMENT COMPRENDRE L'ESPRIT ?

La réponse à cette question pourrait être humiliante. Considérez, par exemple, le point de vue du physicien Prix Nobel de la paix Erwin Schrödinger sur le problème de la limitation des connaissances. À propos de nos tentatives pour comprendre les interactions moléculaires dont dépend la vie, il écrit : « c'est une merveille – dont une seule est plus grande ; une qui, si elle y est intimement connectée, se situe pourtant sur un plan différent. Je parle du fait que nous, dont l'être est entièrement basé sur une merveilleuse interaction de ce type, possédons en outre le pouvoir d'acquérir une connaissance considérable à ce propos. Je pense qu'il est possible que cette connaissance puisse aboutir à une connaissance complète – de la première merveille. La seconde pourrait demeurer bien au-delà de la compréhension humaine ». Mais sommes-nous réellement au-delà des capacités de compréhension du cerveau lorsque nous tentons de comprendre l'esprit conscient ? La physique actuelle

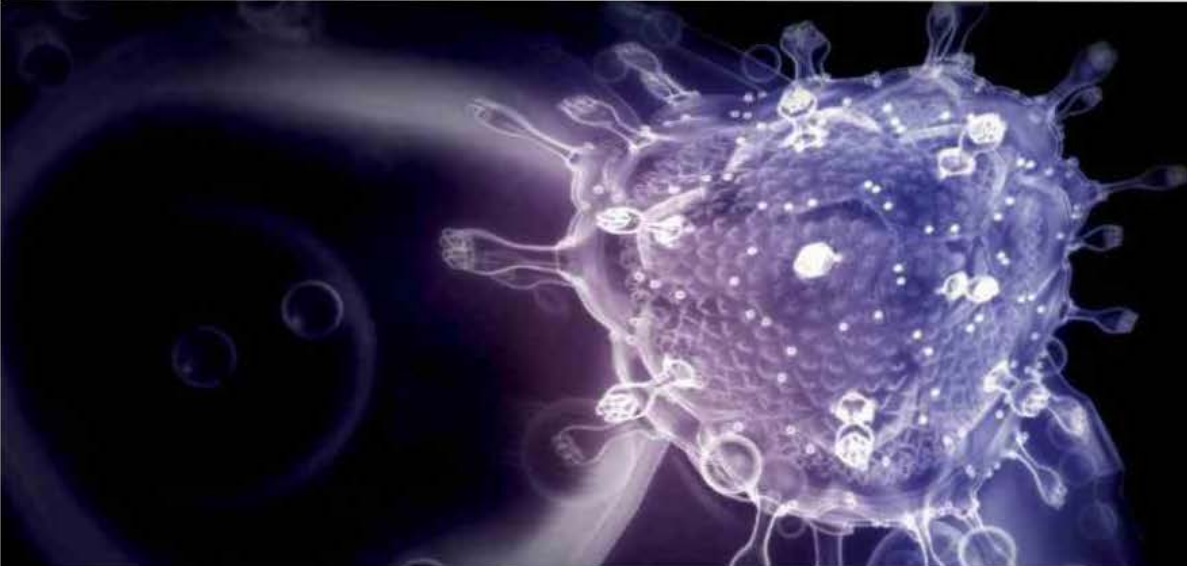
est incomplète. Nous avançons donc effectivement à tâtons dans l'obscurité, mais nous pouvons espérer que les nouvelles lois de la physique nous apporteront l'éclairage qui nous manque.

RÉFÉRENCES

- *Principles of Neural Science* (5th edition) par Eric Kandel et coll. (McGraw-Hill Medical, 2012)
- *The Brain : A very short introduction* par Michael O'Shea (Oxford University Press, 2005)
- *Shadows of the Mind : A search for the missing science of consciousness* par Roger Penrose (Oxford University Press, 1994)
- *The Astonishing Hypothesis : The scientific search for the soul* par Francis Crick (Scribner Book Company, 1994)

SITES INTERNET

- Sackler Centre for Consciousness Science : sussex.ac.uk/sackler
- The Society for Neuroscience – Brain Facts : bit.ly/W3CKIQ
- Large-scale human brain projects : humanconnectomeproject.org and humanbrainproject.eu/files/HBP_flagship.pdf



TOUT **SAVOIR** SUR...

LE SIDA

Par Elizabeth Pisani et Esther Leburgue

09

AVANT LE SIDA



Le séquençage de l'ADN éclaire la façon dont le VIH (virus de l'immunodéficience humaine) s'est propagé. La souche VIH-1, la plus répandue, provient d'un virus qui frappe les chimpanzés d'Afrique centrale. Le plus ancien échantillon a été récolté en 1959 à Léopoldville, alors capitale du Congo belge. Son étude et celle d'autres échantillons découverts ensuite ont démontré que le virus est passé du chimpanzé à l'Homme au début du XXe siècle. Le VIH-1 a probablement franchi la barrière de l'espèce lorsque les Hommes chassaient le chimpanzé pour leur consommation. Sa propagation s'est retrouvée facilitée par l'urbanisation rapide des colonies belges et françaises, la concentration d'ouvriers agricoles, la prostitution et la réutilisation de seringues. Les relations qu'entretenait l'Afrique francophone avec Haïti ont ensuite permis au virus de traverser l'Atlantique. Puis le VIH est arrivé aux États-Unis, depuis Haïti, à la fin des années 1960. La libération sexuelle des années 1960-1970 dans une Amérique homophobe a poussé la population homosexuelle masculine à se regrouper au sein de quartiers de New York ou San Francisco. Le sexe anal, qui engendre davantage de déchirures et lésions, a, là encore, favorisé la progression du virus. Celle-ci s'est faite d'autant plus vite que ces hommes changeaient fréquemment de partenaire. La maladie qui a touché ces hommes jeunes, éduqués, en bonne santé et majoritairement blancs a alors attiré l'attention. Le sida est sorti de l'ombre.

SVEN TORIN/PANOS

Entre
1900 - 1910
Le VIH passe
du chimpanzé
à l'Homme

1959
Premier échantillon connu du VIH, provenant du Congo belge

1981
Aux États-Unis, les Centres pour le Contrôle des Maladies (CDC) rapportent la mort de cinq hommes homosexuels décédés d'une forme inhabituelle de pneumonie

1982
La maladie associée au virus VIH est nommée syndrome d'immunodéficience acquise (Sida)

1983
Le CDC annonce que le sida se transmet par voie sexuelle et sanguine

1986
Le virus responsable du sida est nommé Virus de l'Immunodéficience Humaine (VIH)

1987
La zidovudine (ou AZT), premier médicament pour traiter le VIH, est mis au point

1995
Des cocktails médicamenteux qui bloquent la réplication virale sont utilisés. Le nombre de décès du sida commence à diminuer

1996
Les CDC recommandent des traitements prophylactiques post-exposition, à base d'antiviraux, pour protéger ceux exposés au virus

2008
Des scientifiques suisses annoncent que les patients qui respectent leurs traitements antiviraux peuvent se passer de préservatifs

2010
Pour la première fois, il est montré qu'un gel vaginal peut bloquer l'infection par le VIH

UN VIRUS PERFORMANT

Si le VIH s'est autant répandu, c'est qu'il est diablement efficace. Il cible d'abord des cellules immunitaires, les lymphocytes CD4, qui défendent le corps contre microbes et virus. Le VIH s'insère dans leur ADN. À son entrée dans l'organisme, le virus se reproduit rapidement, causant une forte hausse de la charge virale, c'est-à-dire de la quantité de virus en circulation dans le sang et autres fluides. En réponse à cette intrusion, l'organisme fabrique des anticorps, lesquels feront baisser la charge virale, mais ne parviendront pas à éradiquer le virus. Ce dernier reste tapi dans l'ADN des CD4. À l'occasion d'une nouvelle infection, ces CD4 d'apparence sains sont à nouveau sollicités et réactivent le VIH. Ils produisent de grandes quantités de virus et meurent. Au fur et à mesure que la charge virale augmente, le système immunitaire faiblit et le

NBS/CSCIENCE PHOTO LIBRARY

nombre de CD4 chute. Des maladies opportunistes apparaissent alors, qu'un organisme sain pourrait combattre, mais pas un organisme infecté par le VIH. Ces infections, comme la pneumonie à *Pneumocystis carinii*, font partie du tableau clinique du sida et sont responsables des décès. Les personnes infectées peuvent se sentir grippées au moment de l'infection puis parfaitement bien pendant 10 ans, alors que le virus réside toujours dans leurs cellules immunitaires. Il est donc possible de vivre avec le virus et de le propager pendant des années sans en avoir conscience.

Le virus responsable du sida n'ayant été identifié qu'en 1986, le VIH avait déjà infecté 36 millions d'adultes à la fin du siècle. Le sida a engendré l'émergence d'un activisme sans précédent et permis, grâce à l'alliance des financeurs, des professionnels de santé et des politiques, une meilleure gestion des soins à l'échelle mondiale.

UNE MALADIE NOUVELLE

Le 5 juin 1981, le Centre pour le Contrôle et la Prévention des Maladies (CDC) à Atlanta, aux États-Unis, rapportait que cinq hommes homosexuels avaient contracté une forme inhabituelle de pneumonie. Causée par la bactérie *Pneumocystis carinii*, elle n'affectait normalement pas les sujets jeunes et sains. Le rapport faisait état d'un mauvais fonctionnement du système immunitaire, dont l'origine devait être sexuelle. Des comptes rendus similaires n'ont pas tardé à suivre, venus notamment de New York et San Francisco.

Les hommes homosexuels semblaient particulièrement affectés, la maladie s'appela d'abord Grid, pour « Gay-related immune deficiency » ou immunodéficience liée à l'homosexualité. On se rendit vite compte que d'autres groupes y succombaient : les hémophiles, les toxicomanes, les femmes ayant des relations sexuelles avec des hommes infectés, leurs enfants et étonnamment, les Haïtiens. En 1983, le CDC renomma la maladie « syndrome d'immunodéficience acquise » (sida) et avançait qu'elle devait se transmettre par voie sexuelle ou sanguine. À cette date, on recensait des cas de sida dans 15 pays, principalement dans la population faisant partie des groupes déjà mentionnés. Mais en France et en Belgique, des immigrants venus d'Afrique centrale souffraient d'une affection similaire.

