MATHÉMATIQUES
Le théorème du sudoku

PORTFOLIO
Les trésors minéraux du Muséum

ASTROPHYSIQUE
Les bulles géantes de la Voie lactée

POUR LA SCIENCE

Janvier 2015 - n° 447 | www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Ces bactéries qui nous gouvernent

STRESS, OBÉSITÉ, DIABÈTE, AUTISME...

Un déséquilibre de la flore intestinale ?

M 02687 - 447 - F: 6,20 € - RD

Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € -Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 € - Guyane /S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 €
Maroc : 60 MAD - Martinique /S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 980 XPF - Polynésie Française /S : 980 XPF - Portugal : 7,20 € - Réunion /A : 9,30 € - Suisse : 12 CHF.

Permettre à votre épargne de faire des petits c'est aussi ça GMF.

Une épargne performante et sûre pour préparer les projets de demain. Avec les contrats d'assurance vie et les supports en euros GMF, vous vous constituez petit à petit une épargne performante qui vous permettra de financer tous vos projets d'avenir, en toute sécurité.

Trophée d'or «2014» des Contrats d'Assurance Vie
Le Revenu
MULTÉO
Catégorie contrats et fonds en euros

Rendez-vous sur www.gmf.fr
ou appelez le
N° Vert 0 800 88 11 62
APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE

*3,05 %, taux servi en 2013 : frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux pour tous les contrats d'assurance vie en euros GMF et les supports réguliers de Multéo et de Certigo. Les performances passées ne préjugent pas des performances futures.

GMF VIE - Société anonyme au capital de 186 966 736 euros entièrement versé - Entreprise régie par le Code des assurances - 315 814 806 R.C.S. Pontoise
Siège social : 1, rue Raoul Dautry - CS 40003 - 95122 Ermont Cedex.

GMF
ASSURÉMENT *Humain*

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho • L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle
Rédacteur : Sébastien Bohler
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Christian Farnier, Cristiano Ferraris, Eitan Haddok, Aurélie Landet, Lucile Lignon, François Ménard, Christophe Pichon, François Poulet, Elia Saunier, Brigitte Zanda

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr)
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré et Nada Mellouk-Raja. Tél. : 01 55 42 84 04
Abonnement en ligne : **http://www.pourlascience.fr**
Courriel : **abonnements@pourlascience.fr**
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Commande de livres ou de magazines :
Pour la Science - 628 avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr
Canada : Edipresse : 945 avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303 rue du Pré-aux-Oies - 1130 Bruxelles.
Autres pays : Éditions Belin : 8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© **Pour la Science S.A.R.L.** Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2013

Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Microbiotique

Depuis les travaux de Louis Pasteur et de son rival allemand Robert Koch, dans la seconde moitié du XIXe siècle, les bactéries avaient mauvaise presse. On avait prouvé que des germes microbiens transmettent certaines maladies, ce qui a ancré l'idée que les bactéries étaient, pour l'essentiel, des agents pathogènes. Cette idée a aussi été renforcée par les succès de l'hygiène, la lutte contre les micro-organismes ayant permis de réduire considérablement l'impact des maladies infectieuses, du moins dans les pays industrialisés.

Des liens surprenants entre notre flore bactérienne et notre santé physique ou mentale.

Cependant, les microbes ne sont pas tous, ni toujours, malfaisants. L'hypothèse d'un rôle positif a été avancée dès 1903 par le pasteurien Élie Metchnikoff, notamment à propos des bactéries présentes dans les yaourts. Cette face bienfaitrice des bactéries a longtemps paru secondaire et cantonnée aux questions de digestion ou d'alimentation. Mais depuis quelques années, les scientifiques ont radicalement changé leur regard. Ils découvrent avec étonnement des liens de plus en plus nombreux entre notre microbiote, c'est-à-dire l'ensemble des bactéries qui colonisent notre corps, et notre santé, qu'elle soit physique ou mentale.

Comme le détaille notre dossier *(voir pages 25 à 48)*, des modifications de la flore intestinale interviennent dans divers troubles tels que l'obésité, le stress ou l'autisme. Quels sont les liens entre les déséquilibres du microbiote et ces troubles ? Quels sont les mécanismes à l'œuvre ? Ces questions sont au cœur des recherches en cours. Quoi qu'il en soit, de nouvelles perspectives, scientifiques et thérapeutiques, s'ouvrent. Avec une leçon d'humilité : une fois de plus, on découvre que nous dépendons en partie des autres organismes vivants – même quand ils sont microscopiques. ■

sommaire

1 Édito

Actualités

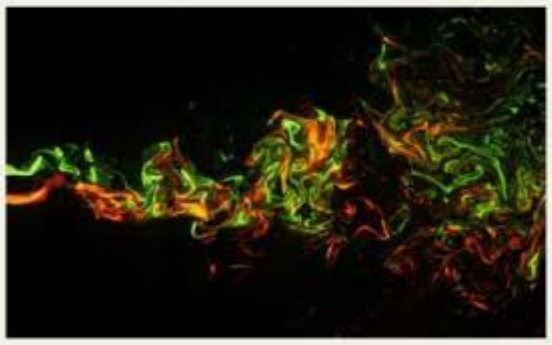
4 *Rosetta* et *Philae* : une mission historique

5 Sida : bientôt un traitement préventif à la demande ?

7 Un bras pas encore néandertalien

8 Une piste pour soigner l'hypersensibilité des autistes

10 Les papillons de nuit ont du nez



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 Point de vue
Santé des jeunes : pour une vraie prévention
Michel Huguier

14 Entretien
Les fonds marins, un Eldorado moins connu que la Lune
Thierry Schmitt

18 Lu sur SciLogs.fr
Apprendre le hasard en observant le monde
Nicolas Gauvrit

21 Homo sapiens informaticus
Quand le corps devient réseau
Gilles Dowek

22 Cabinet de curiosités sociologiques
Le dilemme du vaccin
Gérald Bronner

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement Pour la Science brochés sur la totalité du tirage ainsi qu'un supplément spécial de 64 pages « Les nouveaux défis de l'innovation » diffusé gratuitement avec le tirage kiosque et abonnés de France Métropole uniquement.
En couverture : © Blan-k/shutterstock.com ; Pour la Science

DOSSIER p. 25

Ces bactéries qui nous gouvernent

STRESS, OBÉSITÉ DIABÈTE, AUTISME...

Un déséquilibre de la flore intestinale ?

26 IMMUNOLOGIE
Nos bactéries et nous : un subtil équilibre
Gérard Eberl

Notre organisme est peuplé de centaines de milliards de bactéries. Pourquoi notre système immunitaire ne les élimine-t-il pas ? Parce qu'il est sans doute bien plus qu'une armée de cellules et de molécules tueuses...

34 MÉDECINE
Obésité : la flore intestinale mise en cause
Philippe Gérard

Certains microbiotes intestinaux favorisent le développement de l'obésité et des pathologies associées, tel le diabète. Modifier leur composition pourrait aider à combattre ces maladies.

42 PHYSIOLOGIE
Les maladies mentales viennent-elles du ventre ?
V. Daugé, M. Jaglin, L. Naudon et S. Rabot

Les indices d'une implication des bactéries intestinales dans certaines maladies mentales s'accumulent. Faut-il soigner celles-ci par le ventre plutôt que par le cerveau ?

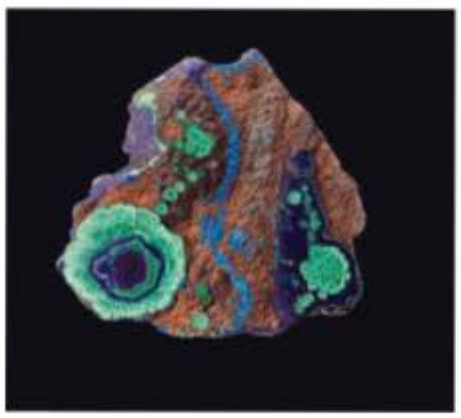
© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

50 ASTROPHYSIQUE
Voie lactée : le mystère des bulles géantes
Douglas Finkbeiner, Meng Su et Dmitry Malyshev

Par hasard, des astrophysiciens ont découvert des bulles gigantesques d'émission de rayons gamma qui s'échappent du centre de notre Galaxie. D'où viennent ces structures étonnantes ?

56 PORTFOLIO MINÉRALOGIE
Trésors de la Terre
Maurice Mashaal

La Galerie de minéralogie du Muséum, à Paris, rouvre ses portes au public en exposant plusieurs centaines de ses plus beaux spécimens.



64 INFORMATIQUE
Comment se protéger de Big Brother ?
Alex Pentland

À l'ère des données massives, nos vies entières se retrouvent sur Internet. Comment éviter qu'elles soient surveillées sans le moindre contrôle ? En suivant trois principes.

Rendez-vous

70 Histoire des sciences
Des *Mille et une nuits* aux oiseaux géants malgaches
Eric Buffetaut

L'oiseau Roc rencontré par Sinbad le Marin a-t-il existé ? Probablement pas, mais il a pu être inspiré par les œufs géants d'une espèce éteinte, signalée à Madagascar au XVIIe siècle.

76 Logique & calcul
Le problème du sudoku
Jean-Paul Delahaye

La donnée de 16 chiffres dans une grille de sudoku est insuffisante pour que la solution du problème soit unique. On a pu le prouver.

82 Science & fiction
Respirer... comme un poisson dans l'eau
J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

84 Art & science
Claude à la plage
Loïc Mangin

86 Idées de physique
L'œuf dur et la toupie-bascule
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

89 Questions aux experts
Pourquoi l'IRM est-elle si bruyante ?
Cyril Poupon

91 Science & gastronomie
Le sel et sa perception
Hervé This

92 À lire

96 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

Aussi en numérique !

POUR LA SCIENCE.fr

Archives depuis 1996

Application Smartphone et Tablette

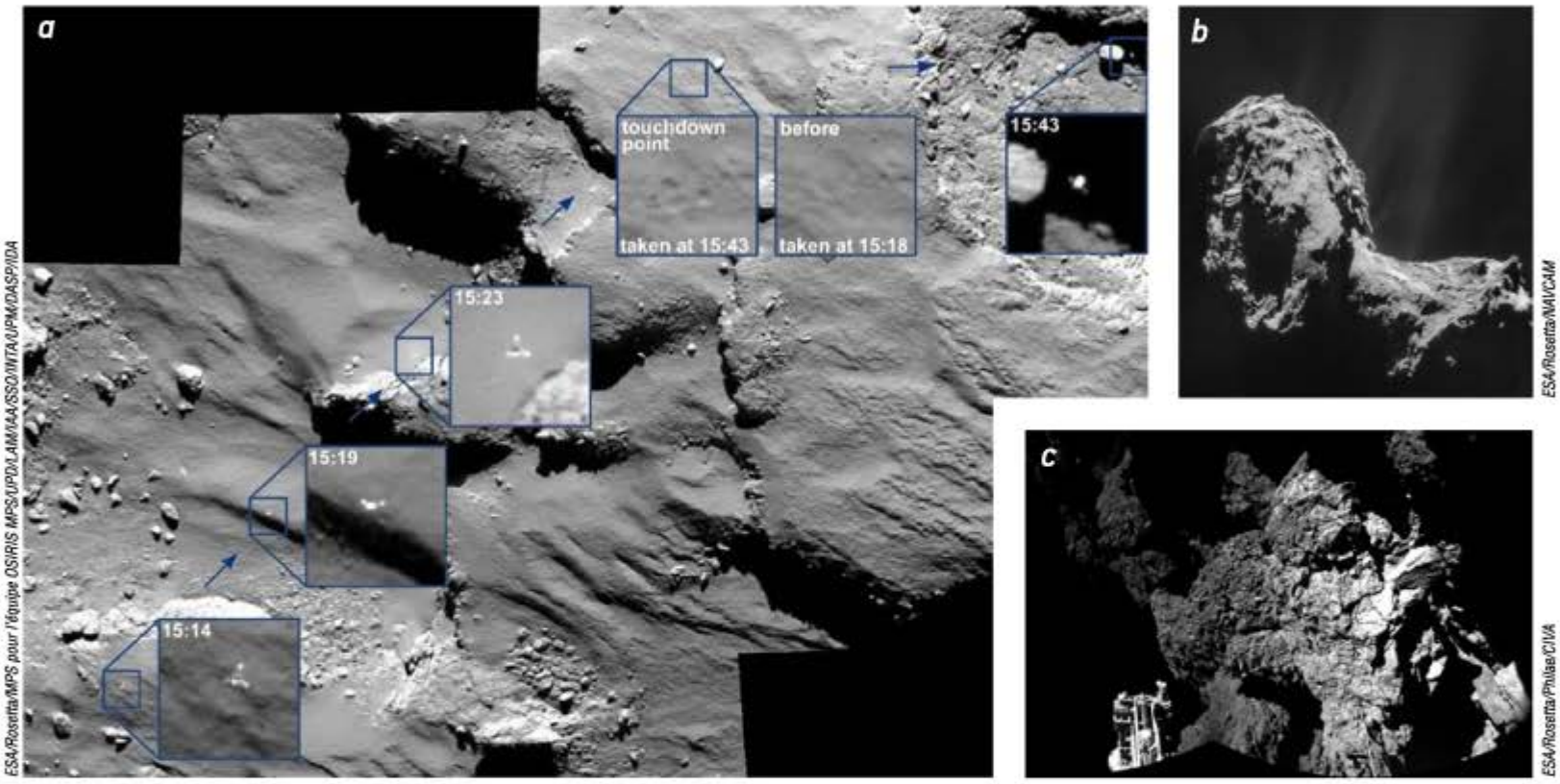
Suivez-nous sur les réseaux sociaux

Actualités

Astronomie

Rosetta et *Philae* : une mission historique

L'atterrisseur Philae, après un voyage de presque dix ans à bord de la sonde Rosetta, s'est posé à la surface de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko. Un exploit plein de rebondissements...



L'atterrissage *(a)* de *Philae* sur la comète *(b)* a été suivi par la caméra Osiris de *Rosetta*. On aperçoit *Philae* lors de sa descente *(trois images de gauche)*. Les deux vignettes suivantes montrent que le module a laissé des traces au point d'atterrissage, mais a rebondi et s'est dirigé vers l'Est *(vignette de droite)*. La caméra CIVA de *Philae* a photographié la surface de la comète et un pied de l'appareil *(c)*.

En mars 2004, une fusée Ariane 5 a décollé de la base de Kourou, en Guyane française, avec à son bord la sonde *Rosetta* de l'ESA (l'Agence spatiale européenne). Près de dix ans plus tard, le 6 août 2014, la sonde s'est mise en orbite autour de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko. Avec une dizaine d'instruments à son bord, elle a révélé les paysages impressionnants et exotiques de la comète. Le 12 novembre, *Rosetta* s'est séparée de l'atterrisseur *Philae*, lequel s'est posé sur l'astre à 16 h 35, heure de Paris.

La sonde *Rosetta* et l'atterrisseur *Philae* s'inscrivent dans un vaste programme d'étude des comètes. Ces « boules de neige sale » ont préservé le matériel primordial des débuts du Système solaire. Les informations collectées par les instruments de la sonde permettront de mieux comprendre la formation de ce système. Les astrophysiciens espèrent mesurer les principales caractéristiques physiques et chimiques de la comète grâce aux différentes caméras, spectromètres et analyseurs de la sonde. Et pour observer d'encore plus près la comète « Tchoury », l'ESA avait décidé de s'y poser avec *Philae*.

L'opération, délicate et inédite, n'a pas été de tout repos pour les membres de la mission. *Philae* s'est décroché de *Rosetta* à environ 20 kilomètres d'altitude au-dessus de la comète. La descente s'est effectuée lentement, à environ trois kilomètres par heure. Le risque était que l'appareil rebondisse en atterrissant en raison de la faible gravité de la comète. Un dispositif constitué de deux harpons devait arrimer *Philae* au sol. Or ces grappins n'ont pas fonctionné... L'appareil a alors rebondi deux fois : un premier bond a duré près de deux heures sur une distance d'un kilomètre puis un second, plus court, a mené *Philae* au pied d'une corniche. Après une longue période d'angoisse écoulée pour comprendre ce qui s'était passé, les ingénieurs et les scientifiques ont pu s'assurer que l'appareil était en bon état et pouvait finalement accomplir la majeure partie de son programme scientifique.

En réalité, plusieurs instruments de l'atterrisseur fonctionnaient déjà pendant ses rebonds et ont fourni des données sur le champ magnétique et la structure interne de la comète. Au sol, les caméras CIVA ont enregistré les premières images de l'environnement de *Philae* et ont révélé deux problèmes : l'appareil n'était pas posé à plat (seuls deux pieds sur trois touchaient le sol) et il se trouvait dans une zone ombragée ne présentant que 1,5 heure d'éclairement sur les 4 heures de jour effectif sur la comète. L'équipe a donc reprogrammé la séquence des opérations scientifiques pour économiser

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

l'énergie disponible et repousser les mesures risquées à la fin de la séquence d'observations.

Malgré un atterrissage compliqué, *Philae* a accompli sa mission et ses différents instruments ont pu recueillir de nombreuses données. Par ailleurs, la procédure de forage pour prélever de la matière du sol cométaire avait été reprogrammée en dernier, car la stabilité de *Philae* n'était pas connue. La manœuvre s'est exécutée, mais les données ne permettent pas de savoir si un échantillon de sol a été analysé par le dispositif COSAC. Néanmoins, cet instrument a détecté des molécules organiques complexes, formées d'au moins trois atomes de carbone et provenant soit d'un échantillon de sol, soit du gaz environnant. Les astrophysiciens procèdent maintenant à l'analyse des données et la publication de certains résultats est prévue pour la fin janvier.

Que va devenir *Philae* ? Avant que sa batterie ne soit totalement épuisée, les membres de l'équipe ont envoyé un jeu d'instructions qui demandait à l'appareil de pivoter de 25 degrés pour améliorer son exposition au Soleil, en vue du rechargement de ses batteries aujourd'hui vides. En attendant, *Philae* est en hibernation. D'ici quelques mois, l'ensoleillement de la zone où se trouve l'atterrisseur pourrait augmenter et les batteries se recharger. Cela permettra peut-être à *Philae* de se réveiller. Les astrophysiciens programment déjà la nouvelle séquence d'opérations scientifiques à effectuer. Et en attendant un éventuel réveil de *Philae*, la sonde *Rosetta* continue, en orbite, sa moisson de données au moins jusqu'en décembre 2015.

Sean Bailly

http://sci.esa.int/rosetta/

Médecine

Sida : bientôt un traitement préventif à la demande ?

Les premiers résultats de l'essai Ipergay de l'Agence nationale de recherche sur le sida, lancé en France il y a trois ans et visant à évaluer l'intérêt d'un traitement préventif avant les rapports sexuels, viennent d'être rendus publics. Éclairage de Jean-Michel Molina, médecin à l'hôpital Saint-Louis, à Paris, et coordinateur de l'étude.

En quoi consiste l'essai ?

Jean-Michel Molina : En France, 43 % des 6300 nouvelles découvertes d'infection par le virus VIH chaque année sont observées chez des homosexuels masculins. Et parmi eux, les plus concernés sont les homosexuels masculins ayant de multiples partenaires, lesquels ne savent en général pas qu'ils sont séropositifs. Nous avons donc voulu comparer, dans cette population, l'efficacité d'une prévention la meilleure possible, avec remise de préservatifs et de gel microbicide, dépistage et traitement des infections sexuellement transmissibles, et de la même prévention à laquelle on ajoute un traitement pré-exposition à base de Truvada, un antirétroviral parmi les plus efficaces et les mieux tolérés, utilisé depuis 15 ans chez les personnes séropositives. L'étude a été menée en double aveugle : ni les participants ni les médecins ne savaient si le traitement donné était le Truvada ou un placebo.

Quels résultats avez-vous obtenus ?

J.-M. M. : La prévention avec traitement pré-exposition a été plus efficace. Le mode d'administration choisi dans l'étude – une prise à la demande, avant les rapports sexuels – semble même plus efficace encore que la prise en continu, validée par les études récentes Iprex (internationale) et Proud (Royaume-Uni).

Pourquoi rechercher un autre moyen préventif que le préservatif ?

J.-M. M. : Le préservatif est la sécurité totale… quand on l'utilise. Beaucoup de gens l'utilisent, mais pas tout le temps, pas pour tous les types de rapports. Parfois, la personne n'est pas en situation de négocier le préservatif. D'autres nous disent qu'avec lui, elles n'ont pas d'érection. Il y a donc un besoin de faire plus. Le traitement pré-exposition est un moyen additionnel de prévention, qui réduit encore les risques de contamination. Il faut certes continuer à prôner l'usage du préservatif, c'est capital pour que l'infection reste cantonnée à certains groupes, mais il faut aussi aller plus loin dans ces groupes.

J.-M. Molina est médecin à l'hôpital Saint-Louis, à Paris.

Ne risque-t-on pas de délaisser le préservatif ?

J.-M. M. : Il est difficile de répondre à cette question. On n'a pas noté de changement majeur du comportement dans l'étude : on a remis des préservatifs à tous les participants et insisté sur leur importance. Certains nous ont dit qu'ils l'utilisaient plus souvent, mais on ne peut le vérifier. La même question se posera si on découvre un vaccin contre le sida. Supposons qu'il protège à 80 % : les gens qui se feront vacciner se risqueront-ils à ne plus utiliser le préservatif ?

Quelle est la suite de l'essai ?

J.-M. M. : Le traitement va être mis à disposition de tous les participants, qui seront suivis encore un an. On veut justement s'assurer qu'ils ne vont pas modifier leur comportement et prendre plus de risques, ce qui, paradoxalement, augmenterait alors le nombre de contaminations.

Le Truvada sera-t-il bientôt disponible en pharmacie à titre préventif ?

J.-M. M. : Les autorités de santé travaillent déjà sur la question. Une chose est sûre, il devra être pris sous supervision médicale, ce qui permettra de détecter vite les contaminations et de les traiter tôt, et de diminuer ainsi les risques de contaminer à son tour. Et il ne suffira pas non plus d'aller voir son médecin pour se voir prescrire ce médicament. Cela devra s'intégrer dans le cadre d'une prévention globale avec le préservatif, la recherche d'infections sexuellement transmissibles, le dépistage du VIH, la tolérance du traitement…

Marie-Neige Cordonnier

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

Fossile de plante carnivore

Eva-Maria Sadowski, de l'Université de Göttingen, et des collègues ont découvert le premier piège à glu de plante carnivore fossile. Il consiste en deux petites feuilles couvertes de glandes, incluses dans un morceau d'ambre de la Baltique. Découvert dans un site d'extraction d'ambre proche de Kaliningrad, ce piège à glu de plante carnivore daterait d'il y a entre 35 et 47 millions d'années. Auparavant, les preuves de l'existence ancienne de plantes carnivores consistaient seulement en pollen et graines de Drosera.

Le fer pas si fertile ?

Pour lutter contre les gaz à effet de serre, certains envisagent d'ensemencer les océans en fer. Ils espèrent ainsi stimuler la croissance de plancton végétal, qui absorbe le dioxyde de carbone de l'air. Mais cette technique semble moins efficace que prévu. Ian Salter, du CNRS, et ses collègues ont étudié une zone naturellement ensemencée en fer suite au lessivage du sol dans des îles proches. Ils ont montré que d'autres organismes, qui relâchent du dioxyde de carbone, profitent de cette manne, d'où une perte d'efficacité atteignant 30 %.

Solaire à haut rendement

Le Leti (CEA), la société Soitec et l'Institut Fraunhofer pour les systèmes énergétiques solaires, à Fribourg, viennent d'annoncer la mise au point d'une cellule solaire à multijonctions qui convertit 44,7 % de l'énergie solaire reçue en énergie électrique. Composée de plusieurs jonctions semi-conductrices empilées les unes sur les autres, cette cellule absorbe dans les différentes régions du spectre solaire. La percée résulte de l'invention d'une nouvelle technique de croissance cristalline permettant d'empiler des matériaux semi-conducteurs différents afin de parvenir à une combinaison efficace.

Biologie cellulaire

Pourquoi certains vieillissent-ils moins vite ?

Certains sexagénaires tiennent une forme de jeune homme, tandis que des trentenaires font parfois 20 ans de plus. Xavier Manière, de l'Inserm, et ses collègues ont apporté un éclairage sur les inégalités face au vieillissement, grâce à des expériences sur des nématodes *Caenorhabditis elegans* (de petits vers).

Selon le biologiste américain Earl Stadtman, le vieillissement résulte de l'oxydation progressive des protéines, qui se dégradent et accomplissent de moins en moins bien leurs fonctions. Après avoir développé une méthode pour caractériser l'âge biologique des nématodes, X. Manière et ses collègues ont analysé leur richesse en protéines « chaperonnes », qui préservent les autres protéines de toutes sortes de stress. On pensait que plus une cellule était riche en protéines chaperonnes, moins elle vieillissait vite.

Or les biologistes ont montré que les nématodes les plus « jeunes » n'étaient pas ceux qui avaient le plus de protéines chaperonnes, mais ceux qui présentaient la plus grande quantité de facteurs de transcription associés : ces derniers sont des molécules qui se fixent sur le génome et déclenchent la production de protéines. Une grande quantité de facteurs de transcription indique alors que la cellule est prête à synthétiser rapidement des protéines chaperonnes lors d'un stress. Selon X. Manière, « Les organismes qui vieillissent moins vite ne sont pas ceux qui sont bardés de défenses toutes prêtes, mais ceux qui sont les plus réactifs face aux agressions. »

© eemosiva/Shutterstock.com

Guillaume Jacquemont

Experimental Gerontology, vol. 60, pp. 12-17, décembre 2014

Insolite

Des fluides se font pousser des ailes

Lorsqu'un jet de fluide viscoélastique est projeté contre une paroi proche et à grande vitesse contre une paroi, des sortes d'ailes se forment le long du jet. Pourquoi ? Henri Lhuissier, de l'Université Paris Diderot, et ses collègues ont montré que dans le jet, les polymères du fluide sont soumis à une force de cisaillement. Cette tension est réduite quand les polymères prennent la diagonale, raccourci qui forme les ailes du jet.

H. Lhuissier et al./Université Paris Diderot

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

Paléontologie humaine

© Denis Gliksman, Inrap

Un bras pas encore néandertalien

Un bras gauche prénéandertalien a été retrouvé dans un méandre de la Seine. Il confirme que la néandertalisation battait son plein en Europe il y a 200 000 ans.

Un bras arraché, puis emporté par le fleuve, qui s'échoue dans un coude… de la Seine il y a 200 000 ans. Voilà en substance l'histoire que l'équipe de Jean-Philippe Faivre, de l'Inrap, a racontée aux journalistes en octobre 2014 après la découverte d'un bras prénéandertalien dans une sablière de Tourville-la-Rivière, en Seine-Maritime. L'enthousiasme suscité chez les chercheurs par cette trouvaille a étonné plus d'un journaliste. Pourquoi est-elle importante ?

À considérer les restes humains en question – trois petits fragments osseux dans un piètre état de conservation, qui proviennent d'un humérus, d'un cubitus et d'un radius –, la question est légitime. En fait, ces restes sont sensationnels pour les chercheurs de par leur âge : les datations par radiométrie et par résonance paramagnétique électronique les situent entre 236 000 et 183 000 ans. C'est peu ou prou les dates du stade isotopique marin 7 (247 000 à 191 000 ans), une période interglaciaire au climat tempéré, mais froid. Or, pour le Pléistocène moyen (780 000 à 128 000 ans), nous ne connaissions en Europe qu'une quinzaine de sites de fossiles humains.

Bruno Maureille, du CNRS et de l'Université de Bordeaux, qui a participé à l'étude des os de Tourville-la-Rivière, a constaté qu'ils associent des caractères archaïques, antérieurs aux Néandertaliens, à des traits spécifiquement néandertaliens, tels que la position de l'insertion du muscle deltoïde.

Détail intéressant, une crête au relief anormal sur l'humérus, à laquelle venait se rattacher le muscle deltoïde, suggère que l'individu avait fait au cours de sa vie des mouvements répétés éloignant le bras de l'axe du corps. Des lancers de sagaies sur du gibier ? D'après la taille de ses os, l'individu de Tourville-la-Rivière était sans doute un grand adolescent ou un adulte. Les paléoanthropologues n'ont pu déterminer son sexe. Quoi qu'il en soit, B. Maureille a conclu qu'il s'agissait d'un membre de la lignée néandertalienne. La conclusion à laquelle on s'attendait !

Dès lors, en quoi est-ce intéressant ? Les Néandertaliens pleinement caractérisés commencent à apparaître dans le registre fossile il y a 150 000 ans en Europe, en même temps que les *Homo sapiens* en Afrique. Nous savons que les Néandertaliens sont une évolution des *Homo heidelbergensis*. Toutefois, sur les fossiles de 450 individus ayant permis de caractériser la lignée néandertalienne, seuls ceux des 15 sites évoqués plus haut concernent la période durant laquelle les traits néandertaliens sont progressivement apparus chez les Européens du Pléistocène moyen. Pour le stade isotopique marin 7 qui clôt cette période, on ne connaît en France que deux sites, celui de Biache-Saint-Vaast (180 000 ans) et celui de La Chaise (Abri Suard, autour de 200 000 ans).

Les fossiles de Tourville-la-Rivière viennent donc s'ajouter à ce maigre échantillon, et confirment que les traits néandertaliens étaient en train de s'accumuler chez les anciens Européens. Ainsi, le bras de Tourville-la-Rivière confirme pour les paléoanthropologues la néandertalisation, c'est-à-dire le modèle d'accrétion des traits néandertaliens échafaudé à partir d'indices parcellaires accumulés pendant 150 ans. Il y a 200 000 ans, la néandertalisation était en marche !