Comme les Haïtiens ayant émigré aux États-Unis, ces personnes ne satisfaisaient pas le schéma établi. Les précautions prises par le CDC dans ses rapports contrastaient avec la réaction hystérique du grand public. Les conservateurs voyaient dans le sida la rançon du péché et les agents de police de San Francisco amenés à côtoyer des personnes malades se sont vus donner des gants. Les gens ont commencé à paniquer,

ne connaissant pas la cause de la maladie. Des chercheurs français de l'Institut Pasteur, emmenés par Luc Montagnier, ont découvert un virus qu'ils pensaient responsable du sida en 1983. Ce n'est qu'avec l'identification du même virus l'année suivante par une équipe américaine que la communauté scientifique a affirmé avoir trouvé la cause de la maladie. En 1986, le virus a pris le nom de virus de l'immunodéficience humaine (VIH).

À la naissance du sida, le diagnostic équivalait la peine de mort.



JEFFREY MARKOWITZ/SYGMA/CORBIS

POLITIQUES

L'histoire du sida a modelé la façon dont l'épidémie a été prise en charge. Les premiers à avoir rendu publique la maladie étaient les homosexuels, mal vus par une Amérique largement homophobe à l'époque. Ont suivi les junkies et les prostituées sur la liste de groupes à risque. Autant dire qu'au début, il n'a pas été évident de financer ni les soins ni les politiques de prévention.

Pour enrayer la discrimination dont souffraient les personnes affectées et freiner la progression de la maladie, les activistes et les professionnels de santé ont mis en avant le slogan « n'importe



qui peut attraper le sida ».

L'épidémie faisant également des ravages chez les hétérosexuels en Afrique, il est apparu clairement qu'il serait difficile de s'adresser d'une même façon à tout le monde. Les dimensions sociales de la maladie ont donc été mises en avant.

Il ne s'agissait plus uniquement d'un problème de relations sexuelles non protégées, mais de sous-développement, de pauvreté, d'inégalité homme femme, de droits de l'Homme, etc.

La stratégie a été payante. Le montant alloué à la prévention et au traitement dans les pays développés est passé de 182 millions d'euros par an au début des années 1990 à quelque 13 milliards d'euros en 2010. Étrangement, il est aussi devenu plus compliqué de dédier l'argent aux programmes les plus efficaces, comme ceux qui fournissent des seringues neuves aux toxicomanes ou qui offrent des soins en santé sexuelle aux personnes à risques.

Les gouvernements qui ont voulu se distancier des réalités complexes du sexe et de la drogue ont choisi des approches plus populaires : enrayer la transmission de la mère à l'enfant, prendre en charge les orphelins et financer les traitements. Voilà peut-être une des raisons pour lesquelles, chaque année, 2,5 millions de personnes sont infectées par le VIH dans le monde.

Prévalence du HIV à l'échelle mondiale en 2009



DEUX ÉPIDÉMIES

L'épidémie mondiale de VIH n'est pas homogène.

Il est maintenant clair que la maladie se propage différemment en Afrique subsaharienne.

Ailleurs, le VIH frappe principalement des catégories bien définies de personnes : les toxicomanes, les hommes homosexuels et les prostituées.

Pourquoi ? Parce que le virus ne s'attrape pas si facilement sexuellement et la transmission est plus fréquente dans les semaines qui suivent l'infection, quand la charge virale atteint son pic. Le VIH se répand donc rapidement chez les groupes qui ont plus d'un partenaire pendant une courte période, comme les prostituées ou une partie des homosexuels. Et en généralisant, dans la plupart des sociétés, les relations hétérosexuelles sont monogames. Mais en Afrique de l'Est, du Sud et dans certaines régions d'Afrique de l'Ouest et des Caraïbes, le VIH a fini par toucher toute la population. Les taux d'infection flirtent parfois avec les 10 % parmi la population hétérosexuelle. Dans ces pays, les hommes et femmes sont plus nombreux à avoir plusieurs partenaires simultanément sur le long terme, que ce soit un héritage de la polygamie

ou une liberté acquise pour chacun des deux sexes.

La maladie s'est d'abord manifestée dans le milieu de la prostitution, puis les hommes infectés ont eu des relations sexuelles avec leurs autres partenaires alors qu'ils étaient très contagieux. Certaines de ces femmes infectées ayant elles aussi plusieurs partenaires, le VIH s'est facilement répandu à toute la population.

Bien sûr, il arrive, même hors de ces pays d'Afrique et des Caraïbes, qu'un malade faisant partie des groupes à risque transmette le virus à une personne n'en faisant pas partie. Mais si cette dernière entretient une relation monogame, elle a alors peu de chances de transmettre à son tour la maladie, la période très contagieuse étant vraisemblablement passée lorsqu'elle change de partenaire.

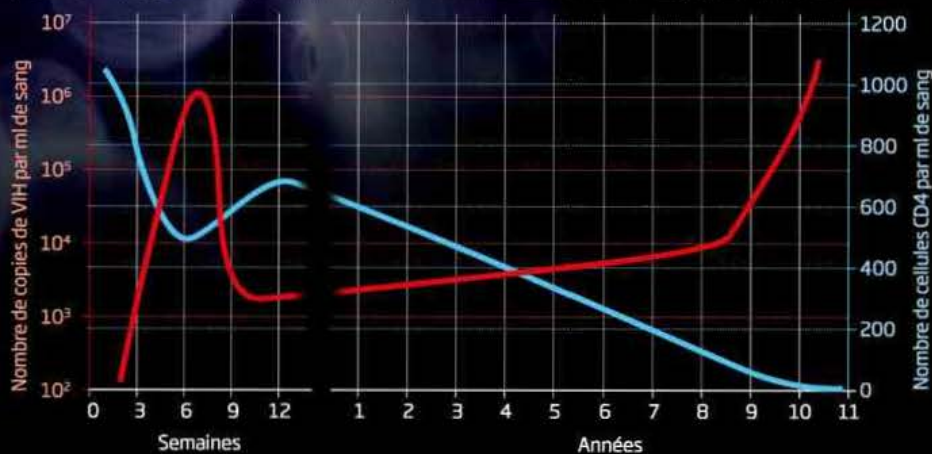
LE VIH AUJOURD'HUI

La mise au point de traitements capables d'enrayer la réplication du VIH est sans doute l'un des grands succès de la médecine. La contamination par le virus n'est plus forcément une condamnation à mort. Mais les taux d'infection restent très élevés dans certains pays d'Afrique, franchissant les 15 % en Afrique du Sud ou au Zimbabwe. Le défi est double : financer le traitement pour tous et réduire le nombre de nouvelles infections.

UNE MALADIE JUGULÉE

En 1983, lorsque le VIH a été identifié comme étant responsable du sida, virus et syndrome étaient indissociables. Le VIH menait au sida en l'espace d'une dizaine d'années. Puis en 1995, des chercheurs ont démontré qu'il était possible de ralentir la réplication du VIH et de ramener la quantité de virus à des niveaux indétectables. Les premiers traitements antirétroviraux, pour lesquels 20 pilules quotidiennes étaient parfois nécessaires, s'accompagnaient d'effets secondaires comme des lésions nerveuses ou des diarrhées aiguës. Désormais, un à deux comprimés par jour suffisent pour débiter le traitement et les effets secondaires se sont amoindris. Sous réserve de respecter le traitement, les personnes infectées peuvent vivre en bonne santé pendant des décennies. Elles semblent souffrir davantage d'ostéoporose, de démence ou de troubles hépatiques, mais rien à voir avec le cortège de symptômes qui accompagnent le sida. Mais au fur et à mesure que le sida disparaît, les incitations en faveur de relations sexuelles protégées en font tout autant. Et les infections chez la population homosexuelle masculine des pays développés repartent à la hausse.

Les personnes infectées par le VIH sont très contagieuses pendant les semaines suivant l'infection, lorsque la charge virale est à son maximum. Puis cette dernière diminue quand l'organisme se défend. Des années plus tard, la charge virale augmente à nouveau, tuant les CD4 et conduisant aux symptômes du sida.



20 comprimés quotidiens étaient prescrits lors des premiers traitements.



LA PRÉVENTION

Que faire en attendant le vaccin ou le gel vaginal efficace à 100 % contre le VIH ? Prévenir les infections. Pour les toxicomanes, la parade est simple : leur fournir des seringues propres. Pour limiter les infections par voie sexuelle, l'utilisation systématique du préservatif est préconisée. Mais beaucoup n'y ont pas recours. Chez les hommes homosexuels qui pratiquent le sexe anal, la transmission du virus est plus rare lorsque celui qui est infecté reçoit la pénétration. Mais ce fait n'est pas mis en avant, de peur qu'il soit en contradiction avec l'incitation « utilisez un préservatif à chaque rapport ». Pour les hommes hétérosexuels vivant dans des zones où le VIH est répandu, il a été démontré que la circoncision diminue le risque de transmission de 50 à 60 %. La circoncision serait par contre moins efficace pour les hommes homosexuels, puisqu'elle ne protège pas le partenaire passif lors des rapports et que de nombreux hommes échangent leurs places. Les traitements antirétroviraux existants sont également à l'étude en tant que méthodes préventives. Pour les personnes déjà infectées, il s'agit de prendre ce traitement lorsque le nombre de cellules CD4 est encore élevé. La quantité de virus présente dans le corps diminue, rendant la transmission plus difficile. Un démarrage précoce du traitement semble même faire chuter de 96 % le risque de transmission. Il faut cependant prendre en compte d'autres facteurs. Le recours massif aux traitements précoces pourrait alimenter l'idée que les relations sexuelles non protégées ne sont plus un risque. Or, ces traitements ne sont pas en mesure de protéger quiconque aurait des relations avec une personne infectée, qui ne le sait pas et ne prend donc pas de traitement elle-même. Sans oublier que l'oubli du préservatif favoriserait la transmission d'autres maladies sexuellement transmissibles, augmentant la contagiosité du VIH, même chez les personnes traitées. La deuxième façon d'utiliser les antirétroviraux dans un but préventif est de les administrer à des personnes en bonne santé, exposées à des risques. Cette « prophylaxie avant exposition » a eu des résultats mitigés. Des essais cliniques menés ces dernières années ont démontré que la prise quotidienne d'antirétroviraux pouvait réduire de plus de 90 % le risque d'infection par un partenaire sexuel séropositif. Mais cela impose une discipline quotidienne. Pour s'en affranchir, des chercheurs américains ont testé un antirétroviral à effet prolongé, dans le but de n'avoir qu'une injection mensuelle de médicament. Les résultats chez le singe, parus en mars 2014, sont encourageants. Un premier essai clinique devrait démarrer cette année.

« Les programmes d'échanges de seringues, peu chers, sont efficaces pour réduire le taux d'infection des toxicomanes »

DES GELS VAGINAUX POUR BLOQUER LE VIH

Les chercheurs tentent actuellement de mettre au point des microbicides, que ce soient des gels ou des suppositoires. Insérés dans le vagin ou le rectum ils permettent de diminuer le risque d'une contamination par le VIH. À l'inverse des préservatifs, ces méthodes permettent aux femmes de contrôler elles-mêmes le risque. Un gel vaginal utilisé avant le rapport a déjà montré qu'il pouvait bloquer l'infection par le virus du sida. En mars 2014, c'est cette fois un gel appliqué après le rapport qui a fait l'actualité. Testé chez le singe, ce gel est tout aussi efficace trente minutes avant la relation sexuelle que trois heures après. D'autres scientifiques tentent quant à eux de concevoir un anneau vaginal qui libère

antirétroviraux et contraceptifs pendant un mois, un dispositif encore plus simple pour les femmes. Il est actuellement testé en Afrique du Sud, jusqu'en 2015. Si les résultats sont concluants, il pourrait être commercialisé d'ici 5 à 10 ans.

VAINCRE LE VIH

Des traitements antirétroviraux efficaces ont été mis au point pour lutter contre le VIH, mais on ne sait toujours pas éviter de nouvelles infections. Les gels vaginaux suscitent l'espoir à moyen terme. Quant aux vaccins, les recherches se multiplient, mais n'aboutiront pas à court terme. En attendant, dotés uniquement de méthodes de prévention, le risque zéro n'existe pas.

LES VACCINS

Malgré les recherches qui se multiplient pour trouver le vaccin miracle, pourquoi en sommes-nous aussi loin ? Le vaccin classique utilise des agents infectieux inactivés ou atténués, lesquels déclenchent une réponse immunitaire sans pour autant causer la maladie. Cette méthode serait trop dangereuse avec le VIH. La première approche a consisté à lier un vaccin à une protéine située à la surface du VIH, gp120, pour stimuler la production d'anticorps. Mais gp120 est difficilement accessible aux anticorps de par sa structure. Agressé, le système immunitaire répond en deux temps. En 2009, des résultats prometteurs ont été rendus publics à la suite d'une étude menée en Thaïlande, misant sur l'action conjointe de deux produits. Le premier est un vaccin basé sur un virus de canari, lequel contient des gènes du virus du sida. Le deuxième est une version modifiée de la protéine gp120. Les effets étaient modestes, mais bien là : le vaccin a prévenu l'infection dans 31 % des cas. Une partie de la communauté médicale avait douté de l'étude, notamment à cause d'une protection inexplicablement plus faible des individus ayant reçu toutes les doses du vaccin par rapport à ceux n'en ayant reçu que quelques-unes. Quelques rares personnes manifestent une immunité naturelle au VIH, suggérant qu'il est possible de concevoir un vaccin efficace. Les chercheurs s'intéressent désormais particulièrement aux anticorps neutralisants, synthétisés par l'organisme confronté à un virus. Les scientifiques pensent que si le corps en produit suffisamment, cela le protégera d'une infection. Une étude française de 2013 explique pourquoi les progrès sont si lents. Des chercheurs de l'INSERM ont découvert que depuis le début de l'épidémie de sida, le virus est devenu de moins en moins sensible aux anticorps neutralisants, compliquant la mise au point d'un vaccin préventif.

ALAMY CLAUDE DOURVAGENCE VU X2

Des gels vaginaux permettraient aux femmes de se protéger du VIH.



Cibles différentes, campagnes différentes.





Elizabeth Pisani est titulaire d'un doctorat en épidémiologie des maladies infectieuses. Elle a passé plus de 15 ans à travailler sur le sida pour les Nations Unies ou d'autres organisations internationales. Elle décrit également la face cachée du sida dans son livre *The Wisdom of Whores: Bureaucrats, brothels and the business of AIDS* publié en anglais en 2008.

QU'EST-CE QUI MARCHE?

Pendant des années, les autorités de santé publique n'ont voulu tester que des approches dont l'efficacité avait été prouvée. Mais ce qui marche dans une étude scientifique peut échouer en conditions réelles.

Lorsque l'on envisage un nouveau programme, on a tendance à sélectionner les preuves qui satisfont nos convictions.

En matière de préservatifs, les médecins se raccrochent aux études montrant leur efficacité pour bloquer l'infection par le VIH et ignorent le fait que de nombreuses personnes préfèrent ne pas y avoir recours.

Peu importent les preuves objectives en faveur de tel ou tel programme.

Si les politiciens ne sont pas convaincus eux aussi, cela ne marchera pas. Les programmes d'échanges de seringues par exemple, bien que très efficaces, sont impopulaires auprès du public et donc des politiciens.

Il en est de même pour les traitements antirétroviraux administrés aux personnes séropositives qui sont encore en bonne santé. On sait que cela peut diminuer le risque de transmission du VIH à leurs partenaires sexuels. Mais comment se permettre le coût d'un traitement pour des

personnes séropositives en bonne santé quand tant d'autres malades du sida ne peuvent se payer le leur?

Si les preuves biologiques de l'efficacité des stratégies sont nécessaires, il ne faut pas non plus négliger la façon dont les comportements, les politiques et l'économie contribuent ou non à leur succès.

RÉFÉRENCES

- *The Invisible Cure : Why we are losing the fight against AIDS in Africa* par Helen Epstein (Farrar, Straus & Giroux, 2007)
- "Vaccination with ALVAC and AIDSVAX to prevent HIV-1 infection in Thailand" par Supachai Rerks-Ngarm et al., *New England Journal of Medicine*, vol 361, p 2209
- "Treating our way out of the HIV pandemic : could we, would we, should we ?" par Geoffrey Garnett and Rebecca Baggaley, *The Lancet*, vol 373, p 9
- "Prevention of HIV-1 infection with early antiretroviral therapy" par Myron Cohen, *The New England Journal of Medicine*, vol 365, p 493

SITES WEB

- Le rapport mondial de l'Onu sur l'épidémie de sida (2013) : <http://www.unaids.org/fr/resources/publications/2013/name,85053,fr.asp>
- Le blog d'Elizabeth Pisani : <http://www.wisdomofwhores.com/>
- Le réseau des essais cliniques pour les vaccins contre le HIV : <http://hvtm.org/>
- Le réseau des essais cliniques pour les microbiocides : <http://www.mtnstopshiv.org/>

DOSSIER THÉMATIQUE...



- ➔ LES FORMES DU VIVANT
- ➔ LES 5 SENS DE L'ARBRE
- ➔ BANANA!
- ➔ DES PLANTES ÉLECTRIQUES
À CULTIVER CHEZ SOI
- ➔ MÉDICAMENTS À BAS COÛT :
LA PHARMACULTURE PORTE
ENFIN SES FRUITS

LA RÉVOLUTION
végétale

LES FORMES DU VIVANT

➔ Un des plus grands mystères de la biologie tient sans doute à l'incroyable variété de formes que plantes et animaux ont pu revêtir tout au long de l'histoire du vivant. Qu'en savons-nous aujourd'hui ?

Par Roberta Kwok

Pourquoi les organismes vivants adoptent-ils telle ou telle forme ? On pourrait répondre que c'est inscrit dans leur ADN. Certains biologistes rêvent de créations plus exotiques encore, comme le pouletosaure : l'idée, digne de Jurassic Park, consiste à redonner par manipulation génétique à des poulets la forme de leurs ancêtres, les maniraptors. Quel enfant résisterait à l'envie d'avoir son propre dinosaure de compagnie ? Bien sûr, les membres des comités d'éthique deviennent écarlates quand ils entendent parler de tels projets. Et à quoi serait bon un cheval ailé ? Ni à voler, ni à courir. Cependant avec ces recherches, la plupart des scientifiques ne cherchent pas à créer des chimères de savants fous, mais simplement à comprendre comment la nature a pu engendrer une si fantastique étendue de formes. En étudiant d'étranges mutants, comme des mouches ayant des pattes à la place des antennes, on a pu identifier de nombreux gènes impliqués dans la morphogénèse. Mais nous savons encore très peu de choses sur la façon dont les instructions codées dans ces gènes sont exécutées. Dans les années 1960, le biologiste Lewis Wolpert a montré comment des plans corporels complexes pouvaient être façonnés au stade embryonnaire par de simples différences de concentration de diverses molécules. Différents gènes étaient activés à différents endroits selon le niveau local de ces molécules, appelées morphogènes. En modifiant les gènes qui contrôlent le plan corporel, les biologistes apprirent à métamorpho-

ser un pistil de fleur en pétale. Mais l'accent restait mis sur le séquençage des gènes « maîtres » plutôt que d'élucider la façon dont ils agissaient pas à pas.

La croissance d'un membre

Prenez les pattes des animaux. La première étape pour faire pousser un membre, c'est la formation d'un appendice allongé. Pendant des années, les biologistes ont supposé que cette forme apparaissait simplement parce que la division cellulaire était plus rapide à l'extrémité qu'à la base de cet appendice. James Sharpe, biologiste au centre de régulation génomique de Barcelone (Espagne), a récemment testé l'idée en réalisant des images 3D de la croissance d'une patte de souris et en mesurant la vitesse de division cellulaire tout au long du membre. Lorsqu'il a entré les données dans un modèle informatique, il a rapidement compris que le faible différentiel de vitesse de division cellulaire ne pouvait absolument pas expliquer la croissance du membre : au mieux, cela donnait au membre virtuel

« Contrairement aux végétaux, la formation des membres chez les animaux reste une énigme »





la forme d'un ballon, très éloignée de celle d'une patte (*PLoS Biology*, vol 8, e1000420).