François Savatier

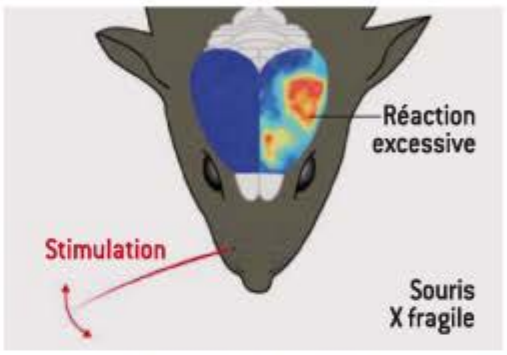
PLoS One, 8 octobre 2014

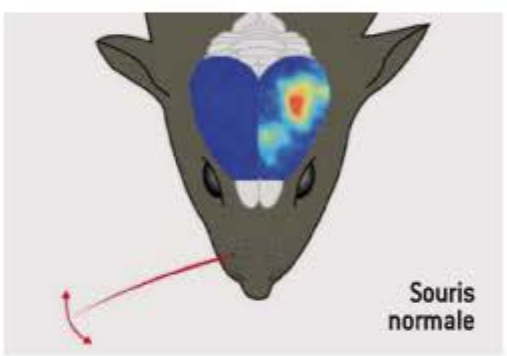
Le bras prénéandertalien de Tourville-la-Rivière est représenté par trois os mal conservés *(à droite)*. Une crête anormale visible sur l'humérus, là où s'attache le muscle deltoïde *(à gauche, flèche)*, suggère une sollicitation de ce muscle par un mouvement répétitif. Au sommet de cette crête, une pathologie de l'insertion ligamentaire traduit un traumatisme plus violent lors d'un mouvement.

Neurobiologie

Une piste pour soigner l'hypersensibilité des autistes

Des biologistes ont identifié la cause de l'hypersensibilité sensorielle qui touche un grand nombre d'autistes et ont réussi à la corriger chez la souris.





© milaphotos, Shutterstock.com/ Isabelle Férézou, Guillaume Bony, Andréas Frick

Les aires cérébrales sensorielles de nombreux autistes s'activent plus que la normale, comme on le constate sur une souris « X fragile » (une forme particulière d'autisme) dont on touche la moustache *(à droite)*.

1 homme sur 3 000

et 1 femme sur 6 000 environ sont victimes du syndrome de l'X fragile, rattaché aux troubles du spectre autistique.

Avez-vous déjà été ébloui par des néons de supermarché au point que cela en devienne douloureux ? De nombreux autistes sont victimes d'une hypersensibilité sensorielle de ce type, susceptible d'affecter tous les sens – le simple fait de porter un vêtement peut être désagréable quand le sens du toucher est concerné. L'équipe d'Andréas Frick, à l'Inserm, a découvert les mécanismes cérébraux en cause et réussi à résoudre le problème chez un modèle de souris.

Les troubles du spectre autistique touchent plus de 650 000 personnes en France et se manifestent par divers symptômes, tels qu'un manque de sociabilité, des difficultés à communiquer et des comportements répétitifs. Près de 90 % des personnes touchées ont aussi un défaut de traitement de l'information sensorielle, tel qu'une hypersensibilité ou au contraire un manque de sensibilité, voire les deux. Ce défaut peut se révéler très handicapant au quotidien.

Les chercheurs se sont intéressés à l'un des troubles du spectre autistique, le syndrome de l'X fragile, dû à une mutation génétique. Ils ont travaillé sur des souris qui présentent les symptômes et la mutation génétique caractéristiques de ce syndrome. Ils ont d'abord testé la réponse des rongeurs à une stimulation tactile, en leur touchant la moustache ou la patte pendant qu'on mesurait l'activité électrique de leur cerveau. Les neurones de leur cortex somatosensoriel, qui traite les informations tactiles, se sont révélés hyperexcitables, c'est-à-dire qu'ils émettaient plus d'influx nerveux que ceux de souris normales. D'où la réaction excessive aux stimulus sensoriels.

Les chercheurs en ont ensuite cherché les raisons. Le syndrome de l'X fragile est dû à la mutation du gène codant une protéine nommée FMRP. Cette protéine a de multiples actions et des études récentes ont montré qu'elle régule l'activité de certains canaux ioniques. Or ces canaux, qui sont intégrés aux membranes cellulaires et s'ouvrent ou se ferment pour réguler les flux d'ions, sont un élément clef de l'activité des neurones. La mutation du gène de la protéine FMRP pourrait-elle en rendre certains dysfonctionnels ?

C'est bien ce qu'ont trouvé A. Frick et ses collègues. Ils ont identifié deux types de canaux ioniques dont l'activité était perturbée, ce qui conduisait à l'hyperexcitabilité des neurones. En administrant aux souris une substance pharmacologique qui cible certains de ces canaux, les biologistes ont réussi à leur rendre une activité normale et à atténuer l'hypersensibilité des animaux. C'est donc une piste sérieuse pour un nouveau médicament. En outre, certains résultats préliminaires suggèrent qu'agir sur ces canaux ioniques pourrait aussi améliorer d'autres symptômes de l'autisme, tels que les déficiences sociales.

G. J.

Y. Zhang et al., Nature Neuroscience, en ligne le 10 novembre 2014

Géosciences

Bridgmanite : le minéral le plus abondant de la Terre enfin nommé

Saviez-vous que le minéral le plus abondant de la Terre n'avait pas de nom ? Ce silicate de magnésium et de fer – $(Mg,Fe)SiO_3$ – qui représente 38 % du volume de la Terre n'avait pas encore été observé à l'état naturel, car on ne le trouve que dans le manteau terrestre inférieur. Or, selon les critères de l'Association internationale de minéralogie, une telle observation est nécessaire pour nommer officiellement un minéral. C'est désormais chose faite grâce aux travaux de l'équipe de Oliver Tschauner, de l'Université du Nevada. Le minéral prend le nom de bridgmanite en hommage à Percy Bridgman, prix Nobel de physique en 1946 pour l'invention de machines capables de produire des pressions extrêmes utilisées dans l'étude des minéraux.

La bridgmanite n'avait été étudiée qu'en laboratoire dans des dispositifs qui simulent les conditions de haute pression et de température élevée. Elle présente une structure, dite pérovskite, qui assure sa stabilité dans la région du manteau inférieur, entre 660 et 2700 kilomètres de profondeur. Mais elle est instable en surface.

La bridgmanite est prépondérante dans le manteau terrestre et se forme aussi dans les météorites qui subissent des collisions.

© Chi Ma/Caltech

Cependant, la bridgmanite se forme dans d'autres conditions : les collisions de météorites. La pression au point d'impact peut atteindre 24 gigapascals et la température 2300 kelvins. Ces conditions autorisent la formation de bridgmanite et sa stabilisation. Par ailleurs, le retour à une pression et une température normales est si rapide qu'il bloque la décomposition du minéral.

Les géologues ont recherché la bridgmanite dans des météorites en utilisant la microscopie électronique par transmission, mais le faisceau d'électrons altérait l'échantillon et ne permettait pas de caractériser le minéral. O. Tschauner et ses collègues ont utilisé un faisceau de rayons X, qui endommage moins la bridgmanite car son énergie est peu absorbée. Ils ont ainsi pu caractériser le minéral et mettre fin à une quête de près de 50 ans !

S. B.

O. Tschauner et al., Science, vol. 346, pp. 1100-1102, 2014

Diversité des champignons

On trouve des champignons sur tous les continents mais, à la différence des plantes et des animaux, on connaît mal leur diversité. Une équipe internationale autour de Leho Tedersoo, de l'Université de Tartu en Estonie, a effectué des prélèvements dans 365 sites dans le monde et a procédé à un séquençage rapide pour estimer la biodiversité de chaque site et les facteurs en jeu. Les biologistes ont ainsi montré que les facteurs climatiques (précipitations annuelles) et le pH du sol sont les principaux facteurs de biodiversité fongique.

Vision infrarouge

Les récepteurs de l'œil humain ne sont sensibles qu'à la lumière visible. Pourtant, certaines personnes disent voir la lumière provenant de lasers émettant dans le proche infrarouge. Krzysztof Palczewski, de l'Université Case Western Reserve, aux États-Unis, et ses collègues ont compris comment : les photorécepteurs de l'œil peuvent être excités lorsque deux photons infrarouges arrivent simultanément et additionnent leur énergie.

Astrophysique

Naissance précoce d'un système planétaire

L'observation de l'étoile *HL Tauri* grâce au réseau d'antennes ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*) marque une nouvelle étape dans la précision des images en astrophysique.

Autour de cette jeune étoile d'environ un million d'années et distante de 450 années-lumière, on distingue nettement des sillons dans le disque protoplanétaire, peut-être tracés par des planètes. Les astrophysiciens ne pensaient pas que les planètes pouvaient se former si rapidement. Il faudra probablement revoir les modèles de formation des systèmes planétaires tels que le Système solaire.

ALMA est un observatoire international situé à 5000 mètres d'altitude dans le désert de l'Atacama, au Chili, et composé de 66 antennes. L'observation dans la gamme d'ondes millimétriques a permis de percer l'enveloppe de gaz et de poussière, opaque à la lumière visible, qui entoure l'étoile. En effet, une étoile se forme lors de l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz et de poussière. Au centre, l'accumulation de matière donne naissance à l'astre et le reste du gaz et de la poussière se structure en un disque, dit protoplanétaire. Dans ce disque, les molécules et les grains s'entrechoquent, s'agglomèrent et forment des amas de la taille de cailloux, puis de rochers, pour donner des comètes, des astéroïdes et des planètes.

Comment expliquer la formation précoce de planètes autour de *HL Tauri* ? Le disque de ce système étant très massif et instable, une planète pourrait se former assez rapidement par effondrement local de la matière. Mais on envisage aussi d'autres hypothèses et l'image d'ALMA montre que les astronomes ont encore beaucoup à découvrir sur les systèmes protoplanétaires jeunes et sur la formation du Système solaire.

S. B.

www.eso.org/public/news/eso1436/

ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

L'étoile *HL Tauri*, au centre de l'image, est entourée d'un disque protoplanétaire où l'on discerne des sillons tracés par des planètes.

Vue d'artiste sur : http://bit.ly/1FBzfWt

La foudre est sur nous !

Avec le réchauffement climatique, la fréquence de la foudre devrait augmenter de 12 % par degré supplémentaire, selon David Romps, de l'Université de Californie, et ses collègues. Les chercheurs ont montré que la fréquence des éclairs tombés aux États-Unis ces dernières années était proportionnelle au produit de la température de l'air et du taux de précipitation. Ils ont ensuite extrapolé cette relation grâce aux modèles climatiques. L'augmentation de fréquence pourrait atteindre 50 % d'ici la fin du siècle.

Simuler le passé d'El Niño

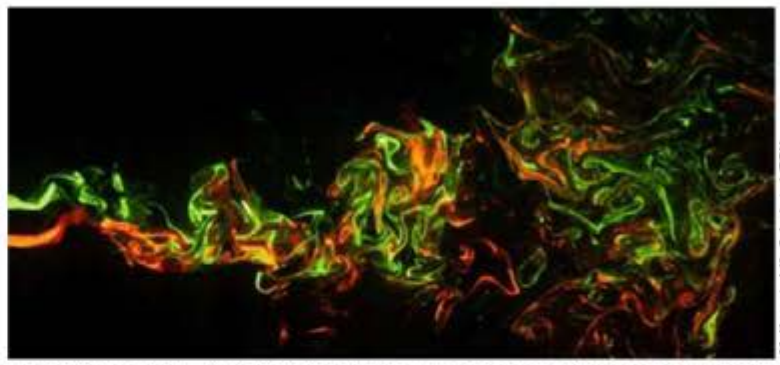
El Niño est un courant saisonnier de l'océan Pacifique qui perturbe le climat de la région. Pour mieux comprendre ce phénomène, l'équipe de Zhengyu Liu, à l'Université de Wisconsin-Madison, a effectué une simulation globale de l'évolution d'El Niño pendant les 21 000 dernières années en considérant divers facteurs. Le modèle indique une baisse de l'amplitude suite à la période de glaciation puis une légère hausse liée à l'augmentation de l'exposition solaire. Des résultats en accord avec les observations disponibles.

Mécanique des fluides

Les papillons de nuit ont du nez

Afin de s'accoupler, les papillons de nuit mâles des familles Saturniidés et Bombycidés recherchent dans l'air des molécules de phéromones émises par les femelles. Une fois le signal détecté, ils volent vers la femelle, distante parfois de plusieurs centaines de mètres. Or ce signal est infime et perturbé par les turbulences de l'atmosphère. Pour étudier le comportement des mâles, il faut reproduire correctement en laboratoire les propriétés du signal tel qu'il serait perçu dans la nature.

Les travaux d'Emmanuel Villermaux, de l'Université Aix-Marseille, et deux collègues de l'Institut Pasteur à Paris vont permettre de mieux simuler la propagation des molécules en milieu naturel. Pour analyser le comportement de diffusion des molécules émises par le papillon femelle, ils ont étudié les propriétés statistiques et quantitatives qui caractérisent le signal, grâce à des analyses théoriques et à des simulations numériques.



M. Kree et al./A. Celani et al./PRX

Un papillon de nuit mâle détecte les phéromones émises par une femelle (souvent un mélange de deux composés, en vert et orange dans cette simulation) à plusieurs centaines de mètres. Les propriétés statistiques des effluves parvenant à l'insecte ont été étudiées.

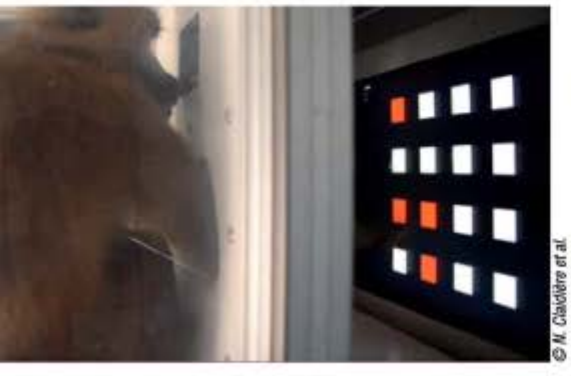
En prenant en compte la sensibilité aux phéromones du mâle du bombyx du mûrier *(Bombyx mori)*, qui est d'environ 200 molécules par centimètre cube, E. Villermaux et ses collègues ont montré qu'à quelques centaines de mètres de la femelle, les bouffées dont la concentration dépasse le seuil de sensibilité du mâle durent quelques millisecondes et se propagent souvent par paquets. Un mâle qui détecte un tel signal vole alors contre le vent pour rejoindre la femelle. Lorsqu'il perd le signal, il change d'attitude et se déplace plus aléatoirement pour retrouver la piste.

S. B.

Physical Review X, vol. 4, 041015, 2014

Psychologie animale

La culture cumulative n'est pas le propre de l'homme



© N. Claidière et al.

Un motif de quatre carrés rouges est présenté à un singe, puis tous les carrés redeviennent blancs. Le singe doit alors toucher ce qu'il pense être l'ancien emplacement des carrés rouges.

Usage d'outils, chants particuliers, etc. : chez de nombreux animaux, des traits culturels se transmettent. Mais les dépositaires successifs améliorent-ils peu à peu ce qu'ils ont reçu, à l'instar de la lignée humaine ? Nicolas Claidière et Joël Fagot, de l'Université d'Aix-Marseille, et leurs collègues ont montré pour la première fois que des primates non humains en sont capables.

Ces chercheurs ont conçu une tâche informatisée où l'on utilise la production d'un participant comme entrée pour le participant suivant. Chez l'homme, on applique par exemple cette méthode avec des langages simplifiés : le premier sujet doit apprendre un langage puis le transmettre au deuxième, et ainsi de suite. Ici, l'élément transmis aux participants était un motif particulier. Une grille de carrés comprenant quatre carrés rouges était présentée à un babouin sur un écran tactile, puis tous les carrés devenaient blancs et l'animal devait toucher l'emplacement de ceux qui étaient rouges auparavant *(voir l'image ci-contre)*. Il recevait une récompense s'il avait trois ou quatre bonnes réponses, puis le motif de quatre carrés qu'il avait touché était présenté au participant suivant.

Les chercheurs ont observé les trois caractéristiques d'une évolution culturelle cumulative, qu'on croyait propre aux humains : l'amélioration des performances (les participants successifs réussissaient de plus en plus souvent), la structuration (les motifs évoluaient, finissant souvent par se constituer de cases adjacentes) et la spéciation (chaque chaîne aboutissait à un résultat différent).

G. J.

N. Claidière et al., Proc. Roy. Soc. B, en ligne le 5 novembre 2014

Géophysique

La tectonique a structuré le haut Brahmapoutre

Qui commande, l'érosion ou la tectonique ? Cette question passionne les géologues et l'un des meilleurs endroits au monde pour l'étudier est l'Himalaya, puisque la surrection et l'érosion y sont les plus rapides. Avec ses collègues, Ping Wang de l'Institut géologique de Chine vient de montrer que les gorges du Brahmapoutre tibétain – le Yarlung Tsangpo –, probablement les plus profondes au monde, ont été formées par un soulèvement de la croûte terrestre plutôt que par une incision de celle-ci par le fleuve.

© Ping Wang

Dans sa haute vallée, le Yarlung Tsangpo, le Brahmapoutre tibétain, circule dans un canyon profond formé par la tectonique.

Lorsqu'ils ont étudié des carottages de la vallée, les chercheurs ont en effet eu la surprise de constater la présence d'un ancien canyon interrompu par un seuil rocheux de 500 mètres de haut. La datation du remplissage sédimentaire accumulé en amont de ce seuil a révélé que des mouvements tectoniques l'ont soulevé il y a entre 2,5 et 2 millions d'années. Dans le Yarlung Tsangpo, c'est la tectonique qui domine ! Toutefois, dans l'Himalaya, le soulèvement de la croûte terrestre, en cours depuis 70 millions d'années, est si rapide que l'érosion doit y araser régulièrement les montagnes : ces dernières seraient, sinon, bien plus hautes...

F. S.

P. Wang et al., Science, vol. 346, pp. 978-981, 2014

Archéologie

Les muses de Zeugma

Le corpus somptueux des mosaïques de la ville grecque antique de Zeugma s'enrichit de deux nouvelles œuvres remarquables : une représentation des muses et une autre d'Océanos et de sa femme Téthys.

Zeugma est une cité grecque, dont les restes se trouvent dans la province turque de Gaziantep, sur la rive gauche de l'Euphrate. L'émerveillement que suscitent ses mosaïques continue puisque l'équipe de Kutalmış Görkay, de l'Université d'Ankara, vient de révéler trois mosaïques très bien conservées du IIe siècle avant notre ère.

La première représente les neuf muses. Elle constituait le sol d'une grande pièce au sein d'une maison que les archéologues viennent de nommer la « maison des muses ». Calliope, la muse de la poésie épique et de l'éloquence, y est représentée dans un médaillon central. Comme il est fréquent dans ces représentations, elle porte une couronne d'or attestant de sa suprématie sur ses huit sœurs, représentées dans des médaillons entourant le sien.

La deuxième grande mosaïque montre Océanos avec sa sœur et épouse Téthys, deux titans qui, dans certaines versions de la mythologie, constituent le couple originel géniteur de tous les autres dieux. La mosaïque les représentant est surtout remarquable par l'état de conservation de ses couleurs très vives, qui semble s'expliquer par des éléments de verre spécialement créés pour la réaliser.

F. S.

http://zeugmaarchproject.com/

© Projet archéologique de Zeugma

En haut, les neuf muses. En bas, Océanos et Téthys. Ces œuvres ont été trouvées à Zeugma, dans les fouilles de la maison de Muzalar.

La stratégie de l'anguille électrique

L'anguille électrique chasse en émettant des décharges qui atteignent 600 volts. Kenneth Catania, de l'Université Vanderbilt, a montré que chez les proies, ces décharges activent les neurones commandant les muscles. Elles entraînent alors des contractions involontaires, qui peuvent soit faire bouger l'animal et le faire ainsi repérer par l'anguille, soit le paralyser complètement. Le prédateur prend donc le contrôle de sa proie à des fins de détection ou de capture.

Le cerveau adolescent sourd aux critiques

Les adolescents ont un cerveau qui ne prend pas en compte le point de vue de leur mère lorsqu'elle leur fait des reproches. Kyung Hwa Lee, de l'Université de Pittsburgh, et ses collègues ont fait écouter à 32 adolescents des séquences où leur mère leur parlait de choses banales ou les critiquait, tout en mesurant leur activité cérébrale. Résultat : les critiques réduisent l'activité des zones impliquées dans la régulation des émotions et de la compréhension du point de vue d'autrui.

Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Santé des jeunes : pour une vraie prévention

Afin de lutter contre le binge drinking *et autres addictions des adolescents, la répression ne suffit pas. Une information régulière sur leurs dangers est nécessaire dès l'école primaire.*

Michel HUGUIER

Le projet de loi français relatif à la santé, présenté le 15 octobre 2014 au Conseil des ministres, partait d'une belle ambition : donner « toute sa place à la prévention », favoriser « l'équité des chances face à la prévention, à la nutrition », combattre « le tabac, l'alcool et les autres addictions », en particulier chez les jeunes. Mais les mesures envisagées pour promouvoir la santé chez les enfants et les adolescents sont bien timides comparées aux dérives inquiétantes de ces générations.

Oui, l'alcool est la première cause de mortalité chez les jeunes. Oui, la consommation d'alcool chez les adolescents progresse, aussi bien chez les filles que chez les garçons, en particulier sous forme d'intoxication alcoolique aiguë (*binge drinking*, ou beuverie express). L'enquête ESCAPAD, réalisée en France auprès de 30 000 jeunes de 17 ans, a révélé que 18 % des garçons et 6 % des filles avaient une consommation régulière d'alcool en 2005, et que 2,3 % des jeunes s'étaient adonnés au *binge drinking* au moins dix fois au cours des 30 jours précédant l'étude. Cette pratique est observée à un âge de plus en plus précoce. Outre de dramatiques accidents mortels, la neuroimagerie a montré que cet alcoolisme diminue la matière grise cérébrale, ce qui entraîne un déficit des fonctions cognitives.

Or le projet de loi ne compte qu'une seule mesure contre cette tendance. Elle condamne la provocation directe de l'état d'ivresse chez un mineur, ainsi que l'incitation à l'ivresse. Cette mesure est importante, mais elle n'est que répressive. Rien n'est dit sur l'éducation et sur la prévention, dont il a pourtant été prouvé que le rapport coût-efficacité est bénéfique si elles s'inscrivent dans la durée et sont coordonnées avec des messages émis auprès des parents et relayés par les milieux éducatifs.

En 2012, l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (INPES) a ainsi recensé dans le monde près de 30 interventions dont l'efficacité a été validée par des protocoles expérimentaux. Celles-ci varient selon la classe d'âge. Il peut s'agit d'interventions en milieu scolaire dès l'école primaire impliquant les parents, de programmes impliquant l'école, la famille et la communauté, de campagnes d'affichage et de télévision accompagnant l'intervention à l'école et, pour les plus âgés, d'une comparaison personnalisée de leur consommation avec les valeurs moyennes réelles, sur ordinateur ou en face à face.

LES JEUNES RESTENT PEU INFORMÉS
des conséquences de la consommation d'alcool et des limites de consommation recommandées par l'OMS.

Certes, des efforts de prévention sont faits au collège, mais les jeunes restent globalement peu informés des conséquences de la consommation d'alcool et des limites de consommation recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

De même, le projet de loi prend bien peu en compte la lutte contre la consommation de cannabis. Or celle-ci peut laisser des lésions cérébrales irréversibles lorsqu'elle débute à l'adolescence.

Enfin, à juste titre, le projet de loi rappelle que l'obésité est devenue un sujet majeur de santé publique. En 2009, 6,5 millions d'adultes (âgés de plus de 18 ans) étaient obèses en France, soit 15 % de la population, parmi lesquels 4 % avaient une obésité massive. En 2005-2006, chez les enfants de cinq ou six ans, un surpoids était observé chez 11 % à 14 % d'entre eux, parmi lesquels 3 % étaient obèses. Or l'obésité augmente, entre autres, le risque de diabète de type 2 (multiplié par 10), d'hypertension artérielle et d'infarctus du myocarde (multiplié par 5). Pour l'assurance maladie, le surcoût de l'obésité a été estimé entre 2,1 milliards et 6,2 milliards d'euros, selon que l'on incluait ou non le montant des indemnités journalières, soit 7 % des dépenses de santé en 2008.

Face à ce problème de santé publique, le simple fait de compléter par des graphiques ou des symboles les indications nutritionnelles obligatoires, conformément au règlement de l'Union européenne, paraît dérisoire. N'aurait-il pas été souhaitable d'étendre

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

les mesures contre le tabagisme aux nutriments qui favorisent l'obésité, notamment aux boissons avec sucres ajoutés et à certains aliments vendus comme énergétiques, en interdisant toute publicité ? N'aurait-il pas été souhaitable d'inscrire dans la loi l'extension des réseaux de prévention de prise en charge de l'obésité pédiatrique au-delà des cinq secteurs géographiques où ils existent ? Dans les écoles, n'aurait-il pas été utile de généraliser une éducation nutritionnelle des enfants et de leurs familles, dispensée par des volontaires (médecins scolaires, directeurs, responsables de cantines) dont l'efficacité a été prouvée par l'expérience menée dans deux communes du Pas-de-Calais ? Ne faudrait-il pas augmenter le nombre de médecins scolaires et mobiliser les professeurs d'éducation physique, les mieux placés pour repérer et aider les enfants qui ont une activité physique insuffisante ?

Contrairement à ce que l'on aurait pu espérer, la prévention

La santé des adolescents en France

68 % des jeunes de 17 ans ont déjà fumé et près de la moitié fument régulièrement.

10 % des collégiens ont expérimenté le cannabis.

46 % des jeunes de 17 ans déclarent avoir consommé plus de quatre verres d'alcool en une occasion dans les 30 derniers jours.

18 % des adolescents sont en surpoids, et 4,5 % sont obèses.

27 % seulement des jeunes de 15 ans ont leur calendrier vaccinal à jour.

Sources : C. Dreux, Bull. Ac. Nat. Med., 2014 ; R. Nordmann, Bull. Ac. Nat. Med., 2007

© Shutterstock.com/runzelkorn

en santé chez les adolescents n'est donc pas au cœur de ce projet de loi. Mais ce qui attend ensuite ces jeunes n'est pas plus réjouissant : le projet de loi prévoit « l'expérimentation de salles de consommation à moindre risque » pour les usagers de drogues.

Ces « salles de shoot » sont inutiles. Il existe déjà en France des structures de prévention, d'accompagnement et de soins aux toxicomanes qui ont fait preuve de leur efficacité dans la réduction des risques : la proportion d'usagers de la drogue contaminés par le virus du sida est passée de 30 % dans les années 1990 à 1 % actuellement. De plus, les expérimentations à l'étranger ne sont pas encourageantes. En Allemagne, l'ouverture de tels « centres d'accueil » a été suivie d'une augmentation de 15 % du nombre de toxicomanes. En Australie, l'association *Drug free* a montré que le risque d'overdose était 36 fois plus élevé chez les toxicomanes fréquentant les salles d'injection que chez les autres, la présence d'une équipe médicale incitant le toxicomane à recourir à des doses plus fortes.

Enfin, comme l'a montré l'Académie de médecine, la méconnaissance de la nature des substances injectées ne permet guère de proposer des actions de substitution, voire de sevrage. Et rendre possible l'injection de nouvelles substances de toxicité redoutable, tel le cannabis synthétique, posera des problèmes de responsabilité des pouvoirs publics et des professionnels en cas de complications médicales, voire d'actes délictueux commis sous l'emprise de la drogue.

Il n'est pas trop tard. Le projet de loi sera débattu à l'Assemblée nationale début 2015. Il est encore temps de prendre des dispositions plus concrètes pour développer dès la préadolescence une information sur l'alcoolisme aigu, l'obésité, les drogues, le tabagisme. ■

Michel HUGUIER est membre de l'Académie française de médecine.

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Les fonds marins, un Eldorado moins connu que la Lune

Entretien avec Thierry SCHMITT

Le 20 octobre 2014, la Division des affaires maritimes et du droit de la mer des Nations unies s'est réunie pour étudier les dossiers de divers pays côtiers qui demandent une extension de leurs droits souverains au-delà de leur zone économique exclusive. Ces eaux territoriales, initialement délimitées à 370 kilomètres des côtes, peuvent être étendues sous plusieurs conditions, dont certaines reposent sur des arguments géologiques liés au fonds marins. L'enjeu est économique, avec la possibilité de mettre la main sur diverses ressources minières et pétrolières. Cette procédure soulève un problème : seuls 10 % du plancher océanique ont été cartographiés avec précision par les sonars. La connaissance du fond des océans n'a pas qu'un intérêt économique ; elle permet aussi d'assurer la sécurité des navires et fournit des informations cruciales pour la recherche océanographique. La méconnaissance des fonds marins rend aussi difficiles des tâches telles que la recherche de l'appareil de la *Malaysian Airlines* disparu en mars 2014. Thierry Schmitt, ingénieur au Service hydrographique et océanographique de la Marine française, fait avec nous le point sur la bathymétrie, ses enjeux et ses progrès techniques.

POUR LA SCIENCE

James Gardner, du Centre américain de cartographie des côtes et de l'océan, aurait dit que nous connaissons mieux la surface de la Lune que le fond des océans. Quelle est réellement la situation ?

THIERRY SCHMITT : Les océans couvrent environ les deux tiers de la surface du globe. C'est un milieu que nous pensons connaître : nous y naviguons et nous vivons sur les côtes dont nous exploitons les ressources. Pourtant, on estime que nous avons cartographié seulement environ 10 % des fonds marins avec une bonne résolution – contre la totalité de la surface de la Lune.