Si la formation des membres chez les animaux reste une énigme, la dernière décennie a vu de nombreux progrès dans la compréhension de la croissance des plantes. La pousse d'une feuille par exemple, est déclenchée par de hauts niveaux d'un morphogène, ici une hormone végétale, l'auxine. Mais qu'est-ce

qui fait que la concentration est élevée au bon endroit ? Les premiers indices sont venus de plantes mutantes dotées d'une tige nue.

Ces mutantes étaient dépourvues d'une protéine appelée PIN1, laquelle pompe activement l'auxine hors des cellules. Dans une étude de 2003, Cris Kuhlemeier de l'université de Berne (Suisse), a décrit comment lui et son équipe ont rendu la protéine PIN1 fluo-

rescente dans une plante très utilisée dans les laboratoires, l'*Arabidopsis thaliana*. Ils ont alors découvert que la protéine formait de petits amas à l'extrémité des cellules les plus proches des endroits où des feuilles émergeraient par la suite (*Nature*, vol 426, p 255). Cela suggérerait que les molécules de PIN1 étaient en train de pomper l'auxine vers les endroits où les feuilles devaient pousser. Mais comment des cellules peuvent-elles bien savoir où doivent pousser les feuilles ? Pour l'équipe de Cris Kuhlemeier, elles ne le savent pas, mais la protéine PIN1 se comporterait comme de la limaille de fer attirée par un aimant, en l'occurrence l'auxine. Le résultat serait que chaque cellule suit une règle très simple : transférer de l'auxine vers la cellule voisine qui en a encore plus. Cela produirait un pic d'auxine à cet endroit, déclenchant la formation d'une feuille.

Sens de l'orientation

Toutes ces études suggèrent que l'idée que chaque cellule a une notion de la direction est fondamentale dans l'apparition d'une forme. « Vous imaginez peut-être que les cellules ne savent pas distinguer leurs extrémités l'une de l'autre ? » avance Enrico Coen, biologiste au centre John Innes de Norwich, « mais en réalité les cellules ont un très bon sens de l'orientation. » En plus de ce sens de l'orientation, il est clair que les forces physiques s'exerçant sur les organes en développement influencent également leur forme. En 2008, l'équipe d'Olivier Hamant, de l'INRA de Lyon, a montré que les cellules végétales réarrangeaient une partie de leur contenu en réponse à des contraintes physiques. (*Science*, vol 322, p. 1650). Cette croissance sous contrainte pourrait également expliquer pourquoi les tiges des plantes sont cylindriques. Les cellules à la surface d'une tige sont ➤

➤ Des règles étonnamment simples sous-tendent peut-être la symétrique beauté des formes végétales.

« L'idée que chaque cellule a une notion de la direction est fondamentale dans l'apparition d'une forme »

constamment poussées vers l'extérieur par les cellules internes. Cela expliquerait qu'elles renforcent certaines parties de leur paroi afin de résister à ces forces. Cela expliquerait aussi la croissance des cellules externes dans la direction de segments de paroi non renforcés, amenant naturellement les tissus vers une forme verticale allongée. L'équipe d'Olivier Hamant a ainsi montré qu'une simulation numérique respectant ces règles engendrait un cylindre vertical, tout comme une vraie tige.

Les prémices d'une nouvelle ère

Avec ces modélisations informatiques, nous commençons tout juste à être capables de prédire comment certains changements pourraient affecter l'aspect des plantes. Mais les agriculteurs et les éleveurs font ça depuis des millénaires. Jadis lorsqu'un éleveur voulait créer une race de chiens courts sur pattes, il favorisait les accouplements entre individus courts sur pattes. Bien sûr, ce travail se faisait alors à tâtons, sans comprendre les mécanismes à l'œuvre. Aujourd'hui, nous commençons tout juste à démêler l'écheveau d'interactions complexes entre gènes, morphogènes et forces physiques, et cette compréhension nous aide déjà à faire pousser plus vite des greffons de peau, ou à produire un cartilage artificiel plus résistant en le pinçant régulièrement de la même façon qu'il l'est lorsqu'une personne marche. Pourrions-nous pour autant créer tout un monde de formes entièrement nouvelles ? On sait déjà produire des tomates carrées en les faisant pousser dans des boîtes. Mais serait-il possible de déposer cette instruction dans le génome même de la graine ?

Le pouletosaure

Nous en sommes encore loin, tout particulièrement en ce qui concerne le règne animal. Certes, des poissons rendus fluorescents par modification génétique

sont déjà disponibles, et certains biologistes rêvent de créations plus exotiques encore, comme le pouletosaure : l'idée doit faire rêver plus d'un paléontologue ou fan de Jurassic Park, puisqu'il s'agit de manipuler génétiquement un poulet pour qu'il retrouve la forme de son ancêtre, le maniraptor ! Bien sûr, les membres des comités d'éthique et les ONG environnementales deviennent écarlates (certainement avec raison !) lorsqu'ils entendent parler de tels projets.

Cependant avec ces recherches, la plupart des scientifiques ne cherchent pas à créer des chimères de savants fous, mais simplement à comprendre comment la nature a pu engendrer une si fantastique étendue de formes. ■

📌 Horticulteurs et éleveurs savent depuis longtemps, et sans manipulations génétiques, transformer les formes du vivant.

BELOW LEFT: PLAINPICTURE/CANVASS RIGHT: PLAINPICTURE/AL CHUSSET





LES 5 SENS DE L'ARBRE

● La capacité de voir, de toucher, de sentir, de goûter ou d'entendre ne serait pas réservée au monde animal. Les 5 sens ont leur équivalent dans le monde végétal...

Par Daniel Chamovitz

Vous êtes-vous jamais demandé ce que ressentent les brins d'herbe sur lesquels vous marchiez ? Si les plantes stimulent constamment chacun de nos sens, beaucoup d'entre nous les considèrent en retour comme des objets sans vie. Mais alors, comment expliquer leurs facultés d'adaptation aux changements quotidiens qui affectent leur environnement, si ce n'est précisément par des capacités sensorielles qui n'ont presque rien à envier aux nôtres ? Votre magazine mène l'enquête !

La vue

Tout comme le fond de nos yeux est tapissé de cellules photoréceptrices, les plantes ont les leurs, disséminées sur les tiges et les feuilles. Elles leur permettent de distinguer le rouge du bleu, et sont même sensibles à des longueurs d'onde qui nous sont invisibles, comme l'infrarouge et l'ultraviolet. Dans l'une de ses dernières études, Charles Darwin montra que les plantes se tournaient vers la lumière comme si elles avaient faim de rayons solaires. C'est exactement cela : par la photosynthèse, les plantes transforment le dioxyde de carbone et l'eau en sucres dont elles se nourrissent, raison pour laquelle elles ont un besoin vital de détecter les sources de lumière. Elles y parviennent grâce à des cellules photoréceptrices, les phototropines, sensibles à la lumière bleue. Lorsqu'elles en détectent, cela provoque une cascade de signaux qui aboutit à la régulation d'une hormone de croissance, l'auxine. Les cellules de la plante situées à l'ombre n'étant pas régulées, croissent plus rapidement, provoquant l'inclinaison de la plante vers la lumière. Les plantes partagent même avec nous d'autres cellules photoréceptrices, les cryptochromes, sensibles aux UV et essentielles pour caler le rythme circadien (rythme biologique qui marque les journées).

PHILIPPE SAINT-LOU PHOTOGRAPHY/GETTY



Le toucher

Les plantes baignent dans un environnement très tactile. Les branches ploient sous le vent, et les plantes grimpantes cherchent à tâtons un support sur lequel pousser. Les plantes sont même sensibles au chaud et au froid, ce qui leur permet d'ajuster leur croissance et de réguler leur consommation en eau. Il suffit de toucher ou de secouer une plante pour ralentir sa croissance, raison pour laquelle la végétation est souvent rabougrie dans les endroits ventés. La plante dont le sens du toucher est le plus manifeste est sans conteste la carnivore dionée. Lorsque les poils sensitifs, qui se trouvent sur la face interne de ses feuilles transformées en mâchoires, sont stimulés 2 fois en moins de 20 secondes par une proie, le piège se referme en un éclair. Les plantes ressentent le toucher selon le même mécanisme que nous : stimulés, leurs récepteurs du toucher induisent un courant électrique qui parcourt les feuilles. Il ne leur manque qu'un cerveau pour traduire ces signaux en sensations empreintes de connotations émotionnelles.

L'odorat

Les plantes parasites appartenant au genre des cuscutes sont les plus fins limiers du règne végétal. À peu près dépourvues de chlorophylle, elles en sont réduites à vampiriser la sève d'autres plantes pour survivre. Elles repèrent alors leurs victimes potentielles à l'odeur, et se détournent de la même façon de celles qui pourraient leur être toxiques (*Science* 2006, vol.313). Si les cuscutes ont un flair exceptionnel, toutes les plantes sont sensibles aux odeurs. Depuis les années 1920, on sait que les fruits exposés à l'éthylène, un hydrocarbure naturel qui est aussi une hormone végétale, mûrissent plus rapidement, produisant à leur tour de l'éthylène qui provoque le mûrissement des fruits situés à proximité. Le mûrissement simultané offre sans doute de meilleures chances de dissémination des graines. Les odeurs jouent aussi le rôle de signaux d'alertes chez les végétaux. Des arbres infestés de chenilles émettent ainsi des phéromones qui font produire à leurs voisins des substances répulsives pour les insectes.