En outre, une partie de ces données n'ont pas été acquises avec des techniques modernes. Dans certaines régions, les relevés proviennent de mesures effectuées par les explorateurs du XVIIe et du XVIIIe siècle, tel La Pérouse (1741-1788), faute de données plus récentes. Une part de mon activité au sein du Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) consiste à valoriser l'ensemble des données dont nous disposons et qui couvrent trois siècles de relevés.

La bathymétrie, mesure des profondeurs et reliefs des fonds marins, est aujourd'hui au cœur d'enjeux économiques et scientifiques. Elle implique des investissements importants sur lesquels les États commencent à se pencher. Pour fixer les idées, à effort constant et en considérant les moyens mondiaux actuels, cartographier l'ensemble des fonds marins nécessiterait une campagne de 125 ans environ. Sans compter que la morphologie de certaines régions change rapidement en raison de l'ensablement, de l'érosion, de la migration de dunes sous-marines...

PLS

Ainsi, la difficulté pour établir une carte des fonds marins serait technique ?

T. S. : En partie. Le fond des océans est difficile d'accès. Nos bateaux sont en surface et nous mesurons un relief situé, en moyenne, à plusieurs milliers de mètres de profondeur. La lumière pénètre peu ; nous mesurons la profondeur avec des ondes acoustiques émises par des sonars. Cette technique est coûteuse et ne permet pas de couvrir rapidement de grandes surfaces.

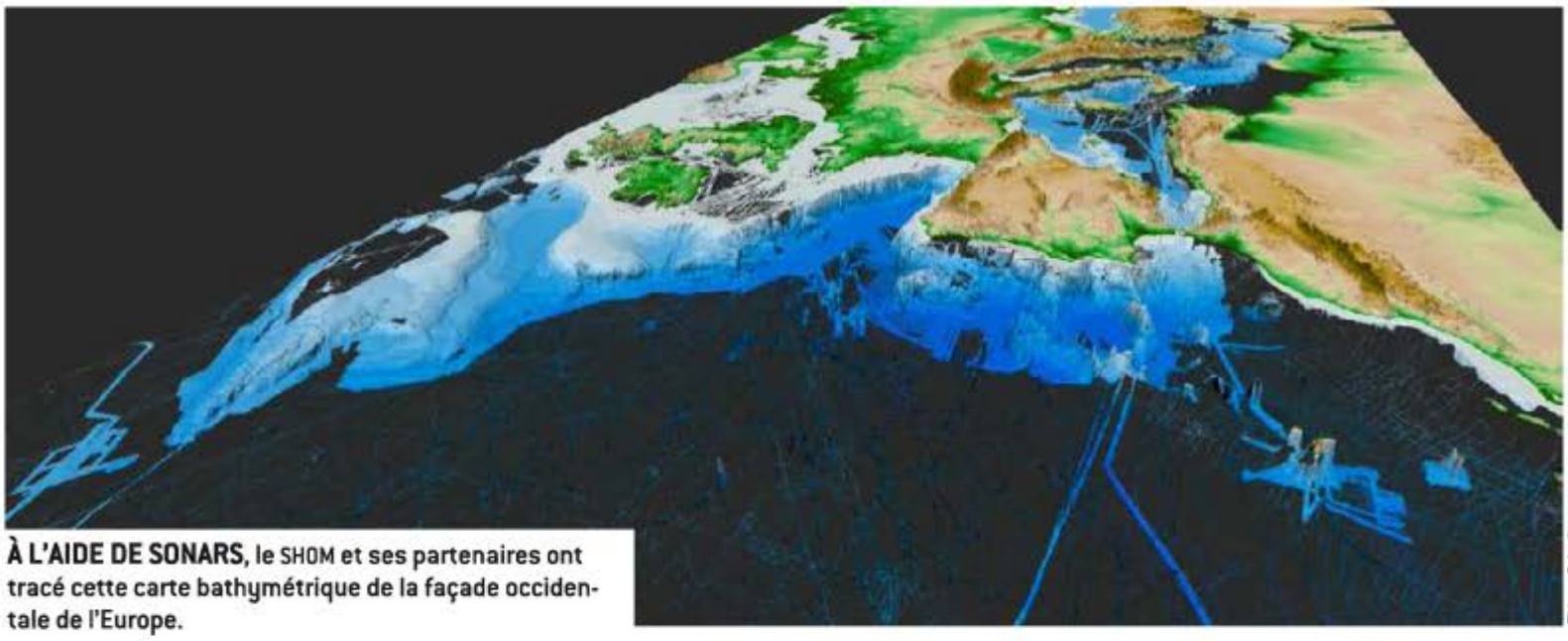
PLS

Comment les États envisagent la question de la bathymétrie ? Quels sont les moyens alloués ?

T. S. : Cela dépend de la politique de chaque pays et de la géographie locale. Cartographier les côtes présente un intérêt immédiat et économique. En revanche, pour la haute mer, le retour sur investissement est moins quantifiable.

À chaque pays ayant un accès à la mer est attribuée une zone économique exclusive (ZEE) sur laquelle l'État exerce sa juridiction et dont il peut exploiter les ressources. Cette région peut s'étendre jusqu'à 370 kilomètres (200 milles nautiques) des côtes. L'Irlande, par exemple, a eu une politique volontariste pour évaluer les ressources présentes dans sa ZEE. Elle en a donc

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015



À L'AIDE DE SONARS, le SHOM et ses partenaires ont tracé cette carte bathymétrique de la façade occidentale de l'Europe.

Thierry Schmitt, SHOM

cartographié 75 % des fonds. Elle valorise cet effort en proposant ces données à des industriels qui veulent installer des éoliennes ou des hydroliennes en mer, ou à des scientifiques qui évaluent les ressources halieutiques et minérales.

La France a la deuxième ZEE par sa taille après les États-Unis, avec près de 11 millions de kilomètres carrés. Deux organismes publics sont missionnés pour en cartographier les fonds. Le SHOM a pour mission d'assurer la sécurité des navires, de soutenir l'action du gouvernement en mer et de soutenir la défense. Il cartographie principalement les régions côtières avec une flotte d'une dizaine de bateaux. L'Ifremer, de son côté, a pour mandat d'évaluer l'exploitation de la mer et s'intéresse donc davantage aux régions situées au large.

À l'échelle internationale, l'Organisation hydrographique internationale et la Commission hydrographique intergouvernementale ont créé la GEBCO (*GEneral Bathymetric Chart of the Oceans* ou Cartographie bathymétrique globale des océans). Ce comité mutualise et rend publiques les données bathymétriques internationales.

PLS

L'intérêt pour la bathymétrie est-il récent ?

T. S. : Dès que l'homme s'est mis à naviguer, il a voulu savoir où il pouvait aller sans risque de s'échouer. C'est pour cette raison que les régions côtières sont les mieux cartographiées. En outre, les mesures de bathymétrie permettent d'évaluer la pertinence de dragages pour, par exemple, assurer un chenal d'accès dans un port. Ainsi, au large du Pas-de-Calais, on observe des dunes sous-marines très mobiles se déplaçant de 5 à 25 mètres par an dont la présence peut modifier les conditions de navigation. Le SHOM cartographie ce site fréquemment pour voir s'il est nécessaire de draguer ses fonds.

Les bateaux ne sont pas les seuls à dépendre des données bathymétriques. Les entreprises qui installent des câbles sous-marins, de télécommunication transocéanique par exemple, utilisent ces mesures afin de déterminer le meilleur trajet des câbles.

PLS

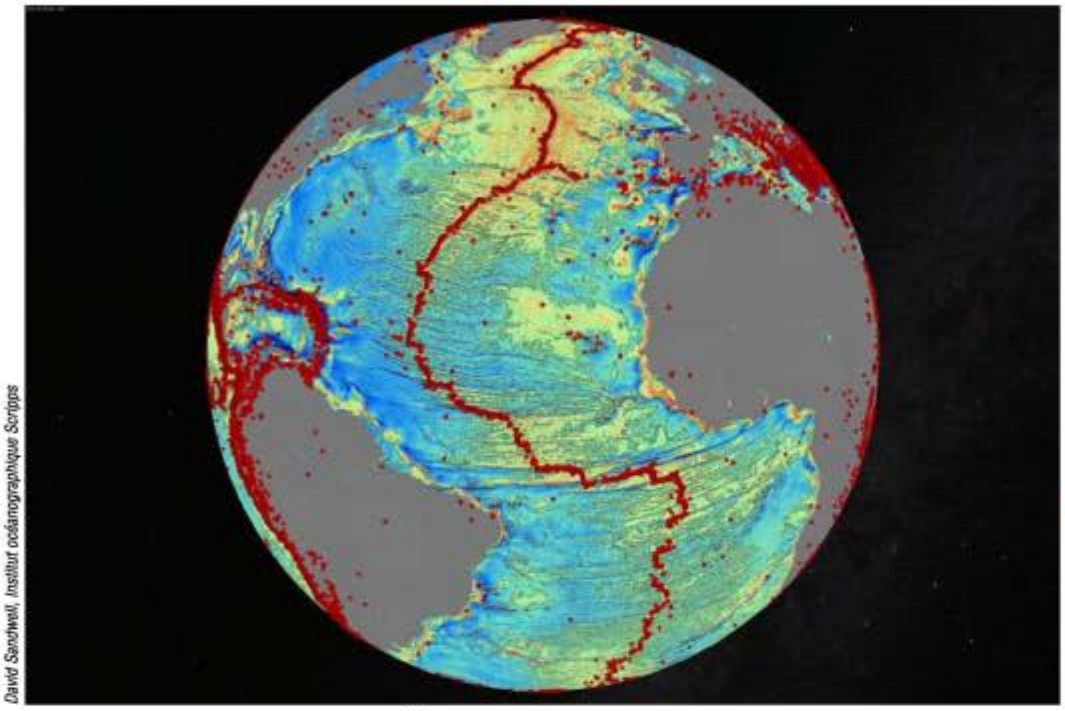
Les fonds océaniques présentent des ressources qui intéressent de plus en plus les industriels. Quel est le rôle de la bathymétrie dans la recherche de pétrole et de gisements de métaux ?

T. S. : Pour la recherche d'hydrocarbures, la bathymétrie n'intervient pas directement. Les réservoirs sont recherchés grâce aux ondes sismiques de basse fréquence. La cartographie du sol sous-marin sert dans un second temps, pour l'installation de la plateforme pétrolière.

La bathymétrie permet aussi aux géologues de discerner les failles qui seraient susceptibles de renfermer certains minerais. En revanche, pour s'assurer de la présence réelle de ces minerais, il faut, encore une fois, recourir aux ondes sismiques, mais aussi à des forages.

Par ailleurs, sur les plateaux abyssaux, entre 4 000 et 6 000 mètres de profondeur, on trouve des nodules polymétalliques. Ce sont des concrétions métalliques qui se forment autour d'un noyau constitué par exemple d'une coquille de plancton ou d'une dent de requin. Ces nodules sont riches en manganèse, nickel, cuivre, cobalt et d'autres métaux rares. Dans les années 1970, différents projets ont été étudiés en vue d'exploiter ces nodules, mais le coût de leur extraction à ces profondeurs rendait ces projets économiquement peu viables. Avec la hausse du prix des métaux, cette source est à nouveau envisagée. Et la bathymétrie permet d'évaluer les zones d'intérêt où il serait possible de trouver des nodules.

En liaison avec les ressources sous-marines, la bathymétrie est devenue ces dernières années un élément essentiel pour diverses négociations géopolitiques et économiques. En effet, depuis la convention de Montego Bay en 1982, un État peut demander à étendre ses droits souverains sur le plateau continental au-delà de sa ZEE. Pour ce faire, il doit prouver que la région revendiquée constitue un prolongement géologique des structures des fonds marins de sa ZEE. Le pays dépose un dossier au siège de l'Organisation des Nations unies, qui l'évalue en prenant en compte les demandes des pays limitrophes. Par exemple, la dorsale Lomonossov s'étend dans l'océan Arctique entre la Russie et le Canada. Les Russes ont demandé l'extension de leur zone souveraine en



David Sandwell, Institut océanographique Scripps

CETTE CARTE DES FONDS DE L'OCÉAN ATLANTIQUE a été obtenue grâce à des mesures de gravimétrie effectuées par les satellites *CryoSat-2* et *Jason-1*. Cependant, la précision, qui est de quelques kilomètres, est insuffisante pour dresser des cartes de navigation.

arguant que la dorsale constitue un prolongement géologique de leur plateau continental. En 2007, la Russie a montré sa détermination en posant un drapeau russe dans la zone revendiquée à plus de 4 000 mètres de profondeur. En 2013, le gouvernement canadien a lancé une nouvelle campagne de cartographie pour déterminer à quel plateau continental se rattache la dorsale. Les enjeux sont évidemment économiques, des hydrocarbures étant présents dans le sous-sol.

PLS

Par quels aspects la bathymétrie a-t-elle aussi une importance pour la recherche océanographique ?

T. S. : Les études océanographiques sont tributaires des données bathymétriques, en particulier pour établir la trajectoire des courants, qui dépendent des reliefs sous-marins. C'est utile par exemple pour le suivi des proliférations de phytoplancton. Ces efflorescences algales peuvent s'étendre sur des centaines de kilomètres et ont un impact sur l'environnement. Elles suivent les courants marins et on ne peut anticiper leur trajectoire que si l'on connaît la dynamique des masses d'eau. On utilise les mêmes méthodes pour modéliser la propagation de polluants, tels les plastiques ou les marées noires.

PLS

Les tsunamis sont-ils aussi influencés par le relief sous-marin ?

T. S. : Tout à fait. D'ailleurs, le SHOM participe à certains programmes de prévention de risques liés aux tsunamis. La configuration sous-marine près des côtes permet d'estimer les zones à risque. Par exemple, si la côte est dépourvue de plateau continental, comme c'est le cas dans le Sud de la France, une grande vague ne sera pas amortie ou freinée et peut menacer le rivage. En revanche, la façade Atlantique, par exemple, est dotée d'un long plateau continental. Un raz-de-marée qui atteint ces eaux de faible profondeur perd en intensité et fera moins de dégâts sur les côtes.

PLS

Venons-en aux techniques utilisées pour cartographier les fonds marins. Le sonar semble être la plus courante. En quoi consiste-t-elle ?

T. S. : Avant le sonar, les techniques étaient rudimentaires : pour déterminer la profondeur, on attachait un plomb à un fil qu'on lâchait dans l'eau. Au cours de la Première Guerre mondiale, le physicien Paul Langevin a développé le principe d'un sonar actif dont l'objectif était principalement de repérer les sous-marins ennemis. Grâce à un matériau piézoélectrique, qui vibre sous l'action d'un champ électrique, ce dispositif émet dans l'eau une onde acoustique. Celle-ci est réfléchie par l'environnement (le fond marin, un rocher, un banc de poissons, un sous-marin...), et une partie revient vers le sonar. En mesurant le temps d'aller-retour de l'onde, on détermine la distance de l'obstacle si l'on connaît la vitesse de propagation de l'onde sonore dans l'eau.

PLS

Quelles évolutions cette technique a-t-elle connues ?

T. S. : Le sonar a été utilisé pour la bathymétrie à partir des années 1930 et est devenu la technique la plus performante. Puis, dans les années 1980-1990, il a encore été perfectionné. Le sonar émettant une onde sonore unique et dirigée à la verticale du bateau a ainsi été remplacé par des sonars multifaisceaux. Plusieurs ondes sont émises simultanément et forment un éventail vertical et perpendiculaire à l'axe du navire, ce qui permet de couvrir une zone plus large lors d'un passage unique.

On adapte aussi les fréquences des ondes. Les ondes de fréquence élevée permettent d'obtenir des mesures de meilleure résolution spatiale, mais elles sont davantage absorbées que les ondes de basse fréquence. La gamme de fréquences utilisées est comprise entre 10 kilohertz et quelques centaines de kilohertz. Le choix dépend de l'usage du sonar. Par exemple, les normes de l'organisation hydrographique internationale imposent une précision inférieure à 25 centimètres sur les zones littorales critiques pour assurer la sécurité de la navigation ; dans ce cas, on opte pour une fréquence élevée.

La nécessité de relevés suffisamment précis pour la navigation pose d'autres problèmes, tels que la position et les mouvements du bateau, la vitesse du son dans l'eau, etc. Une équipe du SHOM étudie ainsi les marées. Elle établit le « zéro hydrographique » qui sert de référence verticale pour les cartes marines ; ce zéro est en général proche, pour chaque lieu, de la plus basse mer astronomique (obtenue à partir des mesures du niveau des marées basses sur 19 ans). Avec cette référence, le marin est assuré de

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

disposer au minimum de la profondeur d'eau affichée sur la carte.

PLS

Hormis la cartographie par sonar, qui reste la technique la plus précise mais qui est lente à mettre en œuvre, existe-t-il des méthodes aériennes, voire satellitaires ?

T. S. : La difficulté majeure pour cartographier le fond des océans est que la lumière visible ne pénètre qu'à 60 mètres au mieux et cela dépend aussi de la turbidité des eaux. Si les conditions sont optimales, en Polynésie française par exemple, où l'eau est peu profonde et assez limpide, on peut utiliser des images aériennes pour estimer la profondeur. Mais cette approche est peu précise.

Une autre possibilité est d'utiliser un lidar aéroporté, un faisceau laser, que l'on oriente et dont on mesure le temps d'aller-retour. Cette méthode est utilisée en topographie terrestre. Dans le cas des océans, on utilise deux lasers ; l'un est réfléchi à la surface et l'autre pénètre dans l'eau. Mais cette technique ne permet pas d'explorer de grandes profondeurs, la lumière du laser étant vite absorbée.

Les satellites peuvent effectuer des mesures de gravimétrie, ce qui permet de dresser des cartes bathymétriques globales, mais de faible résolution, de l'ordre de quelques kilomètres. Cette approche est néanmoins un bon complément au sonar. Le principe est d'abord une mesure altimétrique, où l'on détermine la forme de la surface des océans. En effet, cette surface n'est pas sphérique mais présente des irrégularités du fait des variations locales du champ gravitationnel. Ces variations sont liées à la masse des roches situées sous l'océan. En analysant les mesures altimétriques, on peut déterminer si le relief sous-jacent est une plaine abyssale ou une dorsale. Le satellite TOPEX/*Poseidon* de la Nasa et du Cnes a été précurseur dans ce type de relevés. Récemment, David Sandwell, de l'Institut d'océanographie Scripps, aux États-Unis, et son équipe ont utilisé les données des satellites *CryoSat-2* et *Jason-1*. Ils ont cartographié avec une précision de quelques kilomètres les fonds marins. Ils ont ainsi découvert des structures géologiques jusque-là inconnues.

Cela me permet d'ailleurs de revenir sur l'intérêt de la bathymétrie pour les géosciences. Nous pouvons par exemple observer les traces de glaciation et de déglaciation sur le fond marin. Nous voyons très nettement les limites d'extension de certains glaciers et apportons ainsi des éléments à nos collègues pour reconstruire l'histoire climatique de la planète.

Cartographier avec des petits sous-marins

Les AUV *(Autonomous Underwater Vehicle)* sont des sous-marins robotisés et autonomes. Ils peuvent descendre à de grandes profondeurs pour examiner de près une structure géologique ou de potentiels débris, comme dans le cas de l'avion de la *Malaysian Airlines*. Une flottille de tels sous-marins pourrait contribuer à la cartographie du fond des océans.

PLS

Y a-t-il d'autres méthodes bathymétriques en cours de développement ?

T. S. : On peut mentionner deux approches. La première consiste à étudier le déferlement des vagues sur la côte. Cela nous donne une information sur la profondeur de la mer à proximité immédiate du rivage.

Une autre idée relève de la science participative. Chacun peut contribuer à une base de données en apportant ses propres relevés de profondeur. Le SHOM ne peut pas utiliser ce type de sources pour des cartes de navigation, car il doit garantir l'étalonnage des appareils de mesure pour certifier les données. En revanche, pour l'océanographie, ces données sont parfois les seules disponibles. Cependant, avec cette approche, on récupère des données dans les zones fréquentées et rien ailleurs.

PLS

En mars 2014, un avion de la *Malaysian Airlines* a disparu ; il se serait abîmé dans l'océan. Le manque de données bathymétriques est-il un obstacle pour retrouver l'appareil ?

T. S. : Absolument. L'avion se serait écrasé au Sud-Ouest de l'Australie dans une région d'environ 60 000 kilomètres carrés dans les 40e rugissants. Des navires australiens, chinois et ceux d'une firme privée participent aux recherches. Initialement, ils traquaient les émissions sonores des boîtes noires. Ils cherchent maintenant les débris avec des sonars. Cette région, de profondeur moyenne comprise entre 4 000 et 5 000 mètres, est très mal cartographiée. Il est donc difficile de distinguer les débris des éléments naturels du relief. Il serait possible d'envoyer un sous-marin autonome pour aller voir de plus près, mais sans informations sur la zone, cela revient à chercher une aiguille dans une botte de foin. Il est donc difficile de dire si on retrouvera un jour des fragments de l'appareil. ■

Propos recueillis par Sean BAILLY

■ SUR LE WEB

Le SHOM (Service hydrographique et océanographique de la Marine) met à disposition les données de bathymétrie sur son portail http://data.shom.fr

■ BIBLIOGRAPHIE

D. T. Sandwell *et al.*, **New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure,** *Science*, vol. 346, pp. 65-67, 2014.

X. Lurton *et al.*, **La cartographie acoustique sous-marine,** *Dossier Pour la Science*, n° 32, juillet-octobre 2001.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

Lu sur SciLogs.fr
La plateforme de blogs scientifiques de Pour la Science

Apprendre le hasard en observant le monde

par Nicolas Gauvrit, sur *Raison et psychologie*

Quand on demande à des mathématiciens si la suite de jets de dés « 666666666 » est moins aléatoire que la suite « 152635224 », ils répondent que non, puisque les deux ont exactement la même probabilité de se réaliser. Pourtant, on peut douter que ces mêmes mathématiciens se montrent impassibles s'ils obtiennent la première suite lors d'une partie de dés ! Nous avons tous une certaine intuition du hasard, qui nous dit qu'obtenir neuf fois de suite un 6 est plus étonnant qu'obtenir 1, puis 5, puis 2, etc. Les chercheurs essayent depuis longtemps de comprendre d'où vient cette intuition erronée et sur quoi elle se fonde.

Imaginez des figures formées de grilles de 16 cases, dont certaines sont noires, d'autres blanches *(voir ci-contre)*. Ces motifs sont-ils le fruit du hasard, ou bien leur construction obéit-elle à certaines règles ? Voilà la question que des psychologues ont posée à de nombreux participants depuis des décennies.

On a remarqué depuis longtemps que certaines figures semblent plus aléatoires que d'autres pour presque tout le monde. La première grille en haut à gauche, par exemple, vous paraît sans doute intuitivement peu aléatoire, tandis que celle en bas à droite paraît être le fruit du hasard. Les psychologues ont d'abord cherché des indices permettant de prédire cette intuition. Sur quoi les participants se fondent-ils pour juger du degré d'aléa ? Plusieurs indices ont été avancés, tels le nombre de cases de chaque couleur ou l'étalement des cases noires, mais cela n'expliquait pas tout.

L'idée de beaucoup de chercheurs à l'époque était que la question est simplement absurde. D'un point de vue mathématique, chacune de ces figures a exactement la même probabilité. Aussi, si l'une d'elles semble plus « aléatoire » qu'une autre pour presque tout le monde, c'est que nous avons une vision biaisée du hasard.

Une autre idée a pourtant émergé plus récemment : il y a peut-être quelque chose de rationnel derrière cette perception du hasard.

Certaines de ces figures vous semblent sans doute plus aléatoires que d'autres. Elles sont pourtant équiprobables. D'où vient ce biais de perception du hasard ?

Lorsque vous vous demandez si une figure est aléatoire, vous ne cherchez pas à estimer la probabilité de l'obtenir par hasard, mais plutôt à déterminer la probabilité que cette figure ait été produite par un processus aléatoire. Bien que les deux énoncés se ressemblent, ils ne signifient pas la même chose. Au sens mathématique, la seconde question fait appel à la notion de complexité algorithmique. Brièvement dit, une figure est « complexe » s'il n'existe pas de procédure simple pour la produire.

Il est effectivement apparu que nous avons tendance à considérer une figure comme d'autant plus aléatoire qu'elle est complexe au sens mathématique. Nous avons donc un sens intuitif de la complexité. D'où provient-il ?

Pour le savoir, Anne Hsu, de l'Université Queen Mary à Londres, et ses collaborateurs ont étudié en 2010 la fréquence d'apparition des différents motifs ci-contre dans des photos de scènes naturelles (à l'échelle *une case = un pixel*). Les photographies présentant souvent de grandes zones sombres et de grandes zones claires, les grilles entièrement noires ou blanches, par exemple, apparaissent fréquemment. Les chercheurs ont ainsi montré que la perception du caractère aléatoire d'un motif est corrélée à sa fréquence d'apparition : les grilles qui apparaissent le moins dans les scènes naturelles sont celles jugées les plus aléatoires. À l'inverse, les grilles uniformes, qui apparaissent souvent, sont jugées peu aléatoires… Or elles ont une faible complexité.

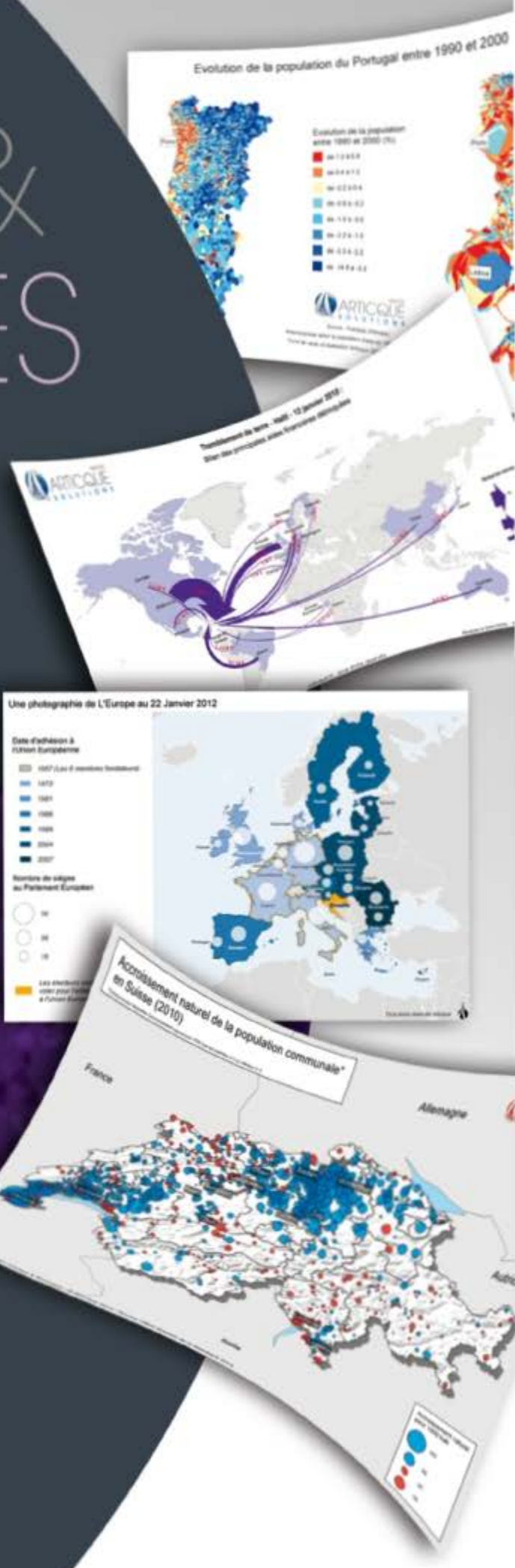
Ainsi, la probabilité d'apparition d'un motif dans le monde réel, sa complexité algorithmique et l'impression de hasard qu'il fait naître en nous sont liées. Nous avons montré récemment que la fréquence d'apparition des motifs dans le monde réel permet d'expliquer une large part de notre perception de la complexité. C'est donc en partie par la confrontation au monde réel que nous développons une certaine idée du hasard, cohérente avec la notion mathématique. ■

Nicolas GAUVRIT est maître de conférences en mathématiques à l'Université d'Artois et psychologue du développement. Il est l'auteur du blog Raison et psychologie (www.scilogs.fr/raisonetpsychologie/).

Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

CARTES & DONNÉES



LA PUISSANCE DE L'ANALYSE CARTOGRAPHIQUE

« [...] une gamme d'outils performants et adaptés à **une cartographie rapide, communicante et par-delà les frontières !** Enseignant et chercheur en Géopolitique, les produits de la gamme Cartes & Données me permettent de tirer le meilleur parti des technologies de la cartographie automatique pour faciliter l'exploitation de données électorales ou démographiques. Cartes & Données permet une cartographie rapide et intelligente [...] »

Eric Auburtin
Centre de Recherche et d'Analyses Géopolitiques, Paris 8

Disponible pour Windows

ritme.com/cartes-données

34 Bd Haussmann - 75009 Paris - France
+33 (0)1 42 46 00 42

© 2014 RITME. Cartes & Données est le logiciel de cartographie décisionnelle édité par le Groupe ARTICQUE. RITME est le distributeur officiel de Cartes & Données en France, Belgique et Luxembourg pour l'éducation et la recherche. SCIENTIFIC SOLUTIONS est le distributeur officiel de Cartes & Données en Suisse pour l'éducation et la recherche.

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

L'ENSIC, l'ESPCI ParisTech, Chimie ParisTech et l'ECPM vous invitent à la 29e édition du

FORUM HORIZON CHIMIE

Jeudi 5 février 2015
9h00/18h00

Une rencontre privilégiée avec une quarantaine d'entreprises et l'opportunité de postuler à des offres de stages et d'emploi dans des domaines allant de l'énergie à l'agro-alimentaire, en passant par la cosmétique, le secteur pharmaceutique, les sciences des matériaux et les biotechnologies.

Stands d'exposition, conférences, tables rondes, simulations d'entretiens d'embauche et corrections de CV seront mis en place afin de vous aider à approfondir votre projet professionnel et faciliter votre entrée dans le monde du travail.

Renseignements
0622238558
www.horizon-chimie.fr

Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique
75007 Paris

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Quand le corps devient réseau

La caméra d'un drone est une extension de l'œil de celui qui le télécommande. Cet exemple illustre que, de plus en plus, le corps éclate en un réseau d'organes distants.

Un drone de surveillance, comme ceux qu'utilisent les militaires et les pompiers, est un avion sans pilote, équipé d'une caméra. Cette caméra filme la zone survolée et envoie par ondes radio les images à un ordinateur resté au sol. Ces images s'affichent alors sur un écran et sont ainsi vues par l'œil du soldat ou du pompier qui commande l'appareil.

Toutefois, les roboticiens et les informaticiens utilisent souvent une description plus imagée d'un tel dispositif : un drone de surveillance est, disent-ils, l'« œil déporté » du soldat ou du pompier qui commande l'avion. Bien entendu, le dispositif, décrit de façon plus ou moins métaphorique, est *in fine* le même ; mais cette expression est révélatrice de la manière dont notre perception du corps change sous les effets conjoints des développements de la biologie et de l'informatique.

L'opposition de la plupart des chercheurs aux coûteux vols spatiaux « habités » s'explique en grande partie par le fait que, pour un scientifique qui veut observer la planète Mars, il importe d'y envoyer un œil. Mais y envoyer aussi un tube digestif, un foie et une rate est superflu. En revanche, pour les commanditaires des vols habités – tel John Kennedy pour le programme *Apollo* – et pour une partie du grand public, il y a une grande différence entre voir le sol lunaire « en vrai », comme l'ont fait Neil Armstrong et Buzz Aldrin, et en voir une photo ou une vidéo, de même qu'il y a une différence entre assister à un concert et en écouter un enregistrement.

Cependant, la biologie conduit à relativiser cette distinction. Outre le fait qu'Armstrong et Aldrin n'ont vu le sol lunaire qu'à travers la visière de leur casque et ne l'ont touché qu'à travers le gant de leur scaphandre, leur œil, comme une caméra, a transformé les signaux lumineux en un train d'informations véhiculées jusqu'au cerveau par le nerf optique. Il n'existe pas de vision sans médiation, car il y a toujours entre l'objet vu et le cerveau de celui qui le voit une caméra biologique : un œil. Et introduire une seconde caméra complique le dispositif, mais n'en change pas la nature.

Cette distance crée un corps éclaté, formé d'organes situés à des kilomètres les uns des autres, connectés par un système nerveux étendu : un réseau radio.

Bien entendu, il y a encore de grandes différences, notamment sur le plan éthique, entre une caméra et un œil : casser une caméra est ainsi beaucoup moins grave que blesser un œil. C'est d'ailleurs pourquoi les vols habités sont si dangereux et si coûteux.

Mais la construction de prolongements de nos organes sensoriels et la meilleure compréhension de leur fonctionnement brouillent la frontière, peut-être artificielle, que nous percevons entre ce qui fait partie de notre corps et ce qui n'en fait pas partie. Un implant cochléaire, par exemple, n'est pas un tympan, mais ce n'est pas non plus un sonotone.

Si cette frontière est mouvante depuis que, il y a deux millions d'années, des espèces du genre *Homo* ont commencé à prolonger leurs organes par des outils, une nouveauté réside peut-être dans cette notion de déport.

Géométriquement, un tympan, un sonotone et un implant cochléaire se situent *grosso modo* au même endroit : autour de notre oreille. Mais l'« œil déporté » du soldat ou du pompier est souvent à des kilomètres du reste de son corps, et celui d'un spationaute en liaison avec une sonde robotisée, à des millions de kilomètres. Cette distance crée un corps éclaté, formé d'organes situés à des kilomètres les uns des autres, connectés par un système nerveux étendu : un réseau radio. S'il n'est en effet pas possible de relier par un câble la caméra d'un drone de surveillance à l'ordinateur resté au sol, les réseaux radio n'imposent aucune limite à la distance entre les organes.

Cette nouvelle géométrie du corps n'est pas une utopie transhumaniste. Avec les drones de surveillance, avec les vols spatiaux non habités, mais aussi avec nos mémoires externes que sont les bibliothèques auxquelles nous restons connectés, c'est déjà partiellement la nôtre. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES chronique de Gérald Bronner

Le dilemme du vaccin

Nous avons tendance à surévaluer les risques très faibles. Et une dissymétrie psychologique entre l'action et l'inaction peut fausser notre jugement.

Récemment, un couple a dû répondre devant les tribunaux de sa volonté de ne pas faire vacciner ses enfants. Les deux parents ont tenu à souligner qu'ils n'appartiennent pas à une secte : ce sont des gens ordinaires. Cette précision n'est pas anodine, le combat contre les vaccins ayant longtemps été le fait de groupuscules parfois religieux. On a sans doute affaire à un symptôme de l'époque. Plusieurs enquêtes montrent en effet que la méfiance vis-à-vis des vaccins connaît une progression inquiétante ; elle a été multipliée par quatre durant les dix dernières années en France.

Or, s'il est une technologie qui a fait la démonstration de ses bienfaits pour la santé publique, c'est celle de la vaccination. On assiste néanmoins à une diffusion dans l'espace public d'arguments anti-vaccins qui, auparavant, demeuraient confinés. La dérégulation du marché des idées que constitue Internet favorise parfois le démagogisme cognitif, c'est-à-dire les opinions qui flattent les pentes les moins honorables de notre esprit. En l'occurrence, notre esprit n'est pas toujours bien préparé à concevoir rationnellement le risque, et le vaccin en pâtit sans aucun doute.

Face au vaccin, notre cerveau peut s'égarer de deux façons au moins. La première a été relevée par des chercheurs qui s'intéressaient aux courses de chevaux. Ils ont découvert que les joueurs se faisaient une assez bonne idée des chances qu'ils avaient de gagner, sauf dans deux cas : lorsque les chevaux avaient de faibles probabilités de l'emporter ou, au contraire, lorsqu'ils étaient favoris. Ces résultats ont été par la suite confirmés et affinés dans les années 1990 et l'on a pu montrer qu'au-delà des courses de chevaux, les faibles probabilités sont d'ordinaire perçues comme 10 à 15 fois supérieures à ce qu'elles sont ! Dans ces conditions, si l'attention de nos concitoyens est attirée sur des risques très faibles, comme dans le cas de la vaccination, on peut penser qu'ils ne parviendront pas toujours à une conclusion rationnelle.

© Shutterstock.com/KPG_Payless

VACCINATION : la méfiance a augmenté au sein de la population. Un biais de jugement joue un rôle.

Mais il y a plus. La vaccination implique un acte volontaire, le fait de ne pas se faire vacciner aussi. Dans le premier cas cependant, celui qui hésite se trouvera dans le cadre mental de l'*action*, tandis que dans le second, il se trouvera dans celui de l'*inaction*.

C'est fondamental. Supposons que vous ayez parié sur une option A et que c'est B qui se réalise et vous fasse perdre 1 000 euros. Supposons à présent que vous ayez d'abord parié sur l'option B, mais que finalement vous retiriez votre mise pour la placer sur A ; vous perdrez aussi 1 000 euros. Mais chacun peut comprendre que dans le second cas, vous aurez plus de regrets que dans le premier.

En effet, dans les deux situations, vous avez raté l'occasion de gagner la somme, mais, dans le premier scénario, vous n'avez qu'à regretter les conséquences de votre inaction, tandis que dans le second vous devez faire face aux conséquences de votre action. Cette dissymétrie du jugement est un trait psychologique très répandu. D'une façon générale, nous ne voulons pas nous rendre coupables d'une action dont les conséquences seraient moralement condamnables, et nous sommes moins regardants lorsque ces conséquences découlent d'une inaction.

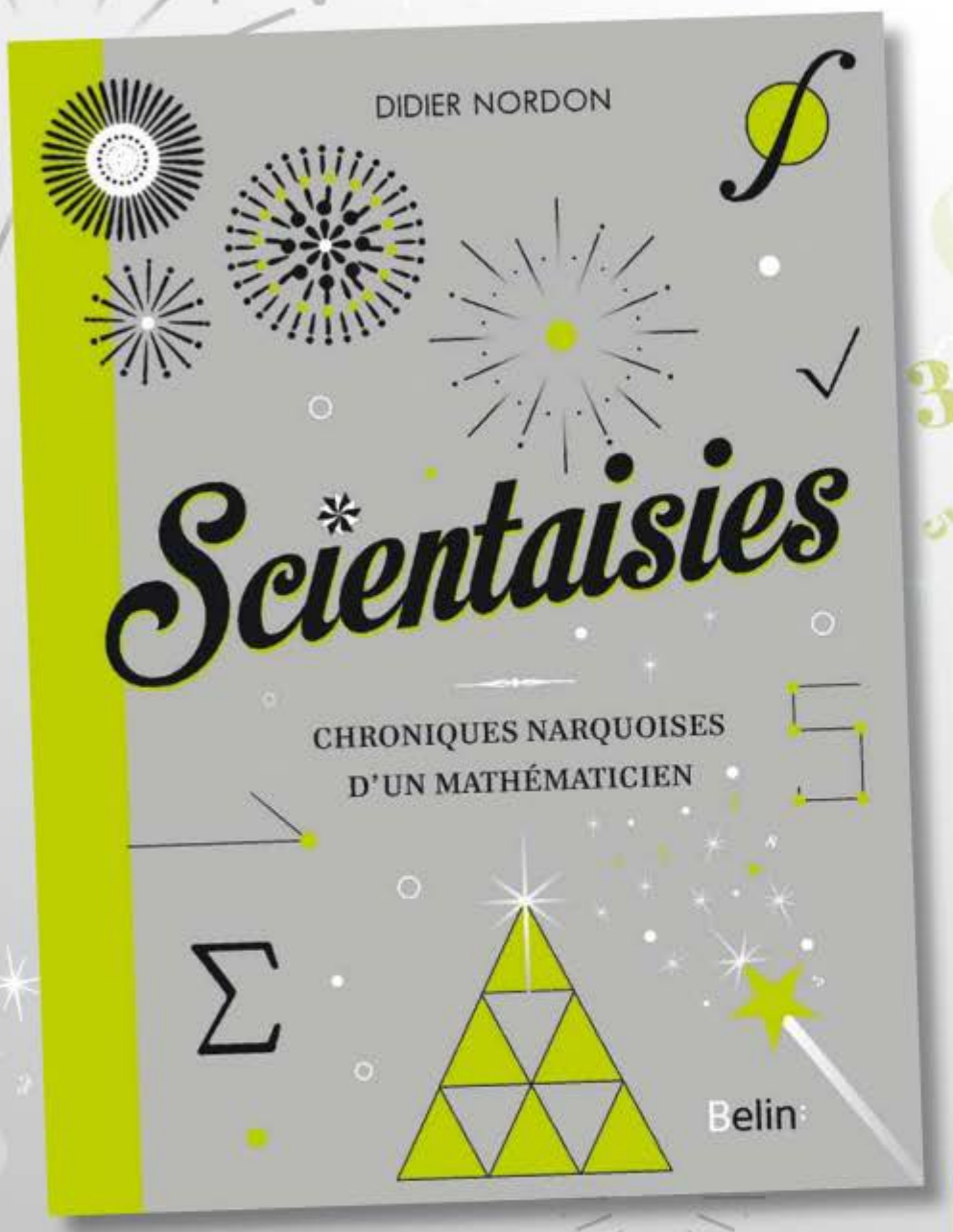
C'est là l'une des aides les plus précieuses à la rhétorique anti-vaccin. Il semble que certains parents préfèrent abandonner leur enfant aux conséquences de leur inaction plutôt qu'à celles de leur action. Ainsi, lorsque le couple évoqué au début de cette chronique affirme qu'il ne souhaite pas « jouer à la roulette russe » avec la santé de ses enfants en les faisant vacciner, il ne paraît pas imaginer qu'il surévalue dangereusement le risque possible du vaccin et qu'il joue à un jeu bien plus problématique en préférant l'abstention à l'action. Si les raisonnements de ce type devant le risque devaient se répandre encore dans notre société, nous serions face à un réel problème de santé publique. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

LE MARIAGE DE L'HUMOUR ET DE LA SCIENCE

par Didier Nordon



Nouveauté POUR LA SCIENCE

SCIENTAISIES

CHRONIQUES NARQUOISES D'UN MATHÉMATICIEN

Le croisement de la science et de la fantaisie donne naissance à des Scientaisies, chroniques qui alimentent le Bloc-Notes de Didier Nordon dans le mensuel *Pour la Science*. Des billets d'humeur, joliment illustrés de dessins humoristiques ; à savourer sans modération en commençant par le dernier si votre humeur vous y incite !

Éditions Belin/Pour la Science
158 pages - 15€ - 12/11/2014
ISBN 978-2-8424-5196-7

FLASHEZ CE QR CODE **ET COMMANDEZ** DIRECTEMENT VOTRE LIVRE

BON DE COMMANDE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à :
Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil
E-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

POUR LA SCIENCE

❑ **Oui**, je commande l'ouvrage ***Scientaisies*** de Didier Nordon

▶ ____ exemplaires x 15€ (Réf. 84295196) = ____ €
Frais de port (3€ France - 12€ Étranger) + ____ €
Total à régler ____ €

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
CP : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ Par carte bancaire
Numéro : _____
Date d'expiration : _____
Cryptogramme : _____

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. **Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ❑.**

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule).
_____@_____

VPSCPLS447 - Offre valable jusqu'au 31/01/2015. Dans la limite des stocks disponibles

Pour la vie sur Mars, on ne sait pas encore. Pour les cinq vies du papier, c'est sûr.

La force de tous les papiers, c'est de pouvoir être recyclés
au moins cinq fois en papier. Cela dépend de chacun de nous.
www.recyclons-les-papiers.fr

Tous les papiers ont droit à plusieurs vies.
Trions mieux, pour recycler plus !

La presse écrite s'engage pour le recyclage
des papiers avec Ecofolio.

ecofolio

DOSSIER

Ces bactéries qui nous gouvernent

Quatre-vingts millions de bactéries sont échangées lors d'un baiser, a-t-on pu lire récemment. C'est peu à côté de la quantité de microbes que nous hébergeons. Notre intestin contient à lui seul dix fois plus de bactéries que le corps humain ne compte de cellules !

En fait, avec les centaines de billions de bactéries qui peuplent la peau, la bouche, l'appareil digestif, les voies respiratoires, le vagin, nous ressemblons plus à un écosystème qu'à un organisme autonome, capable de se former et de se réguler seul. Depuis une dizaine d'années, on s'aperçoit que nos bactéries jouent un rôle clé dans le maintien de notre santé. On pense même qu'elles sont indispensables au développement du système immunitaire *(voir l'article de Gérard Eberl, page 26)*.

À l'inverse, des perturbations de notre flore intestinale sont associées à diverses maladies, parfois inattendues : des pathologies métaboliques, telles que l'obésité et ses complications *(voir l'article de Philippe Gérard, page 34)*, mais aussi mentales, comme le stress, la dépression, ou les troubles du spectre autistique *(voir l'article de Valérie Daugé* et al.*, page 42)*. Ce dossier fait le point sur ces travaux et les multiples liens qu'ils ont révélés entre nos bactéries et nous.

– Marie-Neige Cordonnier

26 **Nos bactéries et nous : un subtil équilibre** *par Gérard Eberl*

34 **Obésité, la flore intestinale mise en cause** *par Philippe Gérard*

42 **Les maladies mentales viennent-elles du ventre ?** *par V. Daugé, M. Jaglin, L. Naudon et S. Rabot*

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

© Pour la Science – n° 447 – Janvier 2015

Nos bactéries et nous : un subtil équilibre

Gérard Eberl

Notre organisme est peuplé de centaines de milliards de bactéries. Pourquoi notre système immunitaire ne les élimine-t-il pas ? Parce qu'il est sans doute bien plus qu'une armée de cellules et de molécules tueuses...

L'ESSENTIEL

- On a longtemps pensé que le système immunitaire ne visait qu'à nous défendre contre les microbes.
- Puis on s'est aperçu qu'au fil de l'évolution, une myriade de bactéries ont colonisé notre organisme.
- Tolérées par le système immunitaire, ces bactéries nous procurent des éléments essentiels et nous protègent.
- Le système immunitaire établit en permanence une relation durable et équilibrée avec ces micro-organismes.

Toutes les illustrations sont de Bryan Christie

Notre vision du monde est bien manichéenne : nous éprouvons un fort besoin de classer les choses en « bien » et en « mal », d'identifier nos amis et nos ennemis, de reconnaître ce qui peut nous bénéficier ou nous nuire. Peut-être est-ce un instinct de survie qui nous guide dans un monde dangereux, fruit de mécanismes anciens qui ont assuré notre pérennité. Il n'en reste pas moins que la science elle-même est empreinte de manichéisme, surtout lorsqu'il s'agit de microbes et, en conséquence, du système immunitaire : d'un côté, les germes porteurs de maladies, qui peuvent nous infecter et nous tuer, de l'autre, notre système immunitaire, qui les reconnaît et les élimine.

Pendant plus d'un siècle, les immunologistes ont cherché à comprendre comment le système immunitaire détecte et détruit cette énorme diversité de microbes et, ce faisant, nous protège de nombreuses maladies infectieuses. Des résultats étonnants ont été obtenus, telle la découverte de la recombinaison génétique chez certaines cellules du système immunitaire (les lymphocytes), un processus par lequel l'organisme produit des milliards d'anticorps différents, capables de reconnaître autant de microbes distincts. Tout aussi étonnantes sont la découverte de molécules qui reconnaissent, à l'inverse, des structures communes au plus grand nombre de microbes, la découverte de cellules dites

dendritiques, qui collectent les débris de microbes partout dans l'organisme et les acheminent vers les cellules produisant les anticorps, et la découverte de cellules « camion-poubelles » – les macrophages –, qui nettoient les tissus des microbes et des cellules mortes à la suite des infections. Chacune de ces découvertes a été récompensée par un prix Nobel, ce qui témoigne de leur importance !

Cependant, un autre champ de recherche révèle à quel point les interactions des mondes animal et microbien ne peuvent se restreindre à une guerre entre attaquants et défenseurs. La biologie animale fournit de nombreux exemples spectaculaires de symbiose entre ces deux mondes. Ainsi, des moules vivent à plusieurs kilomètres de profondeur sur les dorsales océaniques grâce aux bactéries qu'elles hébergent et à leur capacité d'utiliser l'hydrogène comme source d'énergie ; des calmars hawaïens se camouflent grâce à des bactéries luminescentes qui colonisent de petites cryptes sur le ventre de leur hôte ; des vers tuent et consomment la larve d'insecte dans laquelle ils vivent grâce à des bactéries qu'ils relâchent dans leur hôte infortuné.

Les microbes, porteurs de maladies...

Nous-mêmes, nous ne pourrions digérer certains aliments et manquerions de certaines substances vitales sans les 100 000 milliards de bactéries (10^{14}) – nombre dix fois supérieur à celui des cellules de notre propre organisme – qui peuplent notre intestin, et le vagin serait très mal protégé sans l'acidité que lui fournissent ses lactobacilles symbiotiques. Que fait notre système immunitaire ? Comment tolère-t-il un tel zoo ? Risquons-nous de développer à tout moment une multitude d'infections à cause de ces microbes qui seraient prêts à nous envahir ? Cette question nous amènera vers de nouvelles idées sur la manière dont nous appréhendons notre environnement, non dans le conflit, mais dans l'équilibre sans cesse renouvelé.

C'est au début du XXe siècle que l'idée de microbes porteurs de bienfaits a été avancée. Mais elle n'a eu alors aucun succès, car la communauté scientifique et médicale venait de se convaincre du caractère pathogène des microbes. Dans les années 1870, Louis Pasteur, ainsi que son rival allemand Robert Koch, avaient confirmé la théorie des germes : ils avaient prouvé que les microbes présents dans notre environnement pouvaient transmettre des maladies. Et si l'on n'en avait pas tiré tout de suite les conséquences pour la médecine, les mesures prises ensuite n'en avaient que mieux ancré l'idée que les microbes sont des germes pathogènes.

À l'époque, une théorie antique perdurait, la théorie des humeurs, selon laquelle la maladie naissait d'un déséquilibre entre différents types de liquides corporels. La médecine ne mesurait donc guère le risque de transmission infectieuse de patient à patient lors d'interventions chirurgicales, même si ce risque avait été mis en évidence quelques années auparavant dans les maternités par l'obstétricien autrichien Ignace Semmelweis, et combattu notamment par le chirurgien britannique Joseph Lister. La découverte des microbes porteurs de maladies motiva Pasteur à préconiser, contre l'avis d'une grande partie du corps médical de l'époque, l'asepsie lors de la chirurgie, et à défendre le principe d'hygiène pour combattre les maladies infectieuses.

La théorie des germes se heurtait aussi à celle de la génération spontanée, stipulant qu'un organisme vivant, tel le microbe, pouvait naître de la matière inanimée. Portée par le médecin Félix-Archimède Pouchet, cette théorie mettait en cause les principes mêmes de l'hygiène. Une lutte scientifique d'une décennie opposa les deux hommes, jusqu'à ce que Pasteur prouve par l'expérience que les microbes sont issus de microbes, et donc que les maladies peuvent être contagieuses. Ces découvertes ont permis les réalisations les plus spectaculaires de la médecine, telles que les vaccins, à partir de germes atténués comme le fit Pasteur pour la rage, et les antibiotiques.

Ainsi s'était fixée dans l'esprit collectif l'idée que les microbes sont des vecteurs de maladies, et que l'hygiène est la clé pour défaire les maladies infectieuses. De fait, rien n'est en ce sens plus efficace que l'hygiène, et la chute de la mortalité due aux maladies infectieuses dans les nations industrialisées du XXe siècle en est la preuve. En revanche, cette perception du microbe en tant qu'organisme fondamentalement pathogène avait aussi forgé une vision défensive du système immunitaire : un système dédié à la destruction des microbes.

L'AUTEUR

Gérard EBERL est immunologiste à l'Institut Pasteur, à Paris, où il dirige l'unité Développement des tissus lymphoïdes.

BIBLIOGRAPHIE

Y. Belkaid et T. W. Hand, **Role of microbiota in immunity and inflammation,** *Cell*, vol. 157, pp. 121-141, 2014.

G. Eberl, **A new vision of immunity : homeostasis of the superorganism,** *Mucosal Immunol.*, vol. 3, pp. 450-460, 2010.

H. W. Virgin *et al.*, **Redefining chronic viral infection,** *Cell*, vol. 138, pp. 30-50, 2009.

M. McFall-Ngai, **Adaptive immunity : care for the community,** *Nature*, vol. 445, pp. 153, 2007.

P. Matzinger, **Tolerance, danger, and the extended family,** *Annu. Rev. Immunol.*, vol. 12, pp. 991-1045, 1994.

À ÉCOUTER

Le jeudi 22 janvier 2015, de 14h à 15h, Gérard Eberl reviendra sur le superorganisme symbiotique que nous formons avec notre microbiote dans la partie *Actualités* de l'émission **La marche des sciences,** sur France Culture. **www.franceculture.com**

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

C'est en 1903 qu'un autre pasteurien, Élie Metchnikoff, proposa une nouvelle vision du monde microbien : les microbes seraient aussi vecteurs de bien. Embryologiste engagé par Pasteur en 1888, Metchnikoff était alors connu pour avoir découvert un élément clé de la lutte contre les agents pathogènes, la phagocytose – l'existence de populations de cellules qui engloutissent les agents pathogènes et les détruisent. Cette découverte allait devenir le fondement de l'immunité cellulaire et lui valoir le prix Nobel en 1908.

En 1903, dans un ouvrage intitulé *Études sur la nature humaine : essai philosophique optimiste* où il discutait les causes du vieillissement, Metchnikoff proposa que certains types de bactéries, notamment les bactéries lactiques présentes dans le yaourt, sont capables de prolonger la vie en s'opposant aux bactéries « protéolytiques » présentes dans notre intestin et enclines à la raccourcir.

... et de bénéfices ?

Cette théorie dite probiotique était une intuition, fondée sur la consommation apparemment bienfaisante du kéfir chez les Bulgares. Metchnikoff inspira entre autres Isaac Carasso, dont le fils Daniel fit un stage en bactériologie à l'Institut Pasteur dans les années 1920 et créa la société de yaourts *Danone*.

L'idée que les microbes pouvaient être porteurs de bienfaits était donc lancée. Mais l'impact des microbes probiotiques et des produits lactés qui les portent ne pouvait concurrencer celui des microbes pathogènes. Cela aurait été comme comparer aujourd'hui l'effet d'un yaourt à celui d'un vaccin. Il a fallu attendre la fin du XXe siècle pour que la science s'intéresse de plus près à la multitude de microbes, notamment de bactéries, qui vivent dans notre intestin, notre bouche, nos poumons, notre peau ou encore le vagin *(voir l'encadré pages 30 et 31)*. Depuis quelques années, de nouveaux outils de séquençage à haut débit permettent de cataloguer et d'étudier la complexité de cette multitude, nommée microbiote (ou flore intestinale, cutanée, etc.), et d'en connaître ses fonctions.

Dans l'intestin, on a longtemps considéré le microbiote comme juste nécessaire à une bonne digestion et, par conséquent, ignoré de notre système immunitaire. On comprend aujourd'hui que la flore intestinale est impliquée de façon essentielle non seulement dans la digestion, mais aussi dans la production de vitamines (B et K) et de métabolites tels que les acides gras à chaînes courtes, source d'énergie et régulateurs de la réponse immunitaires, ainsi que dans la dégradation de toxines, la protection contre les agents pathogènes et la formation de l'intestin, notamment du système immunitaire intestinal.

L'hôte et son microbiote seraient un superorganisme, formé de plusieurs organismes vivant en symbiose.

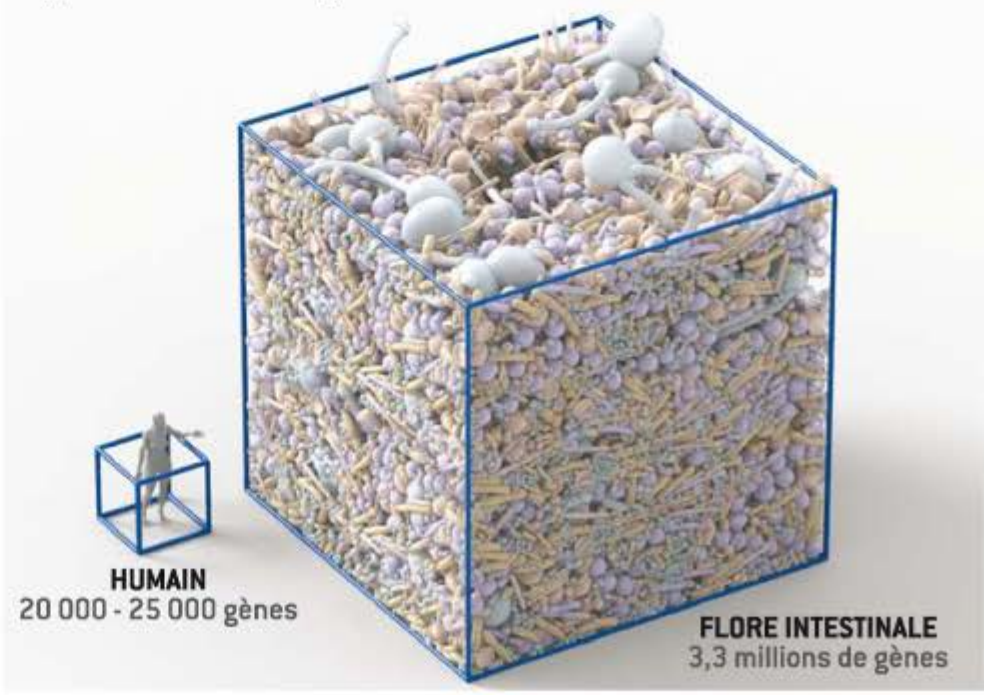
Ainsi, le microbiote participe au développement et au maintien de l'équilibre de son hôte – l'homéostasie. On le considère désormais comme partie intégrante de l'hôte, à tel point que l'on propose de le considérer comme un organe doté de fonctions propres et nécessaires à l'hôte. L'hôte et son microbiote seraient un superorganisme, composé de plusieurs organismes complémentaires vivant en symbiose, comme le font l'algue verte et le champignon dans le lichen.