Le goût

Tout comme chez l'être humain, goût et odorat sont intimement liés chez les plantes. Lorsqu'une plante est attaquée par des insectes ou des bactéries, elle émet différents composés chimiques qui alertent ses voisines. L'une de ces substances, le jasmonate de méthyle, ne délivre son message que lorsque, diffusant par les pores des feuilles (les stomates), il se transforme au contact de l'eau en acide jasmonique. Celui-ci s'attache à un récepteur spécifique des cellules végétales et déclenche la réponse immunitaire. La notion de goût supposant des composés chimiques solubles dans l'eau, il n'est pas surprenant que chez les plantes, ce soient les racines qui occupent cette tâche. Privées d'eau, des plantes ont indiqué à d'autres plantes situées 5 rangs plus loin que le temps était à la sécheresse, entraînant la fermeture de leurs stomates et limitant l'évapotranspiration (*PLoS One* 2011, Vol. 6, p e 23625). D'autres plantes situées à la même distance n'ont pas réagi : le message était probablement transmis de racine à racine sous la forme d'une molécule soluble.

« La capacité à produire et à capter des composés chimiques volatils dote les arbres d'un véritable langage olfactif »

L'ouïe

Les plantes sont-elles plutôt fans de hard rock ou de musique classique ? Le débat fait rage, mais il est biaisé dès le départ : tout comme la vision des plantes n'a jamais été évaluée en leur demandant de déchiffrer des suites de lettres de différentes tailles, ou leur odorat en distinguant entre tel parfum et tel autre, il est illusoire de chercher à leur faire trancher la querelle entre musique classique et moderne. Tout ce que l'on peut avancer, c'est qu'il y a sans doute certains sons qu'il leur serait utile de reconnaître, comme ceux produits par certains insectes, voire par d'autres plantes. Les chercheurs de l'institut de botanique de Berne, en Suisse, ont ainsi enregistré des ultrasons émis par des pins et des chênes en période de sécheresse (*New Phytologist*, 2008, vol. 179). Stefano Mancuso, de l'université de Florence (Italie), a montré que les racines de maïs se dirigeaient préférentiellement vers certaines fréquences de vibration (*Trends in Plant Sciences*, avril 2012, vol 17). Reste qu'on ne comprend toujours pas comment les plantes peuvent bien capter les sons, et encore moins en émettre.





➔ DE FRUIT SAUVAGE, SANS CHAIR ET SANS SAVEUR, LA BANANE EST DEVENUE L'ALIMENT SAVOUREUX QUE NOUS CONNAISSONS. CE SONT LES HYBRIDATIONS, CONSÉQUENCES DES MIGRATIONS DES POPULATIONS DE L'OCÉAN INDIEN ET DU PACIFIQUE, QUI LUI ONT DONNÉ SES GALONS.

Par Esther Leburgue et Bob Holmes

Banana !

Fruit star des goûters des enfants et aliment de base dans de nombreux pays, la banane n'en est pas moins restée mystérieuse fort longtemps. Il aura fallu une enquête génétique et linguistique d'envergure pour comprendre comment ce fruit à peine comestible il y a quelques milliers d'années, est devenu aussi savoureux.

Retracer l'histoire de la banane revient à retracer celle de ses cultivateurs. Leurs migrations à travers l'océan Indien et Pacifique l'ont façonnée. On trouve encore aujourd'hui les ancêtres des bananes cultivées en Asie du Sud-Est. Ces bananes sauvages sont très différentes de celles que nous trouvons sur les étals (voir photo page suivante). Elles sont petites et remplies de petites graines amères de la taille d'un petit pois. Elles n'ont que peu de chair et leur goût n'est en rien comparable à ce à quoi nous sommes habitués. Selon les travaux menés sur le site archéologique de Kuk en Nouvelle-Guinée, la culture de la banane a débuté il y a au moins 7 000 ans, voire 10 000 ans. L'archéologue Tim Denham de l'université australienne La Trobe et son équipe, ont trouvé des traces de cette culture sous la forme de phytolithes. Ces dépôts de silice se forment dans les plantes pendant leur croissance et ont comme particularité de ne pas pourrir et d'exhiber des formes différentes en fonction de la partie de la plante dans laquelle ils se sont développés. Avant cette découverte, les archéologues pensaient que l'agriculture avait été introduite dans cette région par les Austronésiens, un peuple qui a migré depuis le sud de la Chine il y a 4 000 ans pour devenir l'ethnie majoritaire en Asie du Sud-Est. Au tout début, les bananes de Kuk devaient ressembler

énormément à leurs cousines sauvages. Les dépôts les plus anciens retrouvés sur place renferment beaucoup de phytolithes de graines, indiquant que les fruits devaient en contenir. Les scientifiques ont constaté que cette proportion de phytolithes de graines dans le mélange diminuait au fil des siècles. L'explication la plus plausible serait que les bananes sont progressivement devenues des fruits sans graines.

Une première génération décevante

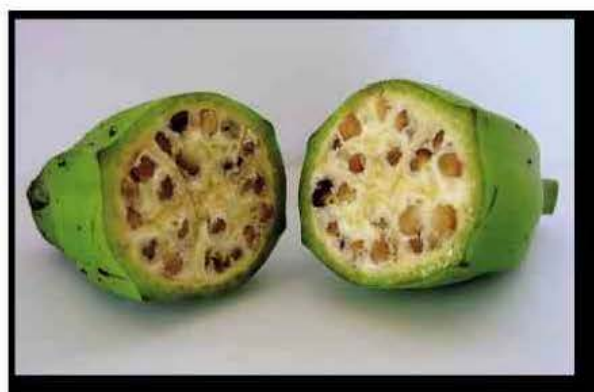
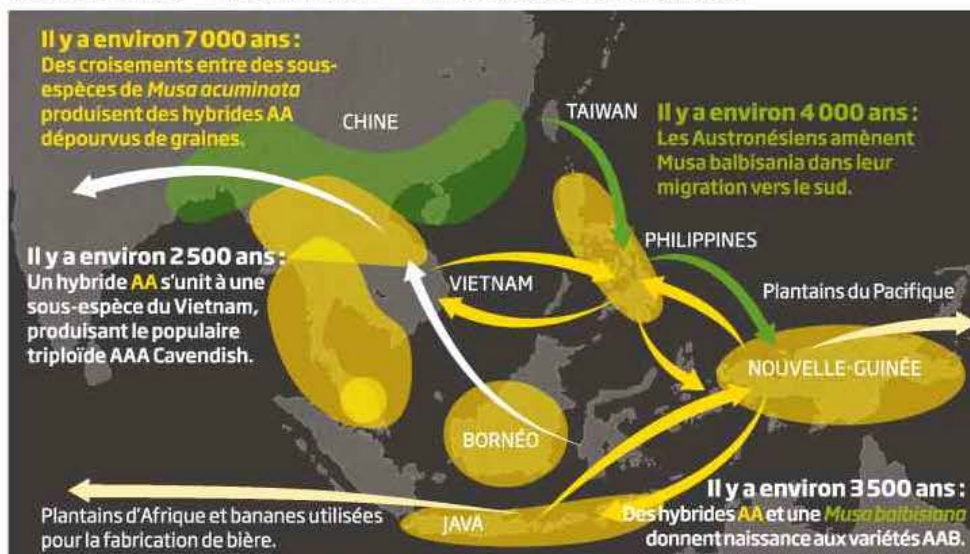
L'espèce de banane la plus répandue à l'époque des prémices de sa culture était *Musa acuminata* (voir page suivante). Elle comptait de nombreuses sous-espèces aux différences génétiques telles que leur croisement produisait des hybrides stériles. En règle générale, les plantes stériles ne font pas de fruits. Mais la banane en produit quand même, dépourvue de graines.

Edmond De Langhe, spécialiste de la banane jusqu'à sa retraite récente de l'université belge de Louvain, a découvert, en croisant des bananes sauvages, que la première génération née de cette union n'avait que peu de pulpe et pas de graines. Puis les tiges des bananes mourraient après avoir porté des fruits, remplacées par de nouvelles venues directement d'une corne souterraine, un organe de réserve s'apparentant à un bulbe. Et voilà que les bananes devenaient plus charnues. La première étape de l'évolution des bananes a donc dû se produire avec les migrations de populations. Une sous-espèce introduite sur une nouvelle île devait polliniser les plantes indigènes, les hybrides aux fruits dépourvus de graines donnant, au bout de quelque temps, des fruits plus pulpeux. ➤

Zone de mélange

Les bananes ont accompagné les migrations de populations, engendrant des croisements entre variétés, qui ont donné naissance à celles que nous cultivons aujourd'hui sur toute la planète.

Bananes sauvages ● *Musa balbisiana* ● Sous-espèces de *Musa acuminata*



WARUT ROONGTHAI

« Les bananes sauvages sont petites, remplies de petites graines amères de la taille d'un petit pois et n'ont que peu de chair »

► Des mélanges entre trois zones

Si on savait déjà que l'hybridation avait joué un rôle majeur dans la domestication de la banane, les chercheurs ont affiné leur connaissance du processus ces dernières années. Une équipe internationale comptant notamment Edmond De Langhe a rassemblé près de 550 échantillons de bananes cultivées et sauvages, puis utilisé des marqueurs génétiques pour retracer leurs origines. L'étude a révélé que les bananes comestibles résultaient de l'hybridation entre deux sous-espèces de *Musa acuminata*, originaires de différentes régions. Il apparaît aussi que les croisements ont eu lieu dans trois grandes zones. Au sud, les sous-espèces de Nouvelle-Guinée ont rencontré celles de Java. À l'Est, celles des Philippines ont côtoyé celles de Nouvelle-Guinée. Et au nord, des sous-espèces continentales se sont liées à celles des îles. La plupart des bananes AA résultant de ces hybridations (A pour *acuminata*) sont encore cultivées aujourd'hui.

Chose étonnante, la linguistique suit la génétique, comme l'a démontré Mark Donahue de l'université de Canberra (Australie). Il a compilé dans les langues indigènes de l'Asie du Sud-est 1 100 mots signifiant « banane ». La plupart sont liés à trois mots anciens ayant la même signification : muku, qarutay et barat, originaires chacun d'une des trois grandes zones de mélange. Muku vient de Java et ses dérivés se sont répandus à Java, quand ceux de qarutay, ori-



DAMIAN EVANS/GETTY IMAGES

Des milliers de variétés de bananes sont cultivées de nos jours et pas seulement pour leurs fruits.

ginaire des Philippines, se retrouvent en Indonésie et sur le sous-continent indien. Enfin, baRat vient des Philippines et le mot, comme ses dérivés, se sont propagés à l'Asie du Sud-est continentale. Les bananes devaient déjà être une denrée importante à l'arrivée des Austronésiens dans la région il y a 4 000 ans puisqu'ils n'ont pas changé le vocabulaire utilisé à l'époque. Mais ils ont néanmoins changé la banane, débarquant avec d'autres espèces, comme *Musa balbisiana*, venues du sud de la Chine. C'est à ce moment qu'a eu lieu la seconde étape majeure dans l'évolution de la banane. Bien que les hybrides soient en général dépourvus de graines, il arrive que des graines viables soient produites. Le pollen des hybrides est aussi capable de fertiliser d'autres lignées. Les croisements entre variétés ont donc persisté même après que les cultivateurs se sont mis à faire pousser des hybrides sans graines... jusqu'à l'événement qui a changé la banane.

L'avènement des triploïdes

Les plantes communes sont pourvues de deux sets de chromosomes, l'un venant de l'ovule, l'autre du grain de pollen. Mais il arrive que l'ovule ou le grain de pollen soit doté de deux sets de chromosomes, résultant en une banane avec trois sets après fécondation. Ces plantes triploïdes, plus vigoureuses et aux fruits plus gros, représentent la plupart des bananes cultivées aujourd'hui.

Selon les travaux de l'équipe internationale d'Edmond De Langhe, ces triploïdes se sont formées à une douzaine d'occasions. Certaines, les triploïdes AAB, ont deux sets de chromosomes provenant de *Musa acuminata* et un autre de *Musa balbisiana*. D'eux découlent les plantains du Pacifique répandus et les plantains d'Afrique. D'autres, les triploïdes AAA, ont trois sets de chromosomes de *Musa acuminata*. Elles sont courantes en Afrique de l'Est et leur origine remonte en Nouvelle-Guinée. La banane Cavendish, star des marchés, est aussi une triploïde AAA, mais née plus récemment au Vietnam, par le croisement d'un hybride AA et d'une espèce locale.

L'histoire de la banane étant retracée, ces enseignements pourraient trouver une application concrète dans la lutte contre certains champignons microscopiques dont elle est la proie aujourd'hui. La maladie de Panama a débarrassé les étals de la variété Gros-Michel à la moitié du XX^e siècle. Un autre champignon, le Sigatoka noir, menace désormais la Cavendish. Pour la protéger, une option serait de la recréer à partir de ses ancêtres résistants à la maladie. Les essais en cours n'ont pour l'instant donné naissance qu'à des fruits à la saveur décevante, mais les chercheurs ne baissent pas les bras... et gardent la banane ! ■

RÉFÉRENCES

- *Science*, vol 301, p. 189
- *PNAS*, vol 108, p. 11311



➔ ET SI VOUS RECHARGIEZ VOTRE TÉLÉPHONE DANS UNE PRAIRIE?
ET SI L'ÉLECTRICITÉ ÉTAIT PRODUITE DANS DES RIZIÈRES?
LA TECHNOLOGIE FONCTIONNE DÉJÀ EN LABORATOIRE,
MAIS SERA-T-ELLE RENTABLE À UNE ÉCHELLE INDUSTRIELLE?

DES PLANTES ÉLECTRIQUES À CULTIVER CHEZ SOI

Par Caroline Williams

Le petit carré de verdure sur le toit de l'Institut d'écologie des Pays-Bas à Wageningen ne ressemble en rien à une technologie futuriste. Pourtant, selon ses créateurs, cette pelouse qui produit de l'électricité jour et nuit, pourrait révolutionner la façon dont nous utilisons l'énergie.

En effet, le sol et les plantes sont une source d'électricité insoupçonnée qui pourrait bénéficier à tous ceux qui n'ont pas accès à un réseau de distribution.

L'électricité d'un tronc d'arbre

En 2006, Gordon Wadle, un inventeur originaire de l'Illinois, a généré un petit flux de courant à partir d'un clou en aluminium planté dans un tronc d'arbre qu'il a relié à une électrode de cuivre dans le sol. En association avec MagCap Engineering, une petite entreprise d'électronique, il a breveté l'idée.

À partir de là, MagCap a contacté le physicien Andreas Mershin de l'Institut de Technologie du Massachusetts (MIT, États-Unis). Celui-ci s'est d'abord montré sceptique. Cependant, il a chargé Christopher Love, l'un de ses étudiants, de réaliser quelques tests. Les résultats l'ont immédiatement convaincu. En effet, Christopher Love et Andreas Mershin ont vite compris que le différentiel de concentration des ions hydrogène entre le sol et l'arbre était à l'origine de la production d'un faible courant.

C'est ainsi qu'en 2009, Voltree Power, une société fondée par MagCap, a installé un réseau de surveillance des feux de forêt alimenté par les arbres eux-mêmes. Le rendement s'est cependant avéré insuffisant pour alimenter tous les capteurs et des panneaux solaires ont dû être rajoutés au système.

Une pile à bactéries

De son côté, Bert Hamelers de l'université de Wageningen aux Pays-Bas s'est demandé si les bactéries vivant parmi les racines des arbres pouvaient être utilisées pour produire de l'électricité dans un type particulier de pile à combustible.

Les piles à combustible classiques combinent l'oxygène avec l'hydrogène pour produire de l'eau et de l'électricité à l'aide d'électrodes en platine. Ainsi, Bert Hamelers a travaillé sur des piles bactériennes qui exploitent les enzymes de micro-organismes vivants ➤

UN TOIT VÉGÉTAL OPTIMISÉ

Selon Willy Verstraete, biotechnologiste, 50 mètres carrés d'un toit végétal optimisé pourraient couvrir environ 20 % des besoins en électricité d'un foyer néerlandais. « Cela vaut vraiment la peine de continuer parce que ces piles pourraient être facilement utilisées presque partout », explique Walt Patterson, analyste en énergie et consultant pour le centre de réflexion Chatham House à Londres.



« Le sol et les plantes
sont une source
d'électricité
insoupçonnée »



► pour obtenir un même résultat. Le concept a fait ses preuves avec des appareils fonctionnant sur la matière organique comme le plancton et les eaux usées, mais ces systèmes doivent être constamment alimentés en combustible. Le chercheur néerlandais s'est rendu compte que les racines des plantes pourraient être utiles à cet égard. En effet, près de la moitié des glucides et des autres molécules organiques produits par la plante est libérée à partir de ses racines. Tant qu'il vit, un arbre produit la matière première idéale pour une pile microbienne.

En réalité, les arbres ne sont pas les plus efficaces, car leurs racines sont grandes et trop profondes.

Ainsi, loin de la forêt, dans les sols marécageux où il n'y a pas d'oxygène, les bactéries anaérobies produisent du dioxyde de carbone ainsi que des protons et des électrons libres. Bert Hamelers a compris qu'il pourrait capturer les électrons en plaçant des électrodes à proximité des bactéries (voir schéma).

C'est donc aux côtés de David Strik, un biotechnologiste de l'environnement à l'université de Wageningen, qu'il a réalisé des expériences sur des herbes et des roseaux de marais salants humides.

« Multiplier la production d'énergie par 10 est une simple question d'optimisation du système »

Les premiers résultats ont été modestes, la production s'est limitée à quelques milliwatts. Mais au bout de deux ans, les installations en laboratoire furent capables de produire environ 500 milliwatts par mètre carré (mW/m^2).

Cependant, ce premier pas ne permet pas encore aux piles à bactéries de concurrencer les panneaux solaires et les éoliennes, dont les rende-



UN COURANT DE SOL

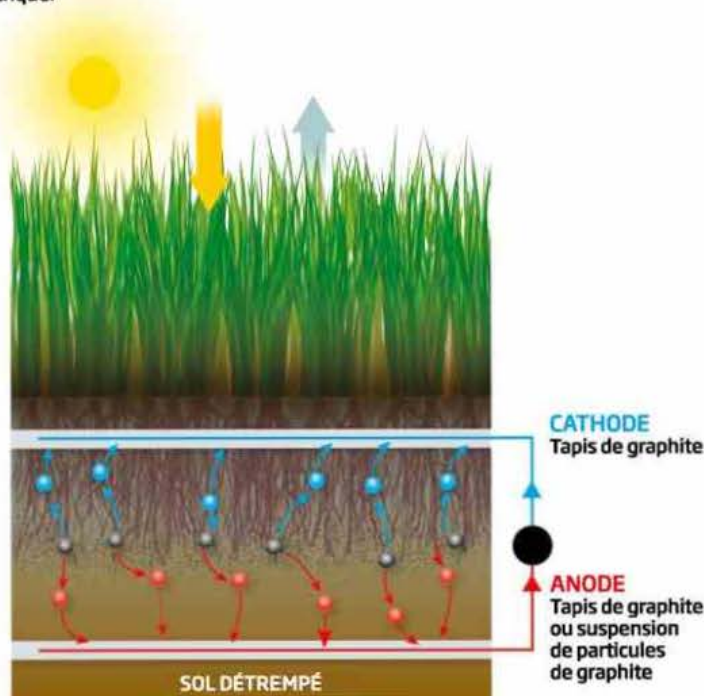
Nourries par les sucres des plantes, les bactéries vivant dans les sols humides libèrent des électrons. Ces derniers peuvent être collectés à l'aide d'électrodes souterraines pour générer un courant électrique.

Les plantes absorbent la lumière du soleil et le dioxyde de carbone, relâchant de l'oxygène.

Les racines des plantes libèrent dans le sol des matières organiques comme les glucides (sucres).

Les micro-organismes du sol digèrent les sucres en libérant du CO_2 , des électrons et des ions hydrogènes (H^+).

Les électrons sont réunis à l'anode alors que les ions H^+ sont attirés vers la cathode où ils se combinent avec l'oxygène pour former de l'eau (H_2O).



DES RIZIÈRES ÉLECTRIQUES

La technologie devrait présenter un intérêt particulier en Asie, où des millions d'hectares de rizières pourraient être transformés en centrales électriques. À l'université de Tokyo, le biologiste Kazuya Watanabe a déjà exploré l'idée. Une pile à combustible creusée dans la boue d'une rizière génère un faible courant d'environ $10 \text{ MW}/\text{m}^2$. En collaboration avec une société privée, il espère accroître ce rendement et concevoir un système résistant aux conditions de vie des champs.