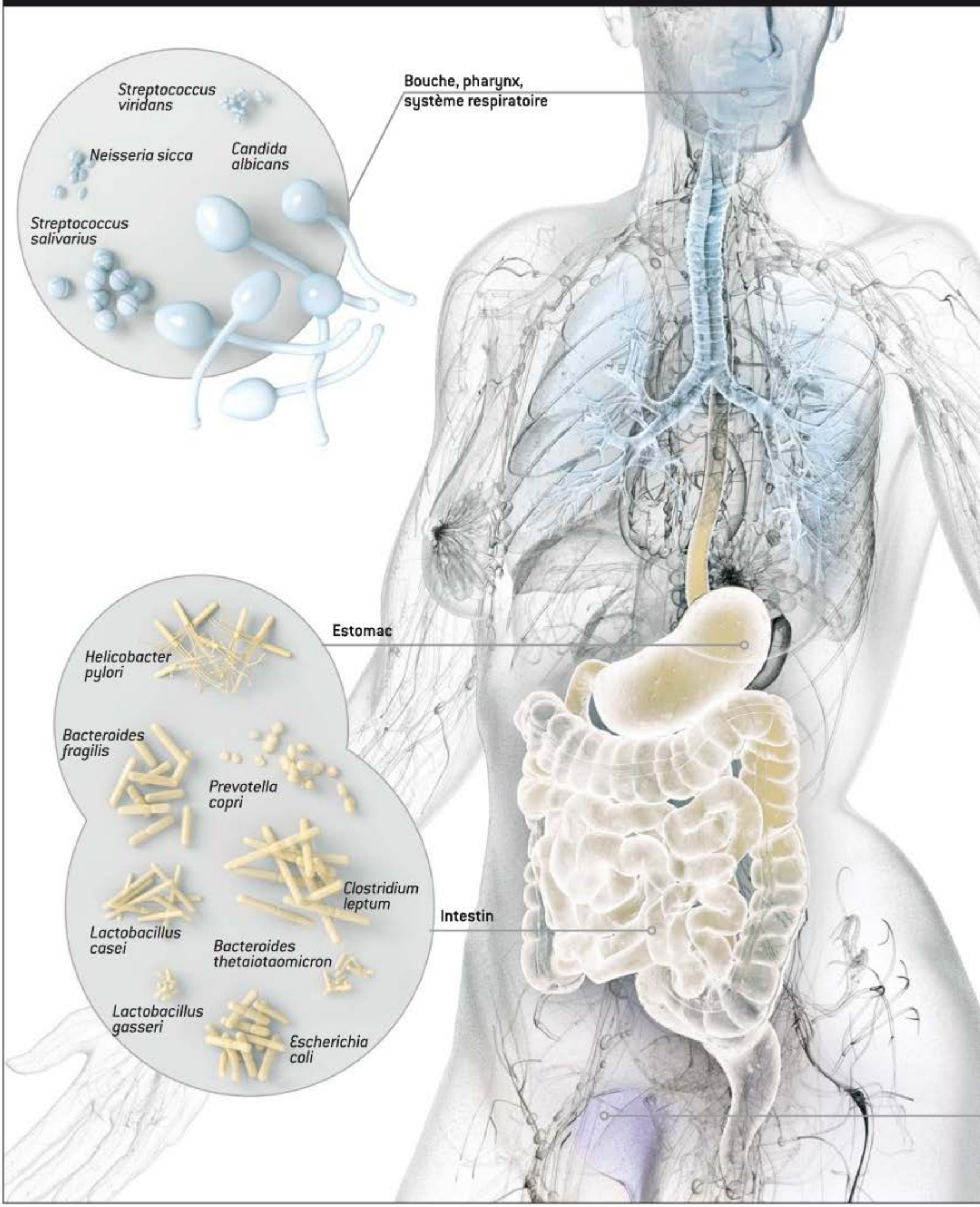
Mais alors, que fait le système immunitaire ? Dans cette vision, il ne peut plus ignorer le microbiote : organe au même titre que les autres organes, le microbiote communique avec eux par l'intermédiaire de ce qu'il produit. Comment le système immunitaire fait-il la différence entre les « bons » microbes, parties de cet organe utiles au superorganisme, et les « mauvais » microbes – les agents pathogènes qui envahissent l'organisme à leur profit ? N'est-il vraiment qu'une arme de défense ?

C'est ce que l'on pensait jusqu'à ce que, à partir des années 1990, le modèle dominant en immunologie depuis les années 1940 – la théorie du soi et du non-soi – rencontre quelques difficultés. Le concept du soi et du non-soi était né d'une idée proposée par le second récipiendaire, avec Metchnikoff, du prix Nobel de 1908, Paul Ehrlich. Ce biologiste allemand avait développé l'idée d'une immunité humorale… concurrente de l'immunité cellulaire défendue par Metchnikoff : dans le sang, des sortes de patrouilles de molécules reconnaîtraient les agents pathogènes et les neutraliseraient. Sa théorie, dite des chaînes latérales, décrivait, d'une façon qui

NOTRE GÉNOME NE FAIT PAS LE POIDS...

... à côté du microbiome, l'ensemble des gènes portés par notre microbiote – les bactéries et autres microbes qui vivent dans l'organisme et sur notre peau. À lui seul, le microbiome intestinal est 150 fois plus important que notre génome. Et rassemblées sur une balance, nos bactéries intestinales pèseraient un kilogramme. Comment l'organisme tolère-t-il une telle masse de microbes ?

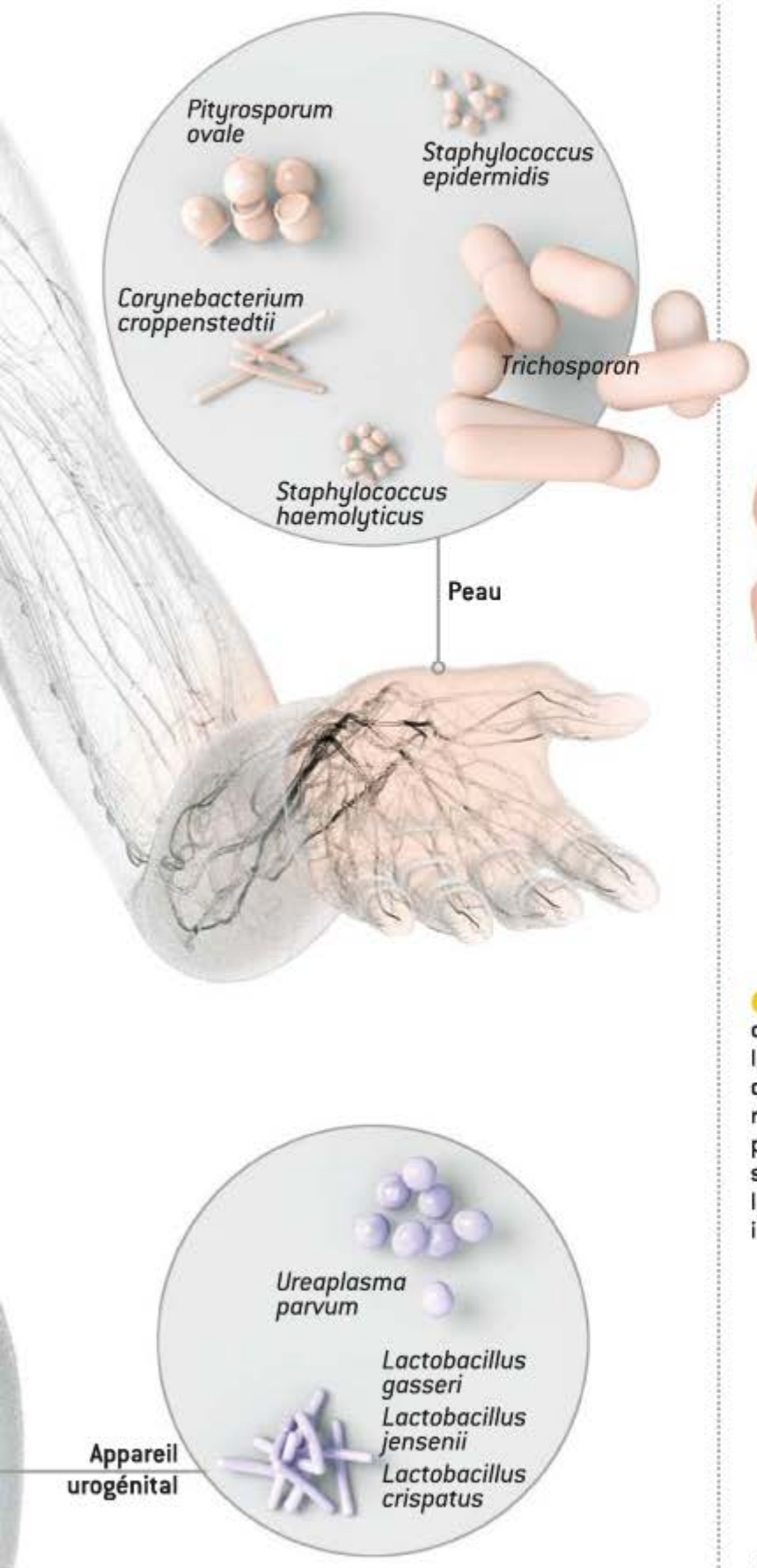


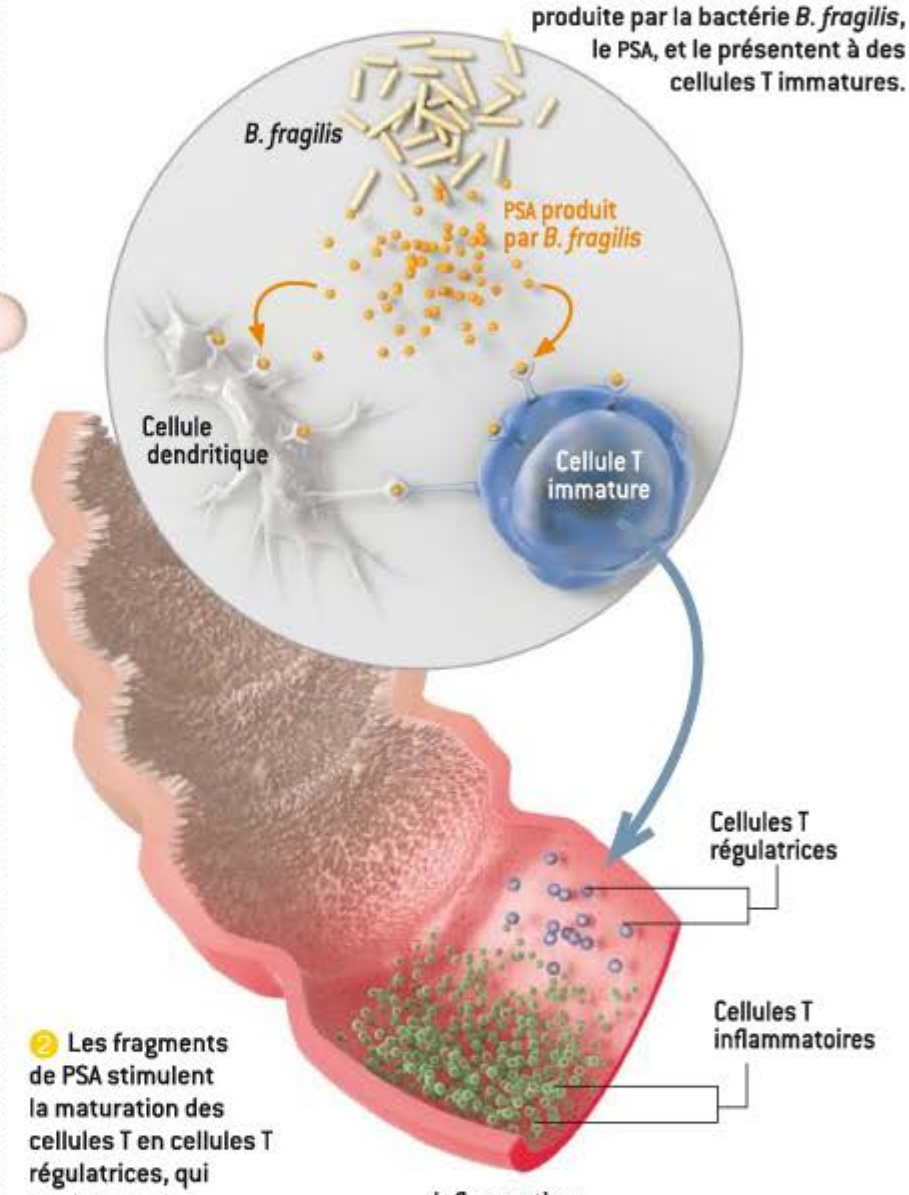


© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

PETIT ATLAS DE NOS SYMBIOTES

Diverses populations de bactéries vivent en symbiose avec les humains. Au fil de l'évolution, elles ont colonisé les surfaces de l'organisme en contact avec l'extérieur : le tube digestif, le système respiratoire, la peau, le vagin… L'ensemble de ces bactéries – le microbiote bactérien – participe au maintien de la santé de l'organisme notamment en constituant une barrière plus difficile à franchir pour les agents pathogènes. Elles joueraient aussi un rôle essentiel dans le développement et la régulation du système immunitaire : en permanence, un équilibre s'établirait entre le système immunitaire et le microbiote, fondé notamment sur la reconnaissance de motifs bactériens. C'est ce qui se produirait, par exemple, avec *Bacteroides fragilis*, une des bactéries de l'intestin *(à droite)*.





DANS L'INTESTIN, LA BACTÉRIE *BACTEROIDES FRAGILIS* participe au maintien de l'équilibre entre microbiote et système immunitaire. C'est ce qu'a montré l'équipe de Sarkis Mazmanian, à l'Institut de technologie de Californie, en 2011. Les biologistes ont donné à des souris sans germe soit la bactérie, soit la bactérie modifiée pour qu'elle ne produise pas un sucre complexe détecté par le système immunitaire, le polysaccharide A (PSA). Les premières n'ont pas développé d'inflammation de l'intestin pendant la colonisation, contrairement aux secondes. Le PSA stimule le développement de cellules T régulatrices qui restreignent l'inflammation.

A droite, illustration inspirée de W. Strober, Nature Medicine, vol. 16, 2010

À chacun son microbiote

Depuis quelques années, les biologistes étudient la nature de notre écosystème bactérien, notamment en analysant son génome – le microbiome bactérien. Chaque espèce de bactérie symbiotique (les bactéries tolérées par notre système immunitaire) a une signature : sa version unique d'un gène impliqué dans la production des protéines (le gène de l'ARN ribosomal 16S). En répertoriant les diverses séquences de ce gène dans les microbiomes étudiés, les biologistes dressent un catalogue des espèces constituant le microbiote humain. On s'est ainsi aperçu, notamment, qu'il n'existe pas deux microbiotes identiques.

se révéla correcte, que des cellules du sang peuvent produire des protéines (les « chaînes latérales » ou anticorps) reconnaissant de façon spécifique des molécules produites par des agents pathogènes, les antigènes.

Dans les années 1940, s'inspirant de cette idée d'anticorps spécifiques d'antigènes, le virologue australien Frank Macfarlane Burnet avança la thèse suivante : le système immunitaire apprend à ne pas réagir contre les molécules de l'organisme – le soi – pendant le développement embryonnaire, définissant ainsi son champ d'action contre le non-soi. Burnet reçut le prix Nobel en 1953 pour ses travaux, avec le biologiste britannique Peter Medawar, qui prouva, grâce à un système de greffe, que la distinction du soi et du non-soi est une clé de l'activation du système immunitaire.

Ainsi avaient été posées, pour au moins un demi-siècle, les fondations de l'immunologie. Et nombre de travaux avaient confirmé ces fondations. Notamment, en accord avec le concept du soi et du non-soi, on avait montré que les cellules dites T, qui contrôlent l'activation des cellules produisant les anticorps – les cellules B –, subissent une sélection dans le thymus : les cellules qui y reconnaissent le soi sont éliminées. Ne restent donc que les cellules T qui reconnaissent le non-soi.

Cependant, à partir des années 1980, de nouveaux résultats ont suggéré que la frontière entre le soi et le non-soi n'était pas aussi nette qu'on le pensait. On s'est aperçu que le système immunitaire peut aussi réagir au soi stressé, blessé ou altéré. Par exemple, des cellules dites tueuses naturelles reconnaissent les cellules tumorales, altérées par la transformation, et les détruisent. De même, d'autres cellules du système immunitaire – les cellules dendritiques –, ne sont pas uniquement dirigées contre le non-soi.

Découvertes en 1973 par le Canadien Ralph Steinman, les cellules dendritiques collectent les antigènes et les présentent aux cellules T, puis « décident » de leur activation. Ces cellules ont constitué une énigme pendant une quinzaine d'années, car elles ne portent pas de récepteur aux antigènes, comme les cellules B et T. Comment contrôlent-elles l'activation des cellules T ? La réponse a été proposée par l'Américain Charles Janeway en 1989, et validée chez l'animal dans les années 1990 (par les équipes de Jules Hoffmann et Bruce Beutler, qui ont reçu le prix Nobel en 2011 avec Steinman) : les cellules dendritiques expriment des récepteurs innés, qui reconnaissent des motifs moléculaires communs à de nombreux microbes.

Jusque-là, rien de contradictoire avec la théorie du soi et du non-soi. Mais on s'est aperçu que les récepteurs innés des cellules dendritiques détectent aussi des motifs du soi produits par les tissus et les cellules lésés...

Ces difficultés ont amené Polly Matzinger, une immunologiste du *National Institute of Health* à Bethesda, aux États-Unis, à proposer une révision de la vue strictement défensive du système immunitaire. Selon elle, le système immunitaire réagirait non seulement au non-soi, mais, de façon plus générale, au danger que représente une cellule ou un tissu lésés par un stress ou un microbe. En conséquence, des microbes pourraient coexister avec leur hôte, ou même dans l'hôte si aucun dommage n'en résulte pour celui-ci. Cette théorie, dite du danger, a profondément changé notre compréhension du rôle du système immunitaire, et ses implications sont encore débattues.

Maintenir l'équilibre

Néanmoins, la théorie du danger implique que le système immunitaire est encore essentiellement un système de défense, et ne réagit qu'aux microbes dangereux pour l'hôte. Pourtant, nous produisons chaque jour des grammes d'anticorps contre la multitude de microbes inoffensifs qui peuplent notre intestin. Pourquoi ? Peut-être ces microbes sont-ils sans danger parce qu'ils sont « surveillés » par cette énorme production d'anticorps ? De même, certains microbes qui nous ont infectés un jour, tels les virus herpès, résident sous forme plus ou moins latente au sein de notre organisme. Sont-ils dangereux ? Le système immunitaire les ignore-t-il ?

Ces constats et ces questions m'ont amené à proposer en 2010 l'explication suivante : le système immunitaire orchestrerait non seulement la défense de l'organisme, mais aussi, et avant tout, son homéostasie. Il nous maintiendrait dans le *status quo*.

Margaret McFall-Ngai, spécialiste de la symbiose bactérienne chez les animaux, discutait en 2007 l'apparition chez les vertébrés du système immunitaire dit adaptatif – responsable de l'immunité humorale décrite par Ehrlich. Fondé sur la synthèse d'une diversité quasi illimitée

d'anticorps par les cellules B, ce système est absent chez les invertébrés. Sommes-nous donc, les vertébrés, mieux armés à nous défendre contre les pathogènes que les invertébrés ? Vivons-nous plus longtemps qu'eux ? Non, certaines palourdes vivent 250 ans… Pour M. McFall-Ngai, cette énorme diversité d'anticorps produite par le système immunitaire adaptatif permet de reconnaître une diversité tout aussi énorme de microbes, non pour les détruire, mais pour vivre avec. Grâce à cette multitude d'anticorps, les vertébrés toléreraient leur microbiote complexe – un luxe que la plupart des invertébrés ne peuvent s'offrir – et en contrôleraient ses membres. En retour, la diversité microbienne nous enrichit de voies métaboliques que nous ne possédons pas, et nous permet de digérer de nouveaux aliments et de nous protéger contre d'autres microbes plus pathogènes.

Toutefois, lorsqu'un membre de ce microbiote devient plus agressif et tente de pénétrer nos tissus, la réponse immunitaire devient plus forte, puis diminue lorsque la pénétration est contenue, tel un ressort soumis à une force. Similaire à une relation proie-prédateur où la proie ne disparaît jamais totalement (le nombre de prédateurs diminue avec le nombre de proies), un équilibre dynamique s'établit entre microbes et système immunitaire.

Cet équilibre serait le fruit de millions d'années d'évolution. Au fil des générations, des microbes vivant en symbiose avec des organismes auraient été sélectionnés avec eux, de même que le système immunitaire qui contrôlerait leur présence dans l'organisme. Ainsi, dans ce nouveau modèle, le système immunitaire devient un élément fondamental de la construction de cet équilibre. Lorsque le système immunitaire est perturbé ou éliminé, l'équilibre s'altère ou s'effondre, et l'hôte soit devient la proie des microbes, soit développe des réponses immunitaires contre les microbes de l'intestin, entraînant des maladies inflammatoires chroniques telles que la maladie de Crohn.

Comment, alors, le système immunitaire distingue-t-il les « bons » microbes des « mauvais » ? Existerait-il deux types de réponses immunitaires, l'un qui maintiendrait l'homéostasie et l'autre qui défendrait l'organisme ? De fait, les réponses immunitaires se déclinent en plusieurs types, que l'on classe sommairement en pro-inflammatoires et anti-inflammatoires. Mais ces propriétés tendent à se confondre selon le contexte. Ainsi, une population de cellules immunitaires, les cellules Th17, non seulement produit des inflammations dans l'intestin en réponse à des attaques bactériennes, mais joue aussi un rôle préventif anti-inflammatoire.

Ces cellules interviennent dans l'élimination des bactéries pénétrant l'intestin en recrutant des cellules – des phagocytes – qui engloutissent les intruses et les détruisent. Mais les cellules Th17 sont aussi très présentes dans l'intestin sain, en l'absence de pénétration microbienne détectable et de pathologie inflammatoire. De plus, nous avons montré que leur absence entraîne une pénétration bactérienne et une inflammation pathologique de l'intestin !

Les cellules Th17 préviennent donc la pénétration bactérienne en tout temps, même lorsque nous sommes en bonne santé, et jouent ainsi un rôle préventif anti-inflammatoire. Lors d'une infection, elles sont sollicitées pour éliminer l'envahisseur ; le recrutement des phagocytes s'emballe alors et se traduit par la pathologie inflammatoire. Ainsi, les réponses immunitaires liées à l'homéostasie et à la défense se confondent. Comme d'ailleurs les concepts d'homéostasie et de défense…

Le système immunitaire ne distingue pas les bons microbes des mauvais, mais s'active en proportion de leur action.

Alors, comment l'organisme distingue-t-il les bons microbes des mauvais ? Là aussi, les notions se confondent. L'ami d'un jour peut devenir l'ennemi d'un autre jour. Les bactéries intestinales symbiotiques peuvent provoquer une péritonite si une blessure leur donne un accès à nos tissus. Les virus herpès que nous portons tous peuvent nous tuer lors d'une transplantation d'organe accompagnée d'un traitement immunosuppresseur visant à éviter le rejet de la greffe. À l'inverse, l'équipe de Herbert Virgin, de l'Université de Washington à Saint Louis, aux États-Unis, a montré en 2007 que ce même virus protège des souris d'une surinfection par la bactérie *Listeria* grâce à la réponse immunitaire qu'ils induisent.

Ami ou ennemi ? Pour la plupart des microbes, ce statut dépend du contexte. En revanche, les pathogènes puissants sont toujours ennemis : c'est le cas des bactéries responsables de la peste et du choléra, ou du virus Ebola. Alors, comment fait le système immunitaire pour les distinguer ? Je pense qu'il ne les distingue pas. Tel le ressort tendu par la force, le système immunitaire s'active proportionnellement à la charge du microbe, à sa pénétration des tissus, aux dommages qu'il engendre, sans pour autant définir ce qu'est ce microbe. Nous, les hôtes, pouvons nous sentir très bien, bien, plus ou moins bien, ou mal, selon le degré d'engagement du système immunitaire. Parfois, en la présence de pathogènes puissants, la réponse immunitaire est violente et mobilise toute notre énergie, pour notre survie. Mais la plupart du temps, une fraction de cette énergie suffit au système immunitaire pour maintenir l'équilibre de l'hôte avec le monde microbien et assurer son homéostasie.

On voudrait sans doute que le système immunitaire nous garantisse un corps exempt de microbes et à l'abri du risque d'infection. La réalité est tout autre, car nous ne pouvons nous passer de nos microbes symbiotiques, qui nous apportent des compléments et des métabolites essentiels, nous protègent contre les agents pathogènes et participent à notre développement. Le système immunitaire a évolué en conséquence, afin de maintenir un équilibre entre ces microbes et nous, ou devrais-je dire, afin de maintenir notre équilibre, car nous sommes à la fois *Homo sapiens* et microbes…

Le risque fait donc partie de notre organisme, mais le risque le plus grand n'est pas forcément là où on l'attend. Vouloir se défaire de notre microbiote, stériliser à outrance, peut avoir des conséquences imprévues. Pour l'immunologiste Jean-François Bach, la recrudescence des maladies allergiques serait due à la baisse des expositions aux maladies infectieuses – une thèse connue sous le nom de théorie de l'hygiène. Il est assez ironique de constater que le risque infectieux est inversement proportionnel au risque allergique. L'équilibre est la clé, même dans l'hygiène. ■

Certains microbiotes intestinaux favorisent le développement de l'obésité et des pathologies associées, tel le diabète. Modifier leur composition pourrait aider à combattre ces maladies.

OBÉSITÉ

la flore

Philippe Gérard

L'obésité, fléau de notre temps, n'est pas seulement une question de mode de vie et de prédisposition génétique. Un acteur négligé jusque dans les années 1990 pourrait jouer un rôle crucial dans le développement de cette pathologie et de ses complications : le microbiote intestinal, l'ensemble des bactéries qui peuplent notre tube digestif.

Un individu est considéré comme obèse lorsque son indice de masse corporelle (le rapport de la masse et du carré de la taille) dépasse 30 kilogrammes par mètre carré. En 2005, environ 1,6 milliard d'adultes étaient en surpoids (indice supérieur à 25) dans le monde et, parmi eux, au moins 400 millions étaient obèses. En France, l'enquête nationale ObEpi a révélé que 15 % des individus étaient obèses en 2012 (contre seulement 8,5 % en 1997 !), auxquels s'ajoutaient 32,3 % en surpoids sans être obèses. L'obésité s'accompagne d'un risque accru de développer des maladies telles que le diabète, l'athérosclérose, des pathologies hépatiques ou encore certains cancers. Si la modification du mode de vie au cours des dernières décennies, marquée par une alimentation plus riche et une diminution de l'activité physique, joue assurément un rôle dans le développement de l'obésité, s'il ne fait plus doute que des variants de certains gènes prédisposent à la maladie, il est maintenant admis que d'autres facteurs sont nécessaires pour expliquer l'augmentation constante de sa prévalence au cours des dernières décennies.

Parmi ces facteurs, l'implication du microbiote intestinal est une hypothèse apparue il y a une dizaine d'années. Depuis, de nombreuses études, la plupart fondées sur l'observation et l'utilisation d'animaux dépourvus de microbiote intestinal – des animaux dits axéniques –, ont montré la contribution de ce microbiote dans le développement de l'obésité et de pathologies associées. Plus récemment, des études effectuées chez l'homme ont confirmé que les personnes obèses hébergent un microbiote intestinal déséquilibré, ce qui ouvre la porte à de nouvelles stratégies visant à

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

intestinale mise en cause

L'ESSENTIEL

- Le microbiote intestinal de chaque individu est unique.
- Néanmoins, entre les personnes obèses et celles sans surpoids, on constate des différences dans sa composition.
- Des études chez la souris suggèrent que certaines bactéries favoriseraient le développement de l'obésité, tandis que d'autres en protégeraient.
- De nouvelles stratégies thérapeutiques sont envisagées, visant à favoriser la croissance de bactéries intestinales bénéfiques à l'aide de prébiotiques.

© Sebastian Kaulitzki/shutterstock.com

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

moduler ce microbiote afin de prévenir ou traiter l'obésité et les pathologies associées.

Stérile *in utero*, le nouveau-né se retrouve à la naissance en contact avec des bactéries qui, rapidement, colonisent son tube digestif. Lors d'un accouchement par voie naturelle, le microbiote fécal maternel constitue la source principale de bactéries colonisatrices (on observe d'ailleurs des différences de microbiote entre enfants nés par voie basse ou par césarienne, mais aucun lien avec l'obésité n'a été observé à ce jour). Puis d'autres bactéries, provenant de la nourriture, de l'environnement ou du contact avec les parents, entrent en contact avec le nouveau-né et participent à la complexification progressive du microbiote de l'enfant. Ce n'est que vers l'âge de deux ans qu'un microbiote proche de celui de l'adulte est définitivement installé.

Un kilo de bactéries dans l'intestin

Chez l'adulte, la densité bactérienne est maximale dans le côlon distal, avec 10^{11} bactéries par gramme de selles. Au total, plus de 10^{14} bactéries colonisent notre tube digestif, c'est-à-dire dix fois plus que le nombre de cellules eucaryotes constituant le corps humain. Ces bactéries, environ mille espèces différentes, représentent approximativement un kilogramme de notre masse corporelle. À cela s'ajoute la présence d'eucaryotes unicellulaires (des organismes constitués d'une cellule présentant un noyau) tels que des levures ou des protozoaires dont l'importance, en termes de quantité et de fonction, est encore mal connue.

Jusqu'aux années 1980, la caractérisation du microbiote intestinal était réalisée à l'aide des seules techniques de culture, qui ne prenaient en compte que 30 % environ des micro-organismes présents. Depuis, des outils moléculaires ont été développés et ont permis de montrer que trois grandes familles rassemblent la plus grande part des bactéries dominantes dans l'intestin : *Firmicutes*, *Bacteroidetes* et *Actinobacteria*.

Au sein de ces familles, la plus grande partie des espèces observées dans le microbiote fécal d'un individu lui sont propres, même si un petit nombre d'espèces (quelques dizaines) pourraient constituer un cœur phylogénétique partagé par la plupart des humains. Enfin, si la composition du microbiote intestinal varie d'un individu à l'autre, le profil des espèces dominantes semble stable pour un individu donné, sur des échelles de temps allant jusqu'à plusieurs années.

Le microbiote intestinal exerce de nombreuses fonctions physiologiques dont les répercussions pour l'hôte sont, pour la plupart, bénéfiques. Parmi ces grandes fonctions, la fermentation des substrats disponibles dans le côlon, le rôle de barrière à la colonisation par les micro-organismes pathogènes, la synthèse de vitamines, le développement et la maturation du système immunitaire intestinal et les interactions avec les cellules épithéliales participent au maintien de la santé de l'hôte.