● Le générateur végétal de Marjolein Helder et David Strik peut déjà recharger un téléphone GSM.

ments se situent entre 4 et 7,7 W/m². « Les densités de courant nécessaires pour rendre ces dispositifs compétitifs sont 10 à 100 fois trop élevées », admet Willy Verstraete de l'université de Gand en Belgique.

Néanmoins, ces piles à combustible peuvent se commercialiser. C'est ainsi que David Strik a fondé, avec sa collègue Marjolein Helder, la société Plant-e. Par ailleurs, ils font également partie de Power Plant, un projet financé par l'Union européenne avec un budget de 4 millions d'euros ; celui-ci vise à accroître l'efficacité de ces piles végétales. Ses membres ont calculé qu'un rendement de 3,2 W/m² était à leur portée.

Des projets ambitieux

Afin d'atteindre cet objectif ambitieux, un énorme travail est nécessaire. En effet, il faut trouver des variétés de plantes à haut rendement de matière organique, identifier la meilleure combinaison de micro-organismes et concevoir le meilleur design pour les électrodes. L'équipe néerlandaise utilise une anode faite à partir d'une suspension

➔ MIEUX QUE LES BIOCARBURANTS

Un kilomètre carré de turbines éoliennes ou de panneaux photovoltaïques peut produire jusqu'à 7,7 mégawatts.

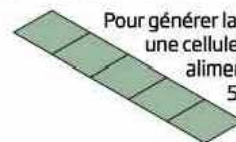
ÉNERGIE ÉOLIENNE



ÉNERGIE SOLAIRE



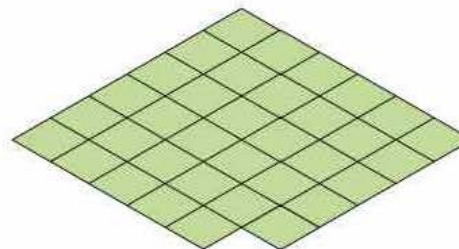
PILE À COMBUSTIBLE BACTÉRIEN



Pour générer la même énergie, une cellule bactérienne optimisée alimentée par plantes requiert 5 km² de terrain

BIOMASSE

Les cultures de biocarburants nécessitent près de 35 fois la surface du solaire ou de l'éolien



de petits granules de graphite à travers laquelle les racines des plantes poussent. Cependant, ce système est encore imparfait.

Enfin, il y a le défi d'adapter cette technologie à une production à grande échelle. Le rendement d'un système à l'air libre serait réduit de moitié par rapport au laboratoire, soit environ à 1,6 W/m². Bien que ce soit un cinquième de la puissance maximale du solaire ou de l'éolien, c'est plus efficace que la culture des biocarburants (voir schéma) et ne requiert pas d'ingénierie complexe.

Il y a un autre avantage à câbler les champs de cette façon. Selon Willy Verstraete, la technologie pourrait contribuer significativement à la lutte contre le réchauffement climatique. En captant les électrons libérés par les bactéries anaérobies, les piles végétales freineraient les émissions de méthane, un puissant gaz à effet de serre.

Certes gadget, mais également prometteur, un étudiant néerlandais tente de transformer un bananier en chargeur de téléphone. Gageons que s'il réussit, sa trouvaille pourrait bien trouver sa place sur le marché! ■



Médicaments à bas coût

LA PHARMACULTURE PORTE ENFIN SES FRUITS

➔ LE RÊVE D'OBTENIR DES PLANTES CAPABLES DE PRODUIRE DES MÉDICAMENTS DEVIENT ENFIN RÉALITÉ...

Par Hal Hodson et Michael Le Page

Dans les années 1980, le Britannique Julian Ma a inventé un traitement contre les caries qui avait le potentiel de bénéficier à la société entière.

Malheureusement son antidote est à base d'anticorps et la production de ces derniers a un coût prohibitif. En 1990, une solution semble se présenter lorsqu'une équipe en Californie réussit à faire produire des anticorps par une plante. Julian Ma a alors pris un avion pour les États-Unis. « Ce fut un heureux hasard, car ils voulaient commencer par un produit, comme du dentifrice, qui serait utilisé par des millions de personnes », raconte-t-il.

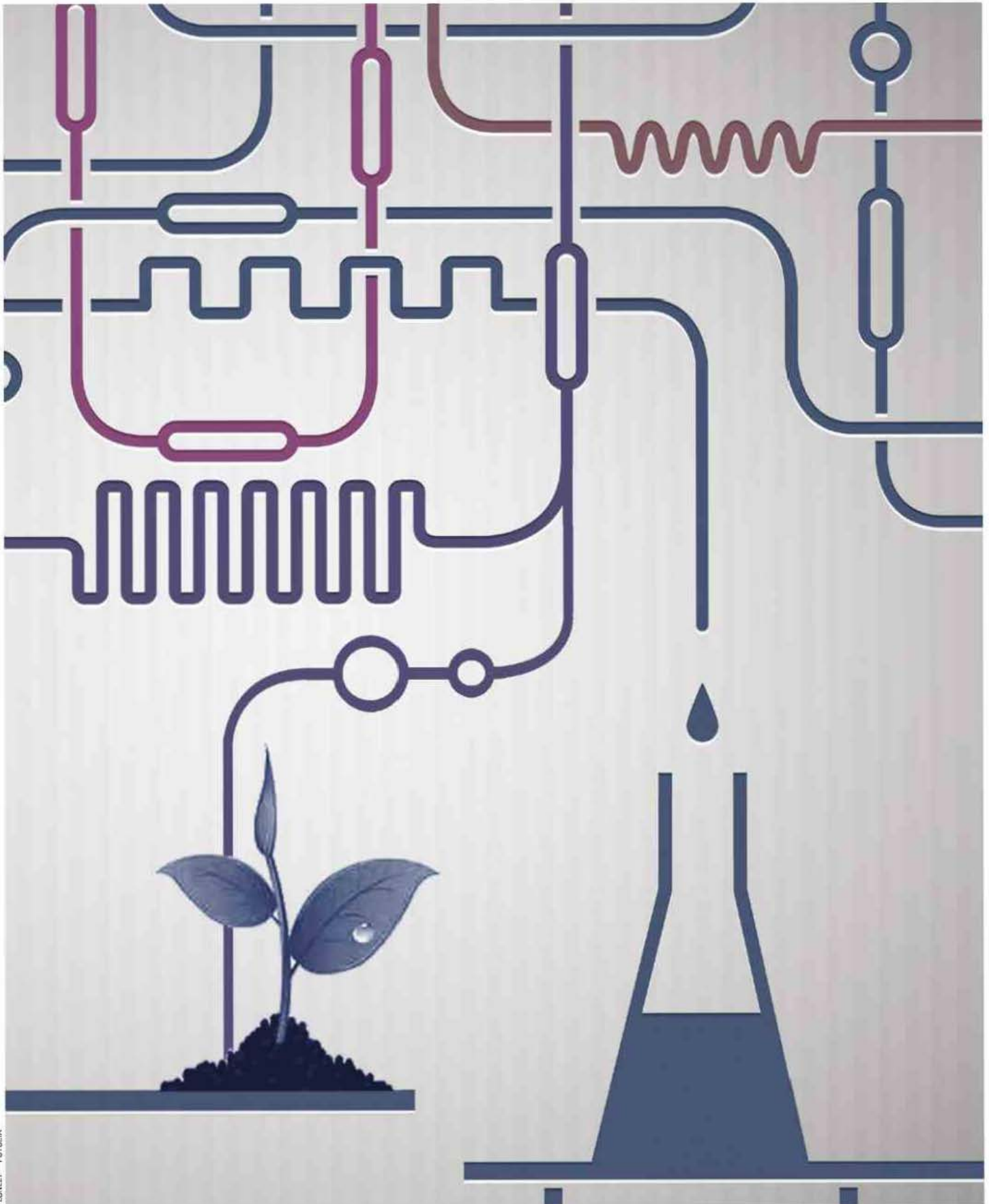
Il a alors participé à la naissance de l'agriculture pharmaceutique ou « pharmaculture ». Le plus grand espoir était d'obtenir un « vaccin comestible » et bon marché, intégré dans un fruit par exemple, et destiné aux pays pauvres.

Nous n'en sommes pas encore là, bien sûr. Les freins ont été en partie d'ordre technologique. La production par des plantes de protéines étrangères telles que les anticorps, implique de recourir au génie génétique. Des gènes spécifiques sont introduits dans les cellules qui sont ensuite développées en plantes, ce qui prend des mois. Il faut enfin générer des lignées pures pour une production à grande

échelle. « Cela peut souvent prendre plusieurs années », explique George Lomonosoff au Centre John Innes à Norwich, au Royaume-Uni.

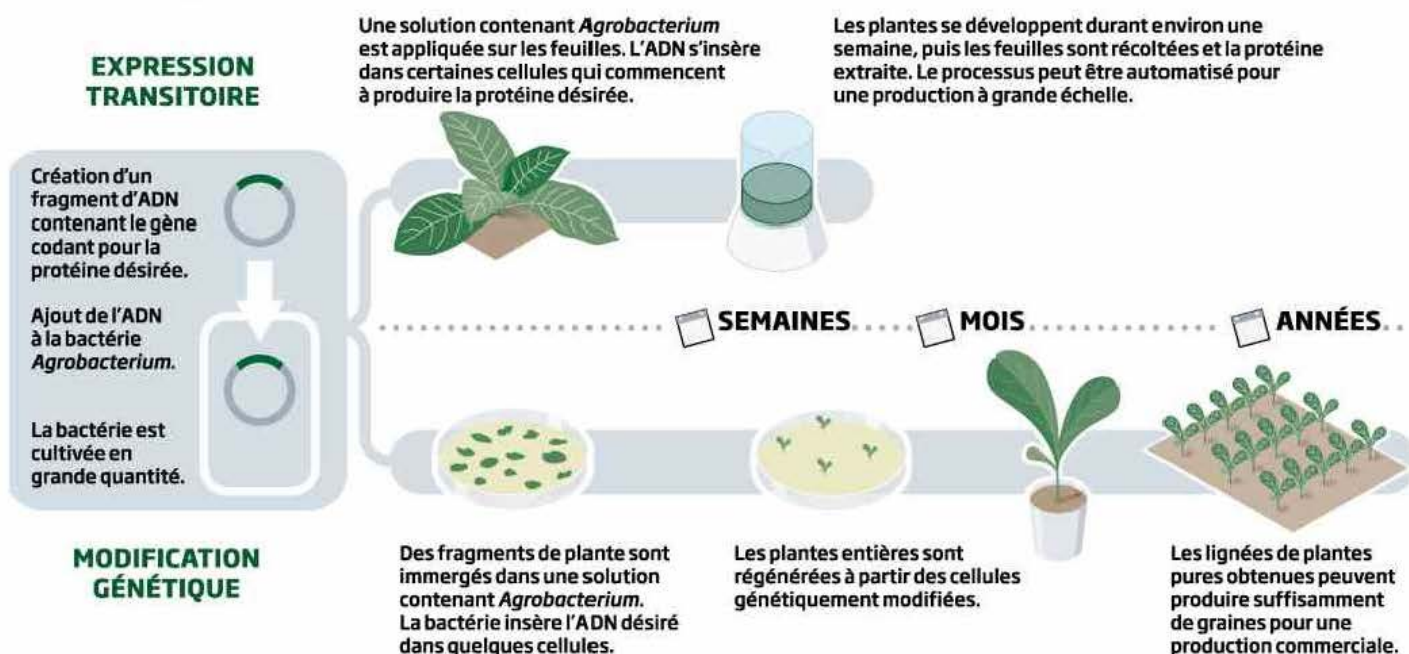
En raison de ces problèmes, un grand nombre de « pharmaculteurs » ont choisi de travailler sur des plantes vivrières, comme le maïs, qui sont mieux connues. Cela a cependant rendu plus difficile l'obtention d'autorisation de culture en plein champ en raison des craintes de contamination alimentaire. Mais l'étape la plus difficile est encore la réalisation d'essais cliniques pour prouver que le médicament est sûr et efficace. Un des soucis est que les protéines produites dans une cellule végétale peuvent être différentes de la version animale. Elles risquent donc de déclencher une réaction immunitaire chez l'homme.

« Le plus grand espoir était d'obtenir un vaccin comestible et bon marché, intégré dans un fruit par exemple »



Un raccourci pour cultiver des médicaments

La production végétale de médicaments impliquait jusqu'à présent le recours à des plantes génétiquement modifiées, un processus qui peut prendre des années. Aujourd'hui, les substances peuvent être synthétisées en quelques semaines seulement grâce à la méthode d'expression transitoire de gène.



► Avec tant d'obstacles, il n'est guère surprenant que les progrès aient été si lents. Julian Ma, aujourd'hui à l'université Saint-Georges de Londres, a réussi à créer un plant de tabac capable de produire ses anticorps anti-caries, mais plus de 20 ans après, la version commerciale de la technologie - CaroRx - n'a pas encore été lancée. En fait, jusqu'en mai 2012 aucun médicament issu d'une culture végétale n'avait obtenu le feu vert de l'autorité de réglementation américaine des médicaments et des aliments (Food and Drug Administration : FDA).

L'un d'entre eux est toutefois produit à Cuba par le Centre de génie génétique et de biotechnologie à La Havane, qui a créé un vaccin pionnier contre l'hépatite B, Heberbiovac-HB. L'ingrédient actif est purifié en utilisant un anticorps extrait, depuis 2006, de plants de tabac modifiés.

Cultures de cellules en cuves

Un autre pionnier est la société Ventry Bioscience en Californie. Elle cultive du riz pour produire des protéines telles que la lactoferrine que l'on trouve naturellement dans le lait, les larmes et la salive et qui protège des infections. Elle est l'une des seules sociétés pratiquant de la pharmaculture en plein champ et espère obtenir une autorisation pour

traiter la diarrhée. La plupart des autres groupes ont adopté l'approche de culture en cuves de cellules végétales ce qui a permis d'augmenter les rendements. Un avantage est qu'il n'y a pas de risque d'infection par des virus mammifères. Et il n'y a pas de risque de dissémination des gènes. « Parce que nous utilisons des cellules, et non pas des plantes cultivées en plein champ, nous ne sommes pas soumis aux mêmes règles », explique David Aviezer, chef de Protalix Biotherapeutics en Israël, l'entreprise leader dans ce domaine. Son premier produit est un traitement pour la maladie de Gaucher, une maladie génétique rare causée par un déficit enzymatique. Protalix fabrique une version synthétique

« Le médicament produit de façon conventionnelle est l'un des plus onéreux, avec un coût de 160 000 € par an »



de cette enzyme dans des cellules de carotte modifiées cultivées dans des conteneurs en plastique (voir la photo). En mai 2012, la taliglucérase alfa est devenue la première protéine produite par des plantes à recevoir une autorisation de la FDA.

L'enzyme sera en concurrence avec l'imiglucérase de la société Genzyme produite par des cellules animales. Ce médicament est toutefois très cher - 160 000 € par patient et par an.

La perspective de produire des médicaments à moindre coût et en toute sécurité a retenu l'attention des grandes sociétés pharmaceutiques. Pfizer a ainsi obtenu une licence pour la technologie de Protalix. Avec un coût proche de 120 000 € par an, la taliglucérase alfa est toutefois encore loin de satisfaire le rêve d'un traitement bon marché.

Vers une production bon marché

Une autre approche pourrait aider à rendre cette vision plus proche. Au lieu de créer des plantes génétiquement modifiées, l'idée est d'ajouter l'ADN codant pour la protéine souhaitée dans les feuilles de plantes normales à l'aide de la bactérie *Agrobacterium* (voir schéma). La récolte se fait après une semaine ou deux. Cette méthode connue sous le nom d'expression transitoire souffre cependant d'un taux de production très faible.

George Lomonosoff a toutefois découvert qu'un virus des plantes, le virus de la mosaïque du niébé,

⬇ Ci-dessous,
de larges cuves
de cellules de
carottes.



PROTALIX



© ALEXANDER RATHS - FOTOLIA.COM

DES VACCINS RAPIDES ET BON MARCHÉ

Medicago est financée par l'armée américaine pour développer des moyens de production rapide de vaccins. L'entreprise canadienne a construit une usine en Caroline du Nord capable de produire 10 millions de doses par mois. Andy Sheldon affirme que la pharmaculture est 10 à 20 fois moins chère que les méthodes conventionnelles. Il pense que la production sous serre d'anticorps serait aussi rentable. La pharmaculture en plein champ est-elle donc encore nécessaire ?

Oui, affirme Julian Ma. Il conduit un projet, géré par le consortium de recherche Pharma-Planta, pour produire des anticorps anti-VIH dans le tabac, dont l'un a été testé avec succès dans un essai clinique l'an dernier. Seule une culture en plein champ permettrait la production d'anticorps suffisamment bon marché pour lutter contre le VIH en Afrique, dit-il.

Pour les produits à forte valeur ajoutée destinés aux pays riches, la serriculture pourrait cependant être la voie à suivre.

permettait de booster l'expression des protéines. Son système est mis à profit par la société Medicago au Québec. Celle-ci utilise la technologie dans des cultures sous serre pour fabriquer des vaccins contre la grippe en seulement trois semaines, contre plusieurs mois habituellement. « À partir de la séquence du nouveau virus téléchargée sur internet, nous synthétisons un fragment d'ADN que nous clonons dans *Agrobacterium* », détaille Andy Sheldon, dirigeant de l'entreprise.

La pharmaculture est donc enfin devenue une réalité. Malheureusement, il faudra attendre encore quelques années avant de pouvoir se brosser les dents avec des anticorps ! ■

SOURCES :

- Sainsbury F. et Lomonosoff G. *Plant Physiology* (2008)
- Landry N. et coll. *PLoS One* (2010)



COMMANDE DES ANCIENS NUMÉROS

**Envoi garanti
sous 48 heures**

JE COMMANDE DES ANCIENS NUMÉROS
LE 1^{ER} N° = 8 €, LES SUIVANTS = 6 €

(frais de port France Métropolitaine + gestion inclus)

EXEMPLE : 1 N° = 8 €, 3 N° = 20 €, 5 N° = 32 €, 7 N° = 44 €

**Merci de m'adresser par retour de courrier les
numéros suivants**

Je règle par chèque à l'ordre de *Mondeo publishing*.

Merci d'adresser vos commandes (coupon ou
papier libre) avec le règlement sous enveloppe

NON AFFRANCHIE – à l'adresse suivante :

**LIBRE RÉPONSE 19 345
94 309 VINCENNES CEDEX**

Pour un envoi à l'étranger, pour payer par carte bleue par téléphone ou pour tout renseignement,
vous pouvez contacter une opératrice au **01-75-43-09-09** (+331-75-43-09-09 de l'étranger)

Ces informations ne sont utilisées que pour les besoins de la commande. Nous nous engageons à ne jamais communiquer vos coordonnées postales ou électroniques à des tiers.

NOM

PRÉNOM

ADRESSE

CODE POSTAL

VILLE

E-MAIL

LE MONDE DES Sciences

Version Digitale

Retrouvez notre magazine
en version **PDF** sur

 **lekiosk**
www.lekiosk.com

 **zinio**TM
fr.zinio.com

 
dans les Digitab à bord du train



 Disponible sur
App Store

 Disponible sur
Android

Également
sur vos ordinateurs



**ENFIN
DISPONIBLE !**

Retrouvez l'**APPLI** du magazine
en version enrichie
sur toutes les tablettes !

 Disponible sur
App Store

Tablettes iPad 1, 2 et 3

 Disponible sur
Android

Tablettes Nexus, Acer,
Samsung Galaxy, etc.

facebook

www.facebook.com/monde.sciences

PROCHAINEMENT

Découvrez nos
prochaines applis
sur notre page
facebook



Google Apps
amazonkindle



LA VOIX

l'expo qui vous parle



**DU 10 DÉCEMBRE 2013
AU 28 SEPTEMBRE 2014**

cite-sciences.fr @ porte de la Villette