L'influence du microbiote intestinal sur la physiologie de l'hôte a en particulier été mise en évidence grâce à l'étude d'animaux dépourvus de microbiote intestinal. Des élevages de tels animaux dans des enceintes stériles existent depuis plus d'un demi-siècle. Les animaux présentent un certain nombre d'anomalies physiologiques qui peuvent être corrigées en quelques semaines par l'inoculation d'un microbiote complexe et, parfois, d'une seule espèce bactérienne. L'observation de ces animaux a ainsi permis d'établir l'importance du microbiote intestinal pour le bon fonctionnement des organismes hôtes. Elle a aussi révélé l'implication de ce microbiote dans un nombre croissant de maladies, dont l'obésité et les pathologies associées.

COMMENT LA FLORE INTESTINALE CONTRÔLERAIT LE

La quantité de graisse stockée dans l'organisme pourrait être liée à la composition du microbiote intestinal. C'est ce que suggère une étude menée en 2004 chez la souris. Colonisées avec le microbiote intestinal d'une souris normale, des souris sans germes, de masse grasse inférieure à la normale, se sont mises à grossir, même avec un apport alimentaire réduit. Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer ce phénomène.

L'un d'eux est l'augmentation de la quantité de sucres simples absorbés par l'organisme. Certains sucres complexes ingérés ne sont pas digestibles par l'organisme. En revanche, les bactéries intestinales les coupent en sucres simples qui, eux, sont absorbés par les parois intestinales et rejoignent la circulation sanguine. Chez les souris sans germe qui viennent de recevoir un microbiote, l'afflux de sucres simples associé aboutirait à une augmentation de la synthèse des lipides dans le foie. La production de certains lipides – des triglycérides – dans le foie serait ainsi accrue.

L'utilisation de ces sucres complexes par le microbiote intestinal aboutit aussi à la production d'acides gras à chaînes courtes (butyrate, acétate, propionate) qui constituent une source d'énergie pour notre corps (environ 10 % du total chez les omnivores, et jusqu'à 70 % chez les ruminants). Ces acides gras participent aussi à l'augmentation de la masse grasse des souris de l'expérience. Par ailleurs, l'inoculation du microbiote intestinal inhibe sélectivement l'expression d'une protéine – Angptl4 *(Angiopoietin-like protein 4)* – dans les cellules qui tapissent l'iléum, la dernière partie de l'intestin grêle. La protéine Angptl4 est un inhibiteur d'une enzyme, la lipoprotéine lipase, nécessaire pour le stockage des graisses dans le tissu adipeux (l'ensemble des cellules graisseuses de l'organisme). La lipoprotéine lipase libère les acides gras de leurs transporteurs, ce qui leur permet d'atteindre les cellules graisseuses et d'y être stockés. Angptl4 circule dans le sang et empêche l'enzyme de libérer les acides gras, limitant ainsi leur stockage. En inhibant Angptl4, le microbiote favorise donc une activité plus élevée de la lipoprotéine lipase, et ainsi une augmentation du stockage de lipides dans les cellules graisseuses.

– P. G.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

Dès 1983, Bernard Wostmann, de l'Université Notre Dame aux États-Unis, et ses collègues avaient observé que des rongeurs sans microbiote avaient besoin de 30 % de calories supplémentaires pour maintenir leur masse corporelle par rapport à des animaux normaux (avec microbiote). Cette observation était cependant passée inaperçue jusqu'à des travaux récents menés par l'équipe de Jeffrey Gordon, de l'Université Washington de Saint-Louis, aux États-Unis – la première à proposer une implication du microbiote intestinal dans le développement de l'obésité.

Les souris obèses ont un microbiote différent

En 2004, J. Gordon et ses collègues ont montré que la quantité de masse grasse présente chez des souris normales (donc avec microbiote) était supérieure de 42 % à celle de souris sans germes du même âge et de la même souche. De plus, la colonisation de ces souris axéniques par un microbiote intestinal aboutissait à une augmentation de 60 % de la masse grasse en deux semaines malgré une réduction de la prise alimentaire. Les biologistes ont proposé plusieurs mécanismes pour expliquer comment le microbiote intestinal pouvait faciliter le stockage des graisses chez son hôte *(voir l'encadré ci-dessous)*.

D'une façon ou d'une autre, le microbiote intestinal semblait être un élément clé du contrôle de ce stockage – ce que plusieurs travaux ont confirmé quelques années plus tard. J. Gordon et ses collègues ont observé non seulement que les souris axéniques avaient une masse grasse moins importante que leurs congénères non stériles, mais qu'elles restaient minces en réponse à un régime riche en graisses. Les souris avaient beau ingérer des lipides, elles n'en stockaient pas plus.

De même, notre équipe à l'Inra de Jouy-en-Josas a montré que, soumises à un régime riche en graisses, les souris axéniques prenaient trois fois moins de poids que les souris normales nourries de la même façon. De plus, leur métabolisme des sucres et des graisses était différent : les souris axéniques ainsi nourries présentaient moins de sucres et d'insuline dans le sang et régulaient mieux leur glycémie (la concentration de sucre dans le sang). Elles avaient aussi moins de lipides dans le sang et plus de cholestérol dans le foie. Ces résultats mettaient en évidence l'importance du microbiote intestinal dans la régulation des métabolismes glucidique et lipidique chez l'hôte.

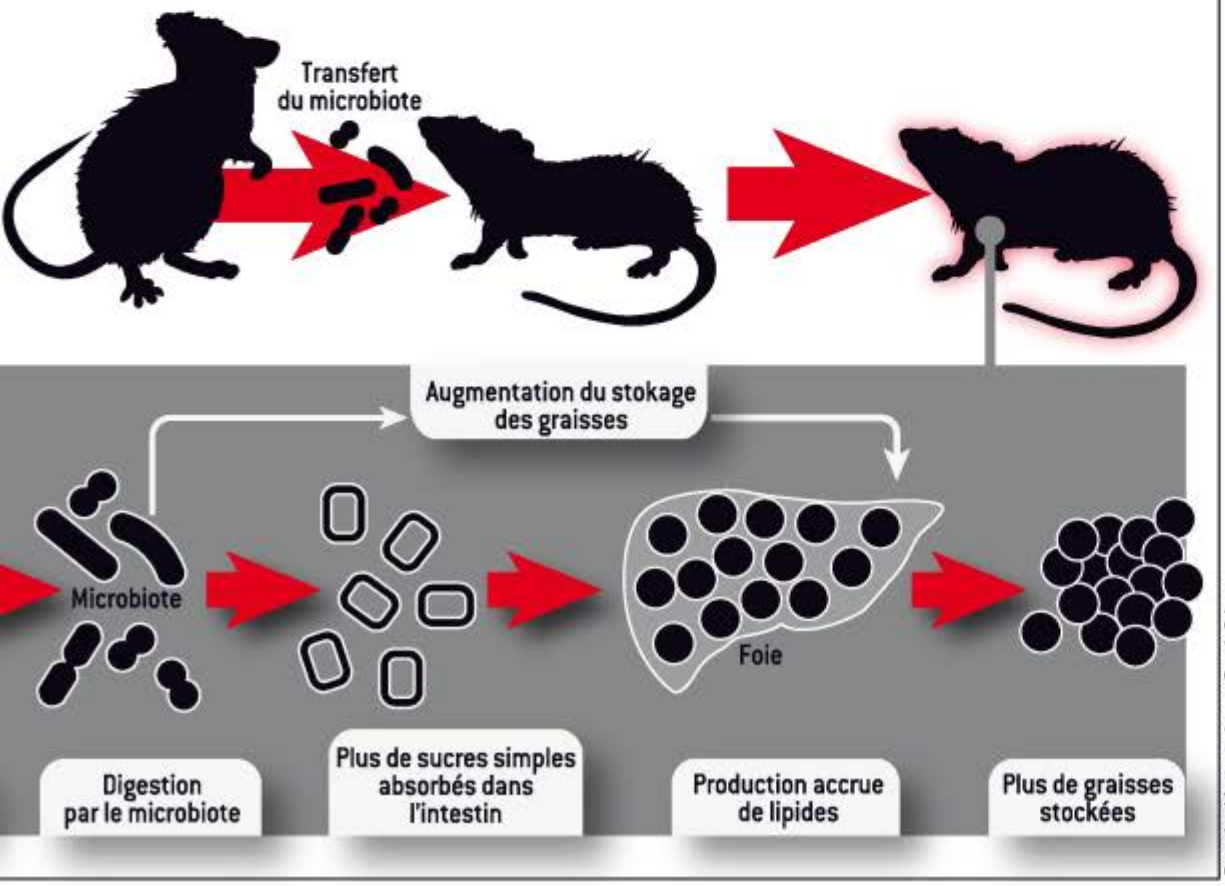
Quelles étaient les bactéries intestinales responsables de ce phénomène ? Pour répondre à cette question, on a d'abord recherché si des souris génétiquement obèses (dont le gène de la leptine, une hormone régulant la satiété, avait été muté) hébergeaient un microbiote différent de celui de souris sauvages. La réponse fut positive : le microbiote des souris obèses présentait une proportion accrue de bactéries de la famille des *Firmicutes* et une plus faible proportion de *Bacteroidetes*, associées à une présence plus importante d'une autre famille, les *Archaea* méthanogènes. Il fallait donc à présent déterminer si les différences de composition du microbiote entraînaient des différences dans le métabolisme des aliments. Notamment, le microbiote des souris obèses extrayait-il de façon plus efficace l'énergie présente dans les aliments ? Plus le nombre de calories extraites est important, plus leur stockage sous la forme de graisse l'est aussi.

Là encore, la réponse fut positive. On a observé, d'une part, que le microbiote de souris génétiquement obèses présentait une plus grande proportion de gènes impliqués dans la digestion des sucres

■ **L'AUTEUR**

Philippe GÉRARD est chercheur au laboratoire Micalis (UMR1319, Inra, AgroParisTech), à Jouy-en-Josas.

STOCKAGE DES GRAISSES



© nemlaza/shutterstock.com ; Pour la Science

complexes et, d'autre part, que le nombre de calories résiduelles présentes dans les fèces de ces souris était plus faible que celui de souris minces, signe que les souris obèses récupéraient plus d'énergie des aliments que les souris minces.

L'assimilation des sucres perturbée

Enfin, pour confirmer que des microbiotes distincts modulent de façon différente le métabolisme énergétique de l'hôte, les microbiotes de souris obèses ou de souris non mutées ont été transférés chez des souris sans germes. L'augmentation de la masse grasse s'est révélée plus importante chez les souris qui avaient reçu le microbiote de souris obèses : les souris receveuses avaient acquis des capacités de stockage des graisses comparables à celles de leurs donneuses obèses.

Plus récemment, notre équipe a observé que le type de microbiote implanté influe non seulement sur le développement de l'obésité, mais aussi sur les troubles métaboliques associés. Nous avions remarqué que lorsqu'on administre un régime riche en graisses à des souris normales, certaines, mais pas toutes, développent des troubles métaboliques fréquemment associés à l'obésité, tels qu'une résistance à l'insuline ou une stéatose hépatique – une lésion du foie liée à une accumulation de graisse dans les cellules hépatiques.

Afin de déterminer si le microbiote intestinal était responsable de ces réponses différentes au régime hyperlipidique, deux groupes de souris axéniques ont été colonisés soit avec le microbiote d'une souris qui avait développé une résistance à l'insuline et une stéatose hépatique, soit avec le microbiote d'une souris qui n'avait pas développé ces complications métaboliques *(voir l'encadré ci-dessous)*. Les deux souris donneuses avaient suivi un régime riche en graisses pendant 16 semaines et avaient le même poids. Le groupe ayant reçu le premier microbiote a alors développé une hyperglycémie et une hyperinsulinémie (les concentrations de sucres et d'insuline dans le sang étaient plus élevées que la normale), signes d'un dysfonctionnement du métabolisme des sucres. En revanche, les souris ayant reçu le second microbiote présentaient une glycémie normale. Les premières souris avaient aussi développé une stéatose, contrairement aux secondes.

Ainsi, un nombre croissant d'études utilisant des animaux axéniques et des transplantations de microbiote ont montré que celui-ci peut être une cause du développement de l'obésité et des pathologies associées. Les bactéries responsables de ces effets restent peu connues. Néanmoins, des chercheurs de l'Université de Shanghaï, en

■ BIBLIOGRAPHIE

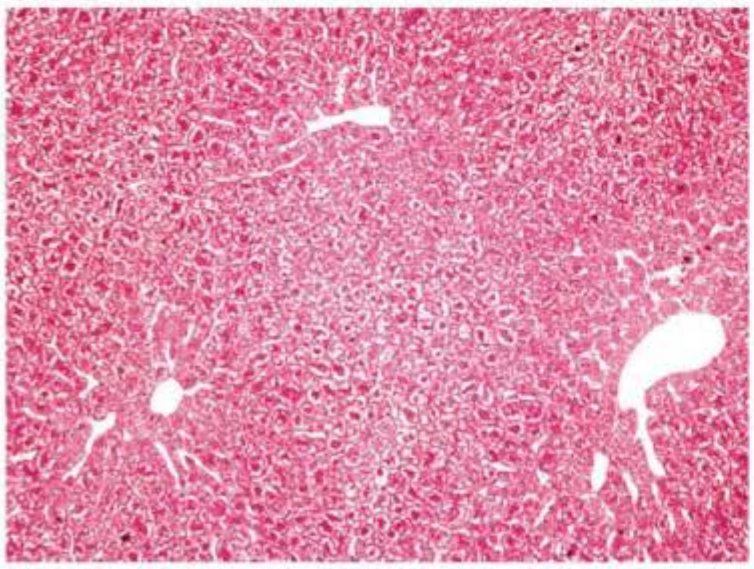
T. Le Roy *et al.*, **Intestinal microbiota determines development of non-alcoholic fatty liver disease in mice**, *Gut*, vol. 62, pp. 1787-1794, 2013.

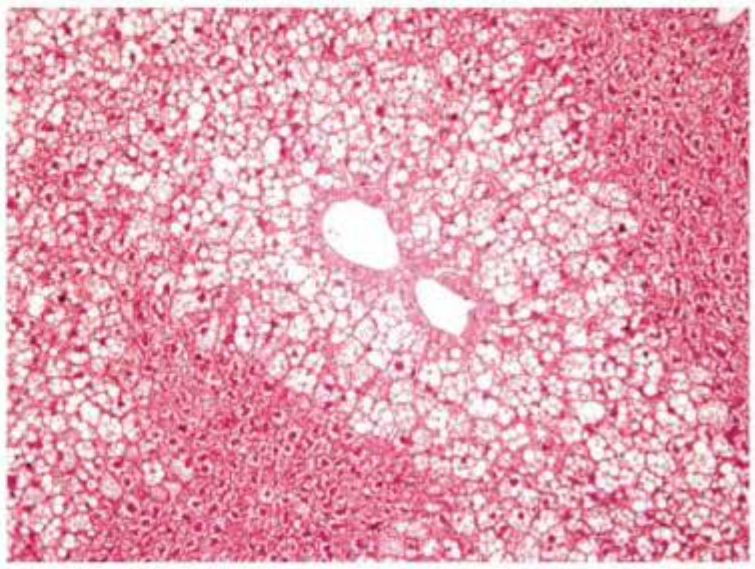
V. K. Ridaura *et al.*, **Gut microbiota from twins discordant for obesity modulate metabolism in mice**, *Science*, vol. 341, 1241214, 2013.

N. M. Delzenne et P. D. Cani, **Interaction between obesity and the gut microbiota : relevance in nutrition**, *Annual Review of Nutrition*, vol. 31, pp. 15-31, 2011.

P. Gérard et A. Bernalier-Donadille, **Les fonctions majeures du microbiote intestinal**, *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, vol. 42, pp. S28-S36, 2007.

TROUBLES MÉTABOLIQUES : LA FLORE INTESTINALE EST AUSSI IMPLIQUÉE





Le microbiote intestinal pourrait jouer un rôle dans le développement non seulement de l'obésité, mais aussi des troubles métaboliques associés, telle une stéatose hépatique, une lésion du foie. C'est ce que les auteurs ont montré en implantant dans l'intestin de souris sans germes le microbiote soit d'une souris en bonne santé, soit d'une souris présentant des troubles métaboliques, dont une stéatose hépatique. Contrairement aux premières *(à gauche)*, les secondes ont développé une stéatose hépatique massive en réponse à un régime hyperlipidique, qui se traduit par l'accumulation de gouttelettes de lipides dans les cellules du foie *(à droite, en blanc)*.

© Stephan Bouet, Atelier d'histologie, INRA

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

Le microbiote intestinal en cause dans l'inflammation chronique ?

L'obésité, comme ses complications métaboliques (résistance à l'insuline, diabète de type 2), est associé à une inflammation chronique peu intense. Cette constatation récente a conduit Patrice Cani, de l'Université catholique de Louvain, et ses collègues, à proposer un mécanisme liant le microbiote intestinal et cette inflammation systémique.

Leur hypothèse est que les lipopolysaccharides ou LPS, constituants de la paroi de certaines bactéries présentes dans l'intestin, agiraient comme un facteur déclenchant lors d'une alimentation riche en graisses. Les LPS sont parmi les molécules les plus inflammatoires. En temps normal, ils sont libérés de façon continue dans l'intestin à la mort des bactéries. Ils sont alors absorbés par les parois intestinales, puis transportés dans l'organisme. Comportant une partie lipidique, ils atteignent les régions cibles des lipides – le tissu adipeux. Ils sont alors reconnus par des cellules du système immunitaire – des macrophages – qui déclenchent une réaction inflammatoire. La concentration de LPS est cependant trop faible pour que l'inflammation soit détectable.

En revanche, plusieurs études ont montré chez la souris qu'un régime hyperlipidique, en altérant le microbiote intestinal, facilite l'absorption de LPS par la paroi intestinale et augmente sa concentration dans le sang. Cette augmentation pourrait entraîner une réaction inflammatoire chronique dans tout l'organisme, telle celle observée dans l'obésité et ses complications.

Chez l'homme, le lien de cause à effet n'est pas établi, mais plusieurs études suggèrent que les LPS pourraient jouer un rôle dans l'apparition des troubles liés à un mauvais métabolisme. Notamment, la concentration de LPS dans le sang est plus élevée chez des individus présentant un diabète de type 2.

– P. G.

Chine, ont récemment isolé une bactérie candidate dans l'intestin d'un patient obèse. Implantée seule dans le tube digestif de souris axéniques, cette bactérie, nommée *Enterobacter cloacae B29*, les rend obèses en réponse à un régime hyperlipidique, ce dont seul un microbiote complexe s'était révélé capable jusqu'à présent.

À l'inverse, l'équipe de Patrice Cani, à l'Université catholique de Louvain, en Belgique, a montré que l'espèce *Akkermansia muciniphila* peut avoir un effet protecteur vis-à-vis de l'obésité. Cette bactérie, qui représente 3 à 5% du microbiote intestinal chez une personne en bonne santé, se nourrit du mucus qui tapisse l'intestin. L'équipe avait observé que, soumises à un régime hyperlipidique, des souris avaient tendance à devenir obèses et que la proportion d'*Akkermansia muciniphila* dans leur microbiote diminuait fortement. Ils ont alors administré cette bactérie aux souris devenues obèses, ce qui a entraîné une perte de poids, en particulier de masse grasse, associée à une amélioration de la sensibilité à l'insuline.

Et chez l'homme ?

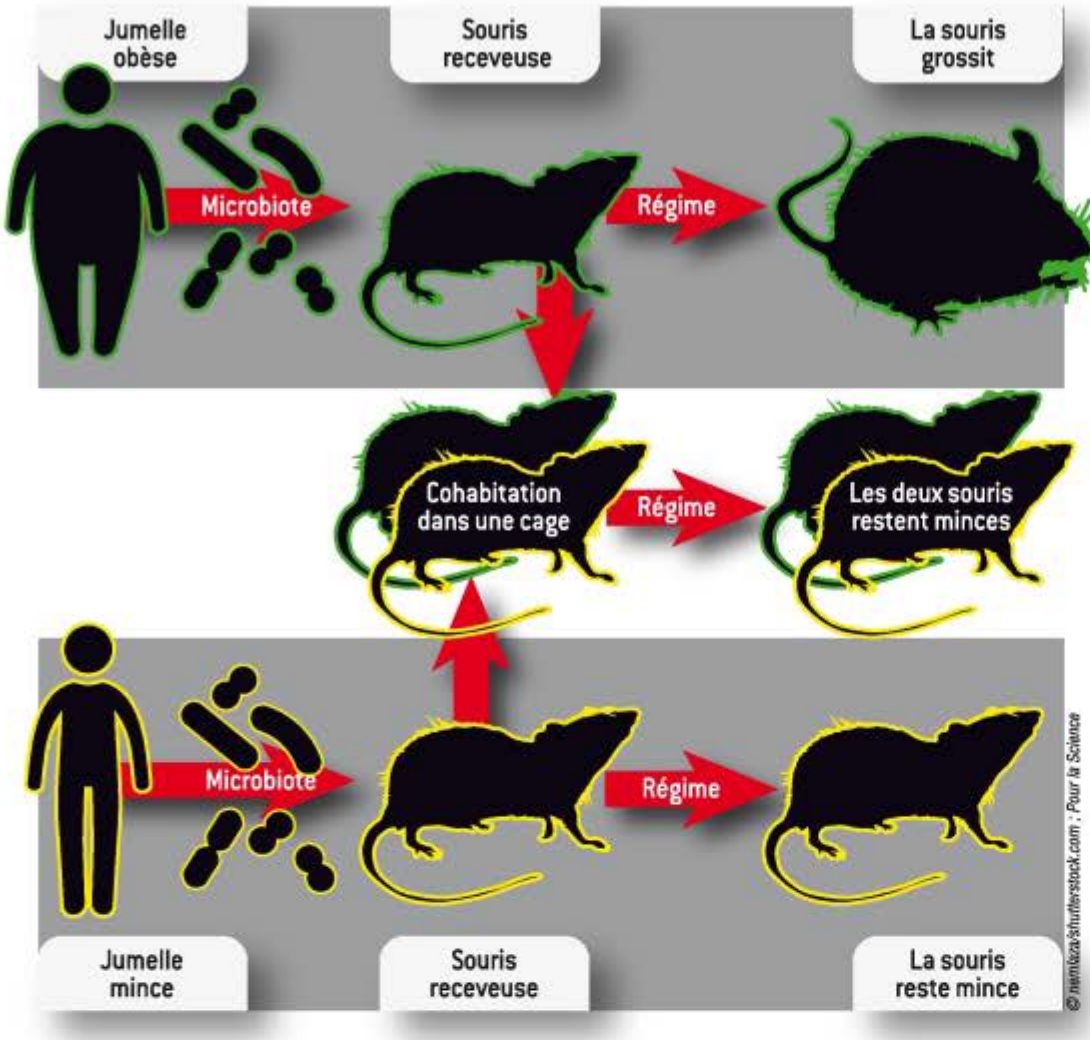
Les études chez l'homme ont elles aussi confirmé que les proportions des grandes familles bactériennes dans le microbiote intestinal diffèrent entre personnes obèses et personnes minces. À commencer par la première étude du lien entre microbiote intestinal et obésité chez l'homme, réalisée en 2006 par l'équipe de J. Gordon.

Les biologistes de l'Université Washington ont comparé le microbiote d'humains obèses et minces. Ils ont observé que les sujets obèses hébergeaient une moindre proportion de *Bacteroidetes* et plus de *Firmicutes* que les sujets minces, comme cela avait été décrit chez la souris. La composition du microbiote pouvait-elle changer lorsque les personnes obèses maigrissaient ? Pour le savoir, les biologistes ont soumis les 12 sujets obèses de l'étude à un régime hypocalorique, appauvri soit en lipides, soit en glucides. La perte de poids a permis de restaurer un profil bactérien similaire à celui des sujets minces, indépendamment du type de régime instauré. En outre, plus la perte de poids était importante, plus la proportion de *Bacteroidetes* dans leur microbiote augmentait. Ainsi, la proportion de ces bactéries dans le microbiote semblait liée au degré de surpoids. Avaient-elles un effet protecteur vis-à-vis de l'obésité ?

La réponse obtenue n'est pas claire : après cette première étude chez l'humain, de nombreux laboratoires ont à leur tour comparé le microbiote d'individus minces et obèses, et les conclusions étaient discordantes. Ainsi, une étude réalisée chez des vrais et des faux jumeaux adultes a confirmé que les sujets obèses présentaient une plus faible proportion de *Bacteroidetes* dans leur microbiote que les sujets minces. Mais cette fois, elle était associée à une plus grande proportion d'*Actinobacteria*, tandis que la proportion de *Firmicutes* ne différait pas entre obèses et non obèses. À l'inverse, d'autres études n'ont pas observé de différence entre obèses et minces dans les proportions de *Bacteroidetes*, ou ont noté une plus grande proportion de cette population chez les individus obèses.

Plus récemment, une étude menée par le consortium international MetaHIT a porté sur une cohorte de 292 adultes danois comprenant 123 personnes non obèses et 169 obèses. Ce projet, coordonné par l'Inra, rassemblait 14 organismes de recherche et industriels européens (France, Allemagne, Danemark, Espagne, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni) et la Chine. Les chercheurs ont analysé le génome bactérien intestinal de ces individus grâce à une nouvelle technique, la métagénomique quantitative. Il ressort que deux groupes d'individus se distinguent selon le nombre de gènes microbiens différents de leur microbiote. Ainsi, environ un quart des individus sont « pauvres » en espèces bactériennes, avec un microbiome (l'ensemble des gènes du microbiote) constitué de moins de 500 000 gènes bactériens, tandis que le reste de la population héberge un microbiote plus diversifié comprenant 600 000 gènes en moyenne.

Et si l'on retrouve ces deux groupes aussi bien chez les individus obèses que chez les individus non obèses, les personnes pauvres en bactéries intestinales ont un risque plus important que les personnes riches en bactéries de développer des complications liées à l'obésité : diabète de type 2, problèmes lipidiques, hépatiques, cardiovasculaires, voire certains cancers... Par ailleurs, une intervention nutritionnelle



LE MICROBIOTE INTESTINAL D'UNE PERSONNE MINCE peut protéger une souris de l'obésité. C'est ce qu'une équipe a montré en 2013 en transférant le microbiote de couples de jumelles, l'une obèse, l'autre mince, dans l'intestin de souris sans germes. Soumises à un régime pauvre en graisse et riche en fibres, les souris ayant reçu le microbiote « obèse » ont grossi *(en haut)*, contrairement aux autres *(en bas)*. Mais quand les souris cohabitaient, aucune ne grossissait *(au centre)* : manger les crottes des souris à microbiote « mince » a protégé celles ayant un microbiote « obèse »...

ayant pour objectif de réduire l'indice de masse corporelle de patients obèses s'est révélée plus efficace chez ceux hébergeant un microbiote riche en bactéries.

L'ensemble de ces résultats ne permet donc pas d'établir un type de microbiote intestinal associé à l'obésité, mais suggère plutôt qu'une combinaison de facteurs environnementaux et génétiques contribue à l'établissement, chez un individu, d'un microbiote spécifique, qui pourrait alors favoriser ou non le développement d'une obésité. Par ailleurs, ces résultats ne permettent pas de déterminer si les différences de microbiote observées chez l'homme sont les causes ou les conséquences de l'obésité.

C'est ainsi que l'idée de transférer des microbiotes humains à des souris axéniques est apparue. En effet, si le microbiote intestinal est la cause de la prise de poids chez certains individus obèses, leur microbiote devrait également être capable de rendre des souris obèses ! Encore une fois, l'expérience a été réalisée par l'équipe de J. Gordon, en 2013. L'étude a été réalisée avec le microbiote de jumelles dont une seule des deux était obèse. Les microbiotes des sœurs jumelles ont donc été transférés à des souris axéniques. Les souris receveuses ont alors exprimé le même phénotype que les jumelles donneuses : les souris ayant reçu le microbiote de la jumelle obèse sont devenues obèses, tandis que celles ayant reçu le microbiote de la jumelle mince restaient minces. Plus étonnant encore, lorsque les souris ont été mises à cohabiter dans la même cage après le transfert de microbiotes, toutes les souris restaient minces. Comment expliquer ce phénomène ?

Les souris sont coprophages, c'est-à-dire qu'elles mangent leurs crottes et peuvent ainsi échanger leurs microbiotes. Et dans ce cas précis, le microbiote issu de la jumelle mince est capable de supplanter celui de la jumelle obèse et de coloniser l'ensemble des souris. En particulier, des bactéries de la famille *Bacteroidetes* et issues du microbiote de la jumelle mince se sont révélées capables de coloniser les souris qui avaient reçu le microbiote de la jumelle obèse. Ces bactéries pourraient donc être responsables de la protection observée.

Ces résultats indiquent qu'il existe non seulement un type de microbiote capable de rendre obèse, mais aussi un microbiote capable de protéger contre le développement de l'obésité et susceptible de remplacer le microbiote obésogène. On pourrait donc imaginer, chez des patients obèses, de remplacer le microbiote intestinal existant par un microbiote capable de limiter le développement de l'obésité.

Soigner avec du microbiote ?

Ce procédé, nommé transplantation fécale, est appliqué depuis des décennies à des patients atteints d'infections récurrentes à *Clostridium difficile*, une bactérie responsable de colites potentiellement mortelles. Dans ce cas, la transplantation fécale se révèle trois à quatre fois plus efficace que les antibiotiques ! Chez des patients obèses, la méthode a été utilisée pour la première fois à l'hôpital de Groningen, aux Pays-Bas. Le microbiote intestinal de donneurs minces a été infusé à des donneurs obèses souffrant d'un syndrome métabolique (un ensemble de symptômes liés à un mauvais métabolisme). Bien que ce traitement n'ait eu aucun impact sur le poids des patients receveurs, leur sensibilité à l'insuline a été améliorée, avec des effets perdurant six semaines après l'infusion du microbiote.

Si cette méthode n'est probablement pas amenée à être généralisée dans le traitement de l'obésité et des pathologies associées, elle montre qu'une modification du microbiote intestinal peut améliorer, chez l'homme, des paramètres physiologiques liés à ces pathologies. De ce fait, de nouvelles stratégies visant à moduler le microbiote intestinal, en particulier nutritionnelles, pourraient voir le jour prochainement afin de combattre le développement de l'obésité. En particulier, l'utilisation de prébiotiques, c'est-à-dire de sucres complexes échappant à la digestion dans l'intestin grêle et favorisant la croissance ou l'activité des bactéries intestinales bénéfiques à notre santé, pourrait corriger les déséquilibres du microbiote associés à l'obésité et contribuer à une perte de poids, dans le cadre d'une prise en charge plus générale de la pathologie. ■

Actuellement en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE

Le cri du cœur de Jane GOODALL

La plus célèbre spécialiste des chimpanzés ne veut pas baisser les bras

DOSSIER POUR LA SCIENCE - PRIMATOLOGIE - PALÉONTOLOGIE - ÉTHOLOGIE - PSYCHOLOGIE

Leur avenir est entre nos mains

Nos cousins les grands singes

LE YÉTI A EXISTÉ !
Les humains l'ont rencontré il y a 3 millions d'années

LES GORILLES
De nouvelles preuves de leur culture

M 01930 - 86 - F: 6,95 € - RD

N° 86 Janvier-Mars 2015

pourlascience.fr

n° 86 – 120 pages – prix de vente : 6,95 €

www.pourlascience.fr
Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

Disponible sur App Store
Disponible sur Google play

Les maladies mentales viennent-elles du ventre ?

V. Daugé, M. Jaglin, L. Naudon et S. Rabot

Les indices d'une implication des bactéries intestinales dans certaines maladies mentales s'accumulent. Faut-il soigner celles-ci par le ventre plutôt que par le cerveau ?

Notre tube digestif abrite une communauté microbienne comptant près de cent mille milliards de bactéries. Composé d'environ un millier d'espèces différentes, ce « microbiote intestinal » représente une diversité génétique énorme. On le considère aujourd'hui comme un véritable organe, situé à l'interface des aliments ingérés, qu'il contribue à digérer, et de la muqueuse intestinale. Il échange des signaux moléculaires avec cette dernière, ce qui lui permet *in fine* de communiquer avec tout l'organisme. Au cours des dix dernières années, le séquençage du génome du microbiote (le métagénome) et l'analyse des espèces chimiques qu'il produit ont progressé grâce à diverses avancées techniques. Les chercheurs ont alors accumulé des preuves d'un lien entre la physiologie de l'hôte et le microbiote, qui va jusqu'à influencer le cerveau.

On a ainsi montré que certaines maladies étaient associées à des déséquilibres du microbiote, nommés dysbioses. L'encéphalopathie hépatique est l'une d'elles. Ce syndrome neuropsychiatrique se manifeste, entre autres, par de l'anxiété et des troubles de l'humeur et de la cognition. Il est principalement causé par une insuffisance hépatique (un dysfonctionnement du foie), mais il se caractérise aussi par une composition particulière du microbiote intestinal. Ce dernier produit en quantité excessive certaines substances, tel l'ammoniac, qui ne sont plus détoxifiées par le foie et s'accumulent de façon anormale dans la circulation sanguine et le cerveau.

L'utilisation d'antibiotiques ou de prébiotiques (des composés alimentaires non digestibles qui stimulent l'activité ou la croissance des bactéries intestinales) permet de diminuer les troubles neuropsychiatriques, signe d'une influence du microbiote sur le cerveau. Cette influence s'exerce-t-elle même dans un organisme sain ? Joue-t-elle un rôle dans d'autres maladies du système nerveux central ? Par quels mécanismes les bactéries intestinales peuvent-elles agir à distance sur le cerveau ? C'est à ce type de questions qu'un nombre croissant de chercheurs tentent de répondre depuis quelques années.

Les biologistes ont mis au point deux stratégies pour étudier l'effet du microbiote

L'ESSENTIEL

- **Le microbiote intestinal communique avec le cerveau par les voies sanguine et nerveuse. Il influe ainsi sur le comportement.**
- **Des déséquilibres du microbiote pourraient être en cause dans certaines maladies neurodéveloppementales ou psychiatriques, telles que l'autisme et la dépression.**
- **Des résultats préliminaires suggèrent que ces maladies pourraient être soignées en corrigeant ces déséquilibres.**

© DmitriMaruta/Shutterstock.com

intestinal sur le cerveau. La première se fonde sur des animaux dits axéniques, qui sont privés de ce microbiote ; on observe les dysfonctionnements de leur organisme et on tente de les corriger par l'inoculation d'un microbiote. La seconde stratégie, appliquée à la fois chez l'homme et chez l'animal, consiste à moduler le microbiote intestinal par l'administration d'antibiotiques, de prébiotiques et de probiotiques (des bactéries ou des levures qui ont divers effets sur le microbiote, dont elles corrigent les déséquilibres dans certains cas), puis à analyser les conséquences.

Chez les rongeurs axéniques, le principal dysfonctionnement est une hypersensibilité au stress *(voir l'encadré page 44)*, constatée pour la première fois en 2004 par Nobuyuki Sudo, de l'Université de Ky sh , au Japon, et ses collègues. Après avoir immobilisé des souris axéniques et des souris normales pendant une heure, les chercheurs ont montré que la concentration sanguine de corticostérone, une hormone liée au stress, était doublée chez les animaux dépourvus de microbiote. Par la suite, ce résultat a été confirmé à plusieurs reprises, d'abord chez la souris à l'Université McMaster au Canada et à l'Université de Cork en Irlande, puis chez le rat par notre équipe à l'Inra.

Le microbiote semble donc avoir un effet modérateur sur la réponse au stress. Peut-on obtenir un effet déstressant en le modulant ? Deux études réalisées en 2011 et 2012 par Javier Bravo, de l'Université de Cork, et ses collègues, et par Afifa Ait-Belgnaoui, de l'Inra, le suggèrent. Les chercheurs ont montré que l'administration de bactéries probiotiques à des rats et des souris atténue la libération de corticostérone provoquée par des situations stressantes.

Au niveau comportemental, la réponse au stress se traduit par divers effets : combat, fuite, comportements anxieux... Ces derniers ont été les plus étudiés, à l'aide de tests consistant à analyser la réaction de rongeurs placés dans des situations anxiogènes : forte luminosité, espace ouvert non protégé... Au cours de ces tests, la réponse comportementale des rongeurs axéniques diffère presque toujours de celle de leurs congénères. Les comportements anxieux peuvent être augmentés ou atténués selon les rongeurs et les tests utilisés (ces comportements dépendent de multiples paramètres et ne varient pas forcément de la même

LES SYMPTÔMES DE L'AUTISME, notamment le manque de sociabilité, ont pu être atténués chez des souris en agissant sur les bactéries intestinales.

façon que la concentration de corticostérone), de sorte que le sens de la régulation exercée par le microbiote fait débat. En revanche, l'inoculation d'un microbiote aux animaux axéniques conduit toujours à une normalisation du comportement anxieux, ce qui confirme l'existence de cette régulation.

Une influence sur les émotions

De façon générale, le microbiote influencerait la réactivité émotionnelle, comme le suggère une étude réalisée en 2013 par Kirsten Tillisch, de l'Université de Californie à Los Angeles, et ses collègues. Des femmes ayant consommé durant un mois un produit laitier enrichi en probiotiques accordaient moins d'attention à des stimulus émotionnels négatifs, tels des visages exprimant la peur ou l'anxiété ; en outre, l'imagerie cérébrale par résonance magnétique (IRM) a révélé que cette consommation modifiait l'activité de structures cérébrales impliquées dans la perception sensorielle et le contrôle des émotions.

En 2013, l'équipe de Timothy Dinan, à l'Université de Cork, a montré que l'absence de microbiote détériore le comportement social. Par exemple, dans un test de sociabilité utilisant un dispositif à trois chambres, les souris axéniques préfèrent la chambre vide à celle hébergeant un congénère, et vont plus volontiers vers une souris qu'elles connaissent que vers une inconnue. Ce comportement traduit une motivation sociale moindre et une peur de la nouveauté. L'inoculation d'un microbiote rétablit chez ces souris un comportement social comparable à celui de souris normales. Nous avons abouti à la même conclusion chez le rat en 2014 : des rats axéniques mis en présence d'un congénère inconnu engagent moins de contacts sociaux que des animaux normaux.

Les mécanismes impliqués restent à préciser, mais diverses modifications

LES AUTEURS

Valérie DAUGÉ, Mathilde JAGLIN, Laurent NAUDON et Sylvie RABOT sont respectivement directrice de recherche, doctorante et chargés de recherche à l'Institut Micalis (UMR1319), au Centre Inra de Jouy-en-Josas.

BIBLIOGRAPHIE

M. Crumeyrolle-Arias *et al.*, **Absence of the gut microbiota enhances anxiety-like behavior and neuroendocrine response to acute stress in rats,** *Psychoneuroendocrinology*, vol. 42, pp. 207-217, 2014.

J. A. Gilbert *et al.*, **Toward effective probiotics for autism and other neurodevelopmental disorders,** *Cell*, vol. 155, pp. 1446-1448, 2013.

DES BACTÉRIES DÉSTRESSANTES

Plusieurs expériences sur des rongeurs suggèrent que les bactéries intestinales modèrent la réponse au stress. En effet, placés en situation stressante, des souris ou des rats ont une plus grande concentration sanguine de corticostérone, hormone du stress équivalente au cortisol chez l'homme, s'ils n'ont pas de microbiote intestinal.

Cette hormone est synthétisée par les glandes surrénales, situées au-dessus des reins, à la suite d'une cascade de réactions déclenchée par une région du cerveau, l'hypothalamus. Elle a de nombreuses actions, qui permettent à l'organisme de se défendre face au stimulus stressant : augmentation de la pression sanguine, mobilisation des ressources énergétiques... Elle se lie aussi à des récepteurs spécifiques sur les neurones de l'hippocampe, une région du cerveau essentielle à diverses fonctions (apprentissage, mémoire, etc.). Un stress intense peut alors conduire à une concentration excessive de corticostérone et à une dégradation de ces fonctions.

Une piste pour diminuer la réponse au stress est alors de moduler le microbiote intestinal. Plusieurs équipes y sont parvenues chez les rongeurs, grâce à l'administration de probiotiques.

LES COMPORTEMENTS ANXIEUX sont une manifestation possible de la réponse au stress. Chez les rongeurs, on les quantifie grâce à divers dispositifs expérimentaux. Plus une souris est anxieuse, plus elle met de temps à descendre d'une plate-forme *(à gauche)*, et plus elle s'abrite dans les bras fermés d'un dispositif en croix *(à droite)*.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

chimiques du cerveau ont été observées. Les bactéries intestinales influent notamment sur la concentration cérébrale de plusieurs neurotransmetteurs (les substances assurant la communication entre neurones) tels que la dopamine, la sérotonine ou la noradrénaline, et sur celle de neurotrophines (des protéines favorisant la croissance et la survie des neurones). Ainsi, chez les animaux axéniques ou qui ont consommé des probiotiques, les concentrations de ces substances sont modifiées dans plusieurs régions du cerveau. La façon dont le microbiote influe sur ces concentrations est encore inconnue.

Un lien entre microbiote et autisme

Ces études révèlent l'influence du microbiote sur le cerveau et les effets néfastes de ses déséquilibres. Certaines pathologies neurodéveloppementales ou psychiatriques humaines seraient-elles liées à de tels déséquilibres ? Nous avons vu que pour un syndrome neuropsychiatrique complexe, l'encéphalopathie hépatique, ce lien est établi. Un faisceau d'indices suggère une implication du microbiote dans d'autres pathologies, telles que les maladies du spectre de l'autisme et les troubles de l'humeur *(voir l'encadré page 46)*.

Ainsi, plusieurs travaux ont révélé que le microbiote intestinal d'enfants autistes présentait des différences avec celui d'enfants témoins. L'activité métabolique du microbiote était également particulière, comme l'ont révélé les métabolites retrouvés dans les matières fécales et dans l'urine. Précisons cependant que dans ces études, beaucoup d'enfants autistes avaient reçu de façon répétée dans leur jeune âge des antibiotiques à large spectre, ou suivaient un régime alimentaire spécifique en raison de troubles gastro-intestinaux fréquents. Ces deux éléments ont pu causer un déséquilibre du microbiote intestinal sans rapport avec leur pathologie.

Néanmoins, l'hypothèse d'un rôle du microbiote dans l'autisme est accréditée par des résultats publiées en 2013 et obtenus par l'équipe de Sarkis Mazmanian, de l'Institut de technologie de Californie (Caltech), à Pasadena, sur un modèle de souris imitant les anomalies comportementales de la maladie : comportement asocial et stéréotypé, anxiété, déficit de vocalisations (assimilable à des troubles de la communication)… Le microbiote de ces souris présentait des particularités de composition et d'activité métabolique qui évoquaient celles des enfants autistes. Les chercheurs ont ensuite montré que la modification du microbiote intestinal peut améliorer les anomalies comportementales de ces souris : les symptômes de celles traitées avec une souche bactérienne de l'espèce *Bacteroides fragilis* se sont atténués, tandis que leur microbiote se normalisait.

Quelques résultats commencent à être obtenus chez l'homme. En 2000, les équipes de Richard Sandler, de l'Hôpital pour enfants Rush, à Chicago, et de Sidney Finegold, de l'Université de Californie à Los Angeles, ont mené un essai clinique chez un petit groupe d'enfants âgés de quatre à sept ans et atteints d'autisme régressif (une forme d'autisme apparaissant tardivement, après l'âge de 18 mois). Les enfants ont reçu de la vancomycine, un antibiotique ciblant certains groupes de bactéries intestinales dont la composition est différente chez les personnes autistes (et chez les modèles de souris autistes). Leurs anomalies comportementales se sont alors atténuées et leur capacité à s'exprimer s'est améliorée. Ces résultats étayent l'hypothèse d'une implication du microbiote intestinal dans l'autisme. De nombreux autres essais cliniques seront cependant nécessaires pour la confirmer.

Un antibiotique qui soigne la dépression ?

Qu'en est-il des troubles de l'humeur, telle la dépression ? Plusieurs travaux ont montré que la composition du microbiote intestinal est bouleversée chez des rongeurs présentant un comportement de type dépressif, provoqué soit par une séparation de leur mère dans la petite enfance, soit par la mise hors service de leur système olfactif à l'âge adulte (par l'intermédiaire d'une opération chirurgicale au cerveau). Chez l'homme, une équipe de la Faculté de médecine d'Izumo, au Japon, a découvert en 2012 qu'un antibiotique, la minocycline, atténue les symptômes dépressifs, tels que la tristesse, les insomnies, l'anxiété, etc. Malheureusement, aucune analyse du microbiote intestinal n'a été réalisée dans cette étude, de sorte qu'on ignore si l'effet bénéfique est dû à une modification du microbiote ou aux propriétés anti-inflammatoires et neuroprotectrices de la minocycline (qui limite la mort des neurones et le stress oxydant).

Glossaire

Animal axénique
Animal dépourvu de microbiote intestinal, car né et élevé en conditions stériles.

Cytokines
Molécules synthétisées par les cellules du système immunitaire et agissant à distance sur d'autres cellules. Certaines peuvent causer des inflammations.

Prébiotiques
Composés alimentaires non digestibles qui améliorent la santé de l'hôte en stimulant la croissance ou l'activité d'un nombre limité de bactéries intestinales.

Probiotiques
Bactéries ou levures qui, administrées en quantité adéquate, améliorent la santé de l'hôte. Ces organismes ne s'installent pas durablement dans le tube digestif, mais peuvent influer sur le microbiote.

D'autres essais cliniques ont montré que la consommation de bactéries probiotiques atténue le niveau d'anxiété et améliore l'humeur ou l'état émotionnel d'individus à tendance dépressive. Cet effet favorable des probiotiques a aussi été observé sur des modèles animaux de dépression. Par exemple, l'administration du probiotique *Bifidobacterium infantis* à des rats rendus « dépressifs » par une séparation précoce de leur mère améliore leur comportement. Parallèlement, plusieurs paramètres perturbés par la séparation redeviennent normaux, tels que le fonctionnement du système immunitaire et la concentration de noradrénaline (un neurotransmetteur dont le déficit serait une des causes de la dépression) dans le tronc cérébral, où elle est synthétisée.

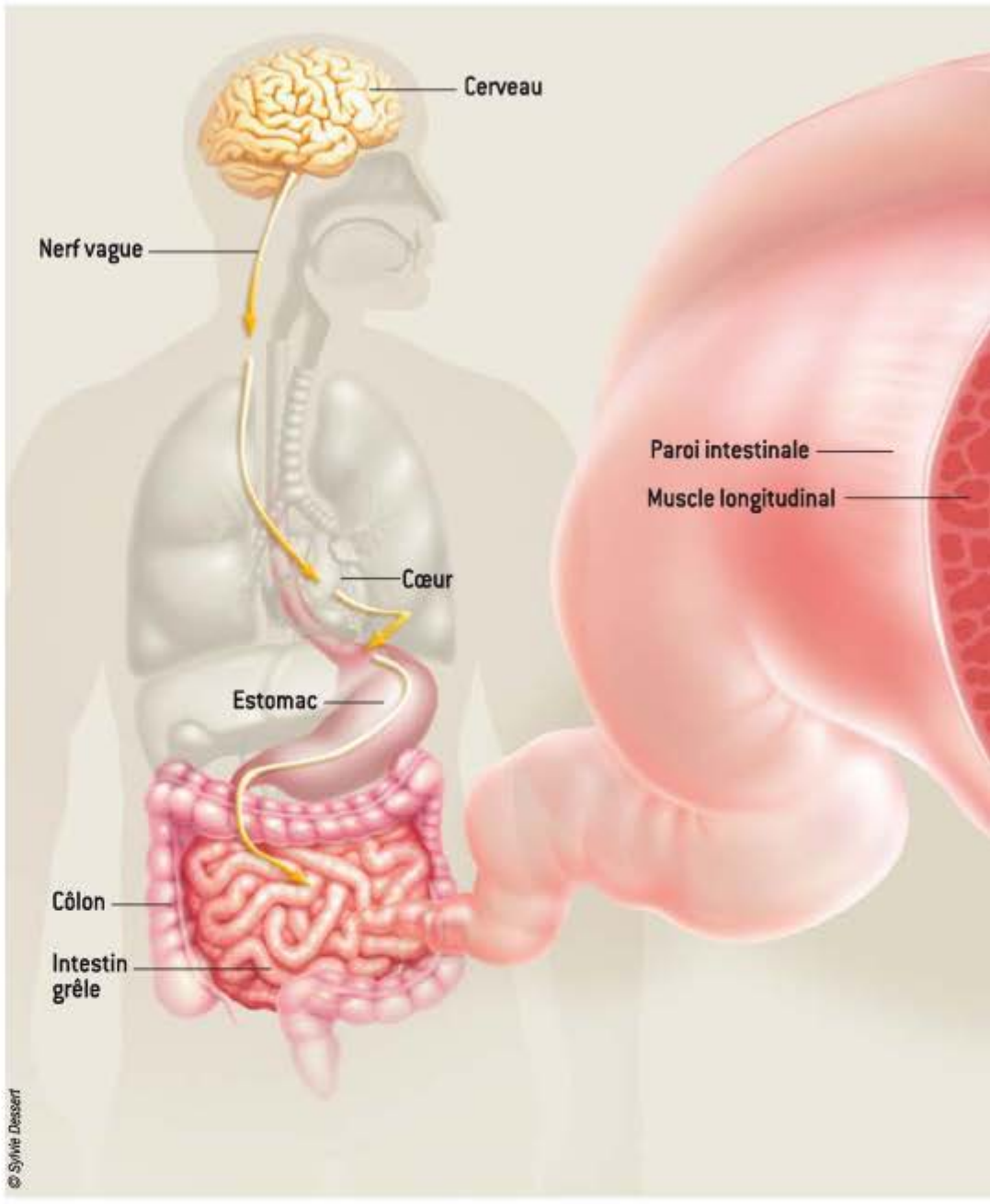
Là encore, de nombreux essais cliniques devront être réalisés pour établir l'efficacité des probiotiques dans le traitement de la dépression. Ces études préliminaires ont tout de même conduit l'équipe de T. Dinan à proposer de définir une nouvelle classe de probiotiques, les psychobiotiques : il s'agirait de micro-organismes vivants qui améliorent les symptômes de patients souffrant d'une maladie psychiatrique, en produisant dans leur intestin des molécules susceptibles d'interagir avec le cerveau.

Des ponts entre intestin et cerveau

Les mécanismes qui lient ces maladies aux bactéries intestinales restent à élucider, mais on connaît plusieurs moyens par lesquels le microbiote influe sur le cerveau. Deux catégories de molécules seraient en cause : d'une part, celles produites par l'activité métabolique des bactéries et libérées dans l'intestin (il s'agit par exemple d'acides gras issus d'un processus de fermentation) ; d'autre part, celles qui constituent l'enveloppe des bactéries, leurs cils ou leurs flagelles (des prolongements cellulaires dotés de fonctions sensorielles ou motrices). L'action de ces molécules sur le cerveau peut être directe ou indirecte. Dans le premier cas, elles passent dans le sang ou activent les voies nerveuses innervant la muqueuse intestinale. Dans le second, elles provoquent la libération par la muqueuse de certains composés, qui à leur tour passent dans le sang ou activent les voies nerveuses *(voir l'encadré ci-contre)*.

Les bactéries intestinales libèrent dans l'intestin des molécules très variées,

COMMENT LE MICROBIOTE



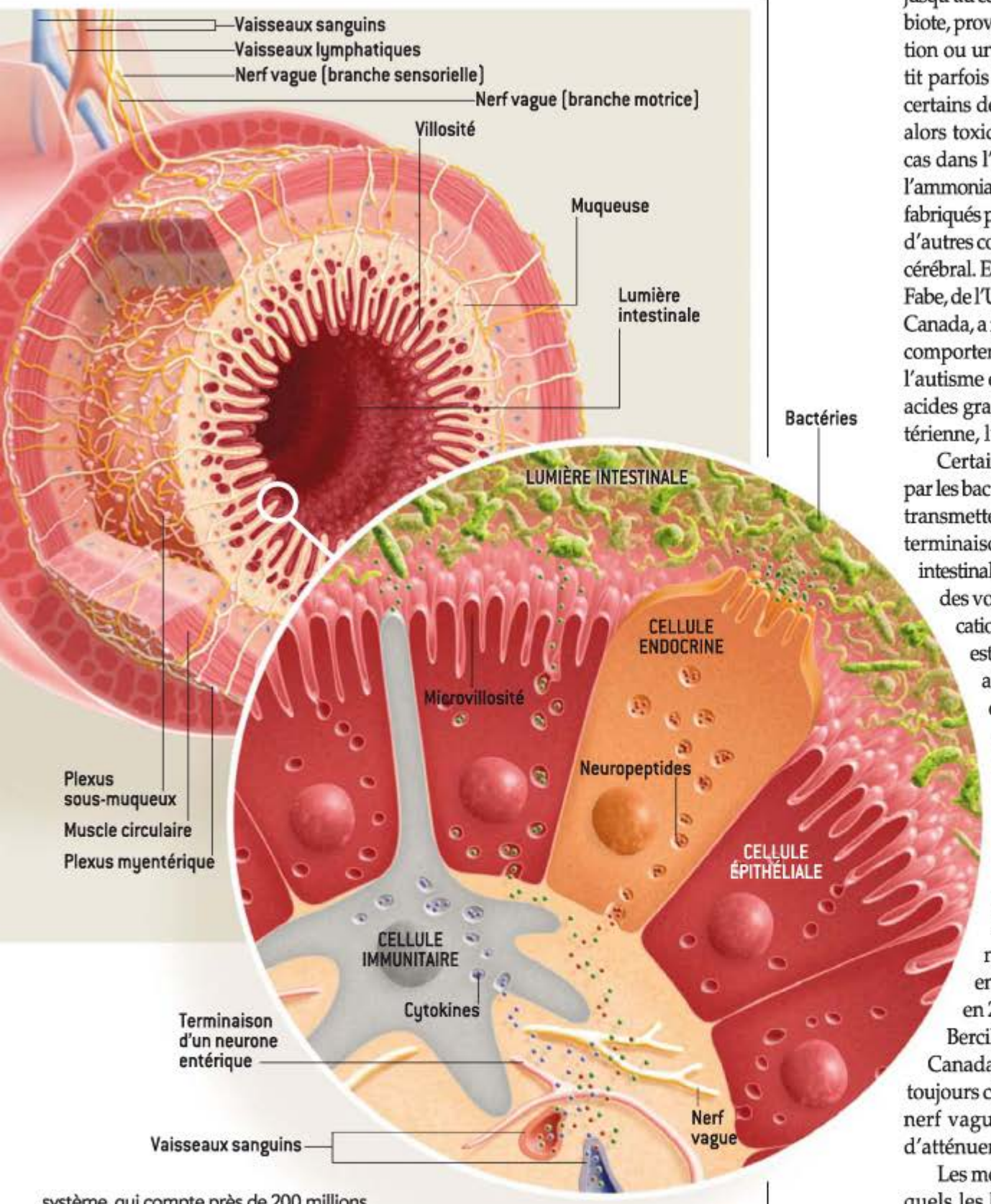
Le microbiote intestinal agit sur le cerveau par les voies sanguines et nerveuses. Il sécrète et libère toutes sortes de molécules *(billes vertes)*, qui rencontrent les villosités tapissant l'intestin. Chaque villosité comprend une couche externe, dite épithéliale, composée de cellules épithéliales et endocrines, ainsi qu'une couche sous-épithéliale, truffée de terminaisons nerveuses et de vaisseaux sanguins *(zoom à droite)*. Des cellules immunitaires glissent des prolongements entre les cellules épithéliales.

Une partie des molécules produites par les bactéries traversent les cellules épithéliales, tandis que d'autres se fixent sur les prolongements des cellules immunitaires ou sur les cellules endocrines. Ces deux derniers types de cellules réagissent en libérant d'autres composés dans la couche sous-épithéliale. Les cellules immunitaires produisent des cytokines *(billes bleues)*, les cellules endocrines des neuropeptides *(billes rouges)*. Cette réponse peut aussi être déclenchée par les molécules constituant la structure externe des bactéries. Dans certains cas, par exemple lors d'un stress, la perméabilité augmente et des fragments de bactéries en décomposition passent entre les cellules épithéliales pour atteindre également la couche sous-épithéliale.

Une fois arrivées dans cette couche, toutes ces molécules peuvent passer dans le sang ou activer les neurones du « système nerveux entérique », en se fixant sur leurs récepteurs membranaires. Ce

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

AGIT-IL SUR LE CERVEAU ?



système, qui compte près de 200 millions de neurones, est divisé en deux composantes : le plexus myentérique, qui commande les contractions musculaires et fait progresser les aliments dans l'intestin, et le plexus sous-muqueux, qui est sensible à l'environnement chimique et régule les sécrétions intestinales. Le système nerveux entérique influe sur le cerveau, notamment *via* le nerf vague.

Les molécules qui passent dans le sang ont également divers effets sur le cerveau. L'ammoniac fabriqué par les bactéries est toxique pour les neurones quand il est en quantité excessive. Les cytokines peuvent causer une inflammation des tissus nerveux. Les neuropeptides sont susceptibles d'activer les neurones. Les mécanismes liant les déséquilibres du microbiote à certaines maladies mentales restent à préciser, mais les modes d'action potentiels ne manquent donc pas.

susceptibles d'être transportées par le sang jusqu'au cerveau. Un déséquilibre du microbiote, provoqué par exemple par une infection ou un traitement antibiotique, aboutit parfois à une production excessive de certains de ces composés, qui deviennent alors toxiques pour l'organisme. C'est le cas dans l'encéphalopathie hépatique, où l'ammoniac et les acides gras à chaîne courte fabriqués par le microbiote concourent, avec d'autres composés, au dysfonctionnement cérébral. En 2010, l'équipe de Derrick MacFabe, de l'Université de Western Ontario, au Canada, a reproduit chez le rat des troubles comportementaux assimilables à ceux de l'autisme en injectant dans le cerveau des acides gras à chaîne courte d'origine bactérienne, l'acétate et le propionate.

Certaines des molécules synthétisées par les bactéries sont identiques aux neurotransmetteurs humains. Activent-elles les terminaisons nerveuses de la muqueuse intestinale ? On l'ignore, mais l'implication des voies nerveuses dans la communication entre le microbiote et le cerveau est avérée. Les bactéries intestinales agissent sur le système nerveux entérique, un ensemble de neurones situés dans la paroi intestinale et connectés au cerveau par l'intermédiaire du nerf vague. Ainsi, chez la souris, plusieurs expériences ont montré que l'administration de bactéries probiotiques diminue l'excitabilité d'une population de ces neurones, les neurones sensoriels entériques. Deux études réalisées en 2011 par les équipes de Premysl Bercik, de l'Université McMaster, au Canada, et de J. Bravo ont aussi révélé, toujours chez la souris, qu'une section du nerf vague empêchait les probiotiques d'atténuer un comportement anxieux.

Les mécanismes moléculaires par lesquels les bactéries intestinales agissent sur les terminaisons nerveuses entériques restent à préciser. Certains seraient en tout cas indirects : selon plusieurs études, le microbiote module l'activité des cellules endocrines de la muqueuse intestinale. Ces cellules sécrètent des petites protéines qui influent sur les neurones, les neuropeptides. Les neuropeptides modulent par exemple la satiété ou l'anxiété, agissant localement sur le système entérique, mais aussi à distance sur le cerveau grâce à leur passage dans le sang.

Quelles sont les maladies mentales liées au microbiote ?

Le microbiote intestinal jouerait un rôle dans plusieurs troubles neurodéveloppementaux et psychiatriques.

Troubles autistiques

Ils se manifestent par une altération qualitative des interactions sociales et de la communication, ainsi que par le caractère restreint, répétitif et stéréotypé des comportements, des intérêts et des activités.

Troubles de l'humeur

Ils sont de plusieurs types. La dépression se caractérise par des épisodes de détérioration de l'humeur accompagnés d'une faible estime de soi ou d'une perte de plaisir ou d'intérêt dans des activités habituellement ressenties comme agréables pour l'individu ; on mesure la sévérité des symptômes grâce à des questionnaires à choix multiple, tels que l'échelle de dépression de Hamilton. Les troubles bipolaires sont définis par la fluctuation anormale de l'humeur, oscillant entre joie et irritabilité, entre dépression et euthymie (état où l'humeur est normale, sans dépression ni euphorie).

Troubles anxieux

Ils sont caractérisés par un sentiment d'inconfort physique et psychologique qui nuit aux activités familiales, professionnelles et sociales. En font partie les troubles paniques (qui se manifestent par de fortes crises d'angoisse et par une perte de contrôle de la situation, survenant de façon inattendue), l'agoraphobie (la peur de la foule), les phobies sociales, les troubles obsessionnels compulsifs, les états de stress post-traumatique, l'anxiété généralisée et les troubles anxieux déclenchés par une affection médicale ou une intoxication.

Troubles des conduites alimentaires

Ces troubles complexes sont caractérisés par des habitudes alimentaires anormales, une crainte intense de prendre du poids et une grande préoccupation par rapport à l'image corporelle. Ils comprennent l'anorexie, la boulimie et d'autres troubles prenant des formes diverses.

Les cellules endocrines de l'intestin présentent de fins prolongements, qui sont en contact direct avec les bactéries. En culture cellulaire, l'activation de récepteurs situés sur ces prolongements par des molécules de l'enveloppe bactérienne provoque la sécrétion de cholécystokinine, un neuropeptide. D'autres travaux montrent que l'administration d'un mélange de probiotiques et de prébiotiques à des rats augmente la concentration sanguine d'un autre neuropeptide, le neuropeptide Y.

Le microbiote module d'autres types d'activités dans les cellules endocrines de l'intestin. Chez les rongeurs, la consommation d'une souche probiotique de *Lactobacillus acidophilus* augmente le nombre de récepteurs sensibles aux opiacés et aux cannabinoïdes à la surface de ces cellules. Cela provoque une baisse de sensibilité à la douleur, témoin d'un effet sur le cerveau dont les mécanismes sont à éclaircir.

Outre les systèmes nerveux et endocriniens, les bactéries intestinales font aussi réagir les cellules immunitaires qui peuplent la muqueuse. Dans certains cas de déséquilibre du microbiote ou d'invasion par des bactéries pathogènes, ces cellules produisent des molécules, les cytokines, qui entraînent des inflammations. Ces cytokines atteignent parfois le cerveau, où elles déclenchent une seconde production de cytokines pro-inflammatoires, cette fois par les cellules dites microgliales. Il s'ensuit une inflammation du tissu nerveux, qui s'accompagne de perturbations du comportement, telles qu'une perte d'intérêt pour l'environnement physique et social, une perte d'appétit ou des altérations cognitives.

Inversement, des études chez le rat ont montré que certaines bactéries probiotiques entraînent une baisse de la concentration de cytokines pro-inflammatoires dans le sang et un ralentissement de la dégradation des neurotransmetteurs dans le cortex cérébral. Toujours chez le rat, le probiotique *Lactobacillus farciminis* atténue l'augmentation des concentrations cérébrales de cytokines pro-inflammatoires consécutive à un stress. Ce probiotique limiterait l'accroissement de la perméabilité intestinale entraînée d'ordinaire par le stress, et donc l'accessibilité des composés bactériens aux cellules immunitaires productrices de cytokines.

Des chercheurs ont atténué le niveau d'anxiété de souris en remplaçant leur microbiote par celui de congénères moins anxieuses.

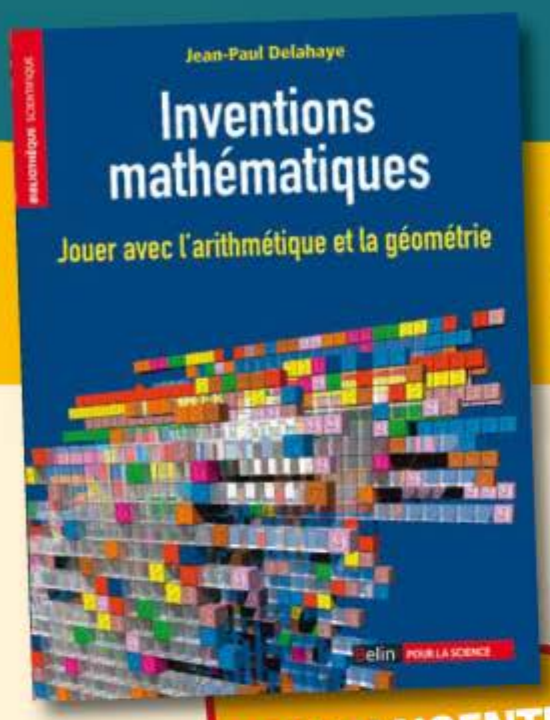
Notre connaissance du rôle du microbiote intestinal dans la physiopathologie des maladies neurodéveloppementales et psychiatriques est encore sommaire. Les progrès passeront par une meilleure compréhension des mécanismes par lesquels ce microbiote dialogue avec le cerveau. Un accent particulier devra être mis sur l'étude de la période néonatale, cruciale tant pour l'établissement du microbiote intestinal que pour la maturation du cerveau. Nous l'avons vu, des rongeurs dépourvus de microbiote ont une sensibilité exacerbée au stress, qui peut être atténuée par l'inoculation d'un microbiote ; cependant, cette intervention n'est efficace que si elle a lieu peu après la naissance. À l'âge adulte, la normalisation de la sensibilité au stress n'est plus possible, suggérant que le microbiote agit sur le développement de certaines structures cérébrales.

Par ailleurs, les analyses du microbiote intestinal de patients souffrant de maladies neurodéveloppementales ou psychiatriques sont aujourd'hui trop peu nombreuses. Leur développement, permis par l'essor des techniques de séquençage du métagénome, sera déterminant pour mieux connaître la physiopathologie de ces maladies et pour concevoir de nouvelles thérapies fondées sur la correction des déséquilibres du microbiote. Les travaux effectués chez les rongeurs avec des probiotiques et des prébiotiques sont encourageants. Il pourrait aussi être intéressant de transplanter des microbiotes, comme le suggère une étude originale conduite à l'Université McMaster au Canada : en 2011, P. Bercik et ses collègues sont parvenus à atténuer le niveau d'anxiété de souris en remplaçant leur microbiote par celui de congénères moins anxieuses. ■

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

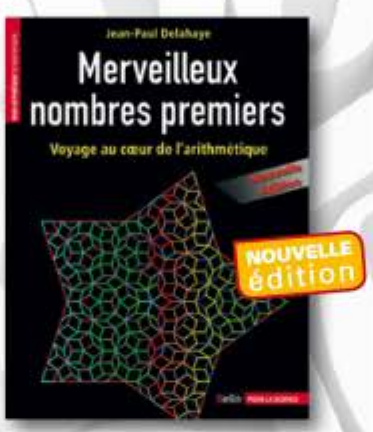
L'univers mathématique

de Jean-Paul Delahaye



PRIX TANGENTE 2014

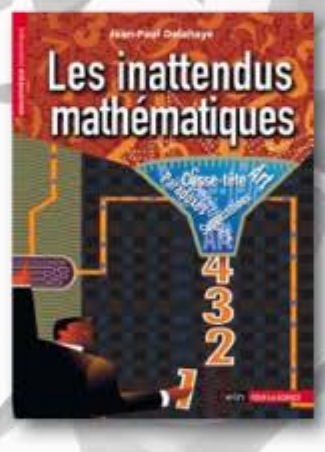
À l'occasion de la parution de son nouveau livre *Inventions mathématiques*, redécouvrez l'ensemble de ses ouvrages parus dans la collection Bibliothèque scientifique.



Inventions mathématiques

Jouer avec l'arithmétique et la géométrie

Les mathématiques sont vivantes et l'imagination des chercheurs et des amateurs n'est jamais en repos. Sans cesse, de nouvelles idées conduisent à des inventions qui réjouissent, étonnent et instruisent. Dans ce livre, vous trouverez des figures paradoxales, des jeux classiques comme le Tangram et le cube de Rubik, des problèmes du quotidien tels le découpage d'une pizza ou l'accrochage d'un tableau, des énigmes élémentaires ou complexes, ou encore des images grises où la cryptographie cache des visages et des animaux. Vous serez étonné... à chaque page !



Retrouvez Jean-Paul Delahaye chaque mois dans la rubrique "Logique et calcul" de *Pour la Science* !

Jean-Paul Delahaye est professeur d'informatique à l'Université des sciences et technologies de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale du CNRS, à Lille.

POUR LA SCIENCE

Pour commander ces ouvrages, rendez-vous sur

www.pourlascience.fr

VOIE LACTÉE

Le mystère des bulles

Douglas Finkbeiner, Meng Su et Dmitry Malyshev

Par hasard, des astrophysiciens ont découvert des bulles gigantesques d'émission de rayons gamma qui s'échappent du centre de notre Galaxie. D'où viennent ces structures étonnantes ?

L'ESSENTIEL

- Les auteurs ont découvert d'immenses lobes de rayonnement qui culminent à des dizaines de milliers d'années-lumière au-dessus du centre galactique. Ils ont nommé ces structures « bulles de Fermi ».
- Les astronomes ignorent l'origine de ces bulles de Fermi, qui émettent un intense rayonnement gamma.
- Ces bulles pourraient être gonflées par un jet d'énergie issu du trou noir situé au centre de la Galaxie ou par le vent d'une nuée de supernovæ.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

géantes

LES BULLES DE FERMI émettent un rayonnement gamma intense *(en rose sur cette vue d'artiste)*. Elles ont la forme de lobes se situant de part et d'autre du plan galactique. Leur origine reste une énigme.

Ron Miller

Quand la nuit est claire, loin des lumières de la ville, la Voie lactée, notre galaxie, dessine une magnifique traînée blanchâtre sur la voûte céleste. La mythologie grecque l'attribuait au lait versé du sein de la déesse Héra alors qu'Héraclès, enfant, était venu s'y nourrir. Il a fallu attendre Galilée, au XVIIe siècle, pour comprendre que la Voie lactée est constituée d'une myriade d'étoiles. Sa structure a été précisée au fil des siècles et des observations. Nous savons aujourd'hui qu'il s'agit d'une galaxie spirale de plus de 100 000 années-lumière de diamètre et contenant de l'ordre de 200 milliards d'étoiles. Mais notre vision de son architecture doit de nouveau être modifiée.

Les astrophysiciens ont découvert des structures qui surplombent le centre galactique et s'étendent sur des dizaines de milliers d'années-lumière. Si ces lobes lumineux – que nous nommons bulles de Fermi – sont passés inaperçus pendant si longtemps, c'est parce qu'ils brillent surtout dans le domaine des rayons gamma, auxquels l'atmosphère terrestre n'est pas transparente.

Nous ne savons pas encore ce qui crée ces bulles ni même de quoi elles sont faites. Elles semblent cependant régies par des processus se déroulant près du centre de la Voie lactée, une région chaotique où un trou noir supermassif brasse des tourbillons de gaz brûlant, tandis que de violentes supernovæ – des explosions d'étoiles massives – s'y produisent fréquemment.

Une découverte inattendue

Beaucoup de découvertes sont fortuites, et cela a été le cas avec les bulles de Fermi. Mais maintenant que nous les avons trouvées, nous avons commencé à répertorier avec soin leurs caractéristiques. Les bulles géantes de la Voie lactée promettent de révéler des informations inédites sur la structure et l'histoire de la Galaxie.

Le premier indice que quelque chose d'inattendu se déroulait au centre de la Voie lactée est venu non pas des rayons gamma, mais des micro-ondes. C'était en 2003, et je (D. Finkbeiner) travaillais sur les données du satellite WMAP *(Wilkinson Microwave*

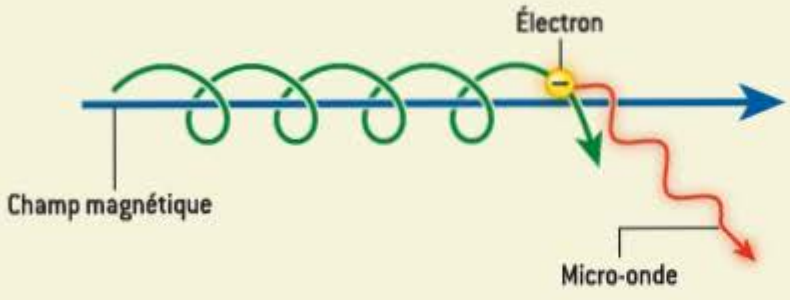
© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

GUIDE PRATIQUE DU RAYONNEMENT COSMIQUE

Le travail des astrophysiciens qui étudient l'espace interstellaire consiste principalement à déterminer l'origine du rayonnement électromagnétique qu'ils détectent. Les processus d'émission de rayonnement décrits ci-dessous ont tous les trois été pris en considération dans les travaux des auteurs sur les bulles de Fermi de la Voie lactée.

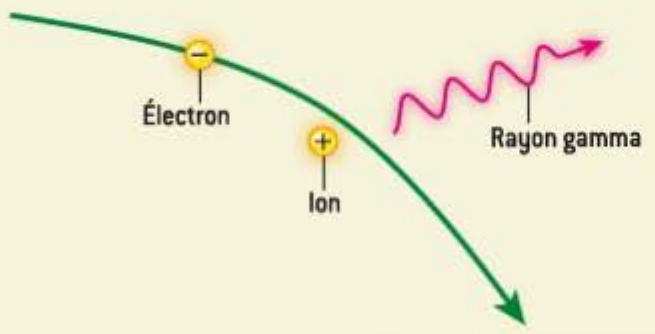
Rayonnement synchrotron

Quand une particule chargée, un électron par exemple, change de direction, elle subit une accélération et émet un rayonnement dit synchrotron. Dans la partie centrale de la Voie lactée, de forts champs magnétiques confèrent une trajectoire hélicoïdale aux électrons, qui émettent un rayonnement synchrotron, essentiellement dans la gamme des micro-ondes dans ce cas.



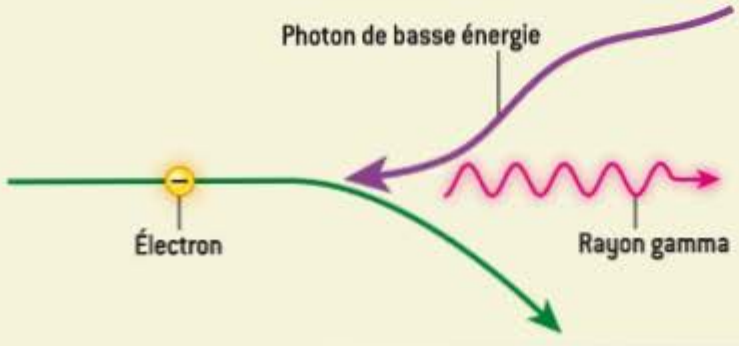
Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)

Si un électron énergétique passe à côté d'une autre particule chargée, l'électron ralentit souvent, perdant de l'énergie dans le processus. Cette énergie est libérée sous la forme d'un rayonnement continu dit de freinage. Ce processus produit en particulier des rayons gamma.



Diffusion Compton inverse

Un électron qui traverse la Galaxie peut aussi interagir avec un photon à proximité, en le heurtant de front. Ce dernier repart alors avec une énergie bien supérieure à celle qu'il avait initialement et devient, par exemple, un rayon gamma.



Greg Maxson

Anisotropy Probe). J'étais alors à l'Université Princeton, et j'étudiais comment la poussière interstellaire obscurcit ce qui nous intéressait principalement dans les données de WMAP: le fond diffus cosmologique, un rayonnement émis par l'Univers quand il était âgé de 370000 ans et qui nous parvient aujourd'hui sous la forme de micro-ondes. La poussière est intéressante en elle-même, mais, pour un cosmologiste, elle est l'équivalent des taches sur un pare-brise: quelque chose à soustraire des données.

Un autre signal parasite était aussi à éliminer, celui des particules énergétiques – tels les électrons – qui se propagent à grande vitesse dans la Galaxie. Ces particules émettent un rayonnement qui se mélange au rayonnement du fond diffus cosmologique. En 2003, les astronomes avaient une compréhension assez détaillée de ces signaux, mais quelque chose n'allait pas. J'arrivais à modéliser l'essentiel de l'émission galactique, mais quand j'essayais de la soustraire dans la partie centrale de la galaxie, il y avait toujours un excès résiduel. J'ai surnommé « brume de micro-ondes » ce reliquat de signal (*microwave haze* en anglais).

Une brume persistante

Ce signal provenant du centre de la Galaxie n'avait pas d'explication connue, mais plusieurs groupes d'astrophysiciens ont rapidement avancé des idées. Selon la plus fascinante d'entre elles, cette brume trahissait la présence de matière noire. Personne ne connaît, aujourd'hui, la nature de la matière noire ni ses caractéristiques précises, en dehors du fait qu'elle exerce une influence gravitationnelle sur la matière ordinaire. La matière noire devrait en particulier s'accumuler dans la région centrale de la galaxie. Sa densité y serait alors assez élevée pour que des particules de matière noire entrent parfois en collision et s'annihilent, créant ainsi des paires particule-antiparticule, des paires électron-positron par exemple.

Même si nous ne pouvons pas détecter la matière noire, nous devrions être capables d'observer le résultat de ces annihilations. Les particules chargées se déplacent à grande vitesse et changent de direction au gré des champs magnétiques ambiants. Elles devraient alors émettre un rayonnement dit synchrotron, caractéristique des particules chargées dont la trajectoire est courbe *(voir l'encadré ci-contre)*.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

La brume de micro-ondes que nous observons pouvait être un artefact du rayonnement synchrotron engendré par l'annihilation de la matière noire. Mais comment en être certain ? Les électrons produisant les micro-ondes synchrotron devraient se manifester d'une seconde façon : ils interagiraient aussi avec les photons présents dans cette région et leur communiqueraient de l'énergie pour en faire des rayons gamma de haute énergie, dans un processus dit de diffusion Compton inverse *(voir l'encadré page 52)*.

Un consensus est rapidement apparu : si la brume de micro-ondes était due à des électrons très énergétiques, nous devrions aussi trouver des rayons gamma. Nous avons alors utilisé les données du télescope spatial *Fermi*, conçu spécifiquement pour détecter les rayons gamma *(voir l'encadré page 54)*.

Les mesures du satellite *Fermi* ont été rendues publiques en août 2009. Avec mon collègue Gregory Dobler, nous avons analysé ces données pour établir nos premières cartes en rayons gamma de la Voie lactée. Nous avons effectivement trouvé un excès diffus de rayons gamma au centre de la Galaxie qui semblait correspondre à la brume de micro-ondes. Avec d'autres physiciens, nous avons écrit un article établissant un lien entre ces signaux et nous affirmions qu'ils étaient probablement tous les deux la conséquence de l'existence d'une population d'électrons très énergétiques au centre de la Galaxie, mais nous ne faisions aucune hypothèse quant à la source de ces électrons.

En octobre 2009, j'étais dans mon bureau en train de mettre à jour certains résultats de notre premier article avec les plus récentes

■ LES AUTEURS

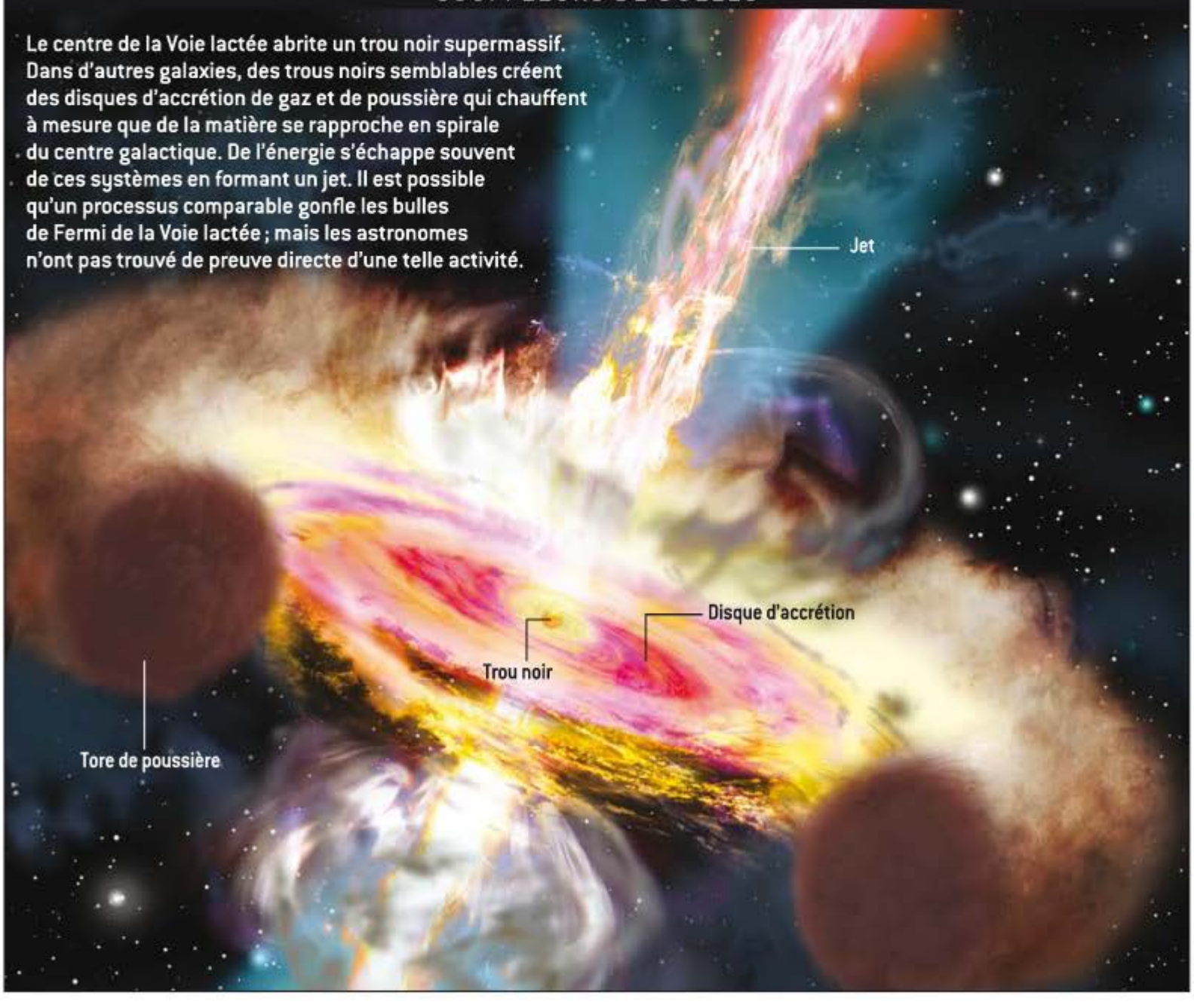
Douglas FINKBEINER est professeur d'astronomie et de physique à l'Université Harvard. Il est membre de l'Institut de théorie et de calcul au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian.

Meng SU est postdoctorant à l'Institut de technologie du Massachusetts et à l'Institut Kavli d'astrophysique et de recherche spatiale.

Dmitry MALYSHEV est postdoctorant à l'Université Stanford et au Laboratoire de l'accélérateur américain SLAC. Il est membre de l'équipe du télescope spatial *Fermi*.

SOUFFLEURS DE BULLES

Le centre de la Voie lactée abrite un trou noir supermassif. Dans d'autres galaxies, des trous noirs semblables créent des disques d'accrétion de gaz et de poussière qui chauffent à mesure que de la matière se rapproche en spirale du centre galactique. De l'énergie s'échappe souvent de ces systèmes en formant un jet. Il est possible qu'un processus comparable gonfle les bulles de Fermi de la Voie lactée ; mais les astronomes n'ont pas trouvé de preuve directe d'une telle activité.



Ron Miller

données disponibles de *Fermi* quand j'ai remarqué que les mesures initiales des rayons gamma dessinaient un vague contour, au-delà duquel le signal diminuait rapidement.

En astronomie, des limites nettes sont généralement associées à des événements transitoires. Par exemple, quand une étoile explose en supernova, l'onde de choc dessine un bord net en se propageant puis, avec le temps, la structure s'estompe.

Mais dans le scénario de la matière noire, nous n'avons pas affaire à un phénomène transitoire et le rayonnement gamma issu de l'annihilation de ces mystérieuses particules devrait suivre la densité de matière noire et décroître progressivement à mesure que l'on s'éloigne du centre galactique.

Dans le premier lot de données de *Fermi*, les contours étaient mal définis et pouvaient être interprétés comme du bruit de fond dans le signal. Mais ils étaient toujours présents dans les nouvelles données, et je commençais à me poser des questions. J'ai montré ces contours à mes étudiants en thèse Meng Su et Tracy Slatyer, qui furent aussi d'avis qu'ils étaient bien réels. M. Su s'est alors mis au travail pour déterminer la forme exacte des contours. En quelques jours, nous avions changé d'avis quant à leur interprétation. La matière noire était disqualifiée. Les bulles entraient en scène. En mai 2010, M. Su, T. Slatyer et moi soumettions un nouvel article décrivant ces structures et les nommions « bulles de Fermi ».

Même si personne ne s'attendait à trouver de grosses bulles jaillissant sur des dizaines de milliers d'années-lumière hors du plan de la Voie lactée, ce n'était, en y réfléchissant après coup, peut-être pas si incroyable que cela. De nombreuses autres galaxies présentent elles aussi des bulles. Nous pouvons les voir en rayons X et en ondes radio, et si nous disposions de meilleurs télescopes à rayons gamma, nous les verrions probablement briller aussi dans cette portion du spectre électromagnétique.

Nous comprenons les processus à l'origine des bulles dans nombre de ces galaxies. Dans certains cas, les bulles ont pour origine un trou noir géant, souvent d'une masse équivalente à plusieurs milliards de soleils, au centre de la galaxie. Quand de la matière tombe vers le trou noir, elle se met à tourbillonner comme l'eau qui s'écoule d'une baignoire. Ce tourbillon de gaz et de poussière brûlants crée des champs magnétiques intenses qui entraînent des jets de rayonnement et de particules cosmiques perpendiculaires au plan galactique.

Nous savons que la Voie lactée abrite elle aussi un trou noir supermassif en son centre, mais nous n'avons jamais observé un quelconque jet puissant de rayonnement intense émis de son centre. Ainsi, nous n'avons pas de preuve directe que c'est ce processus qui gonfle les bulles de Fermi.

Un jet de lumière galactique

Par ailleurs, ce que nous pouvons voir dans la Galaxie est un nuage de gaz, nommé courant magellanique, qui forme une arche très haut au-dessus du centre galactique. Si un rayonnement intense l'atteignait, il arracherait temporairement les électrons des atomes du nuage. Et en se recombinant, les électrons et les ions produiraient ce qu'on nomme un rayonnement de recombinaison.

Or c'est ce que les astronomes ont trouvé. Il est possible qu'un épisode intense d'accrétion autour du trou noir central de la Galaxie se soit produit il y a environ un million d'années ; il aurait engendré des jets de haute énergie et du rayonnement ultraviolet, qui auraient perturbé les électrons du courant magellanique. Cet événement aurait pu créer les bulles de Fermi.

Les observations de certaines galaxies, telle M82, ouvrent une seconde piste : ces galaxies présentent des bulles qui résultent d'une intense activité de formation d'étoiles près de leur centre. Dans les pouponnières stellaires, il se forme des étoiles de toutes tailles. Plus une étoile est massive, plus elle consomme vite son combustible nucléaire.

Un œil braqué sur les rayons gamma

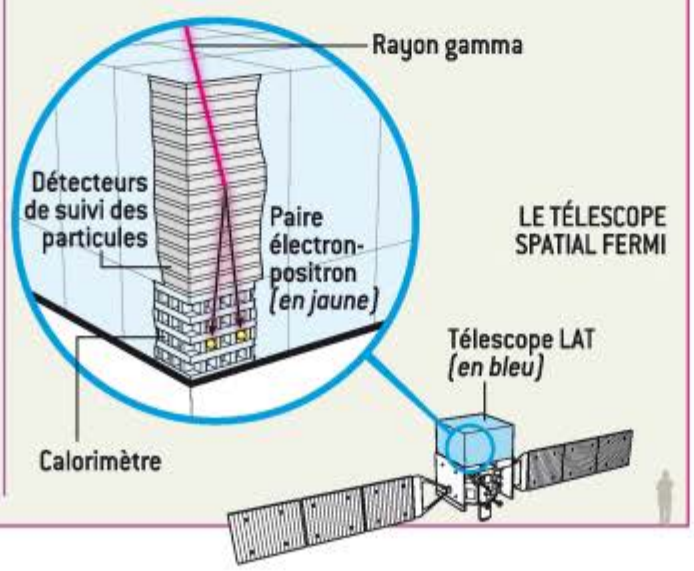
L'atmosphère terrestre bloque les rayons gamma, dont l'énergie est des milliards de fois supérieure à celle de la lumière visible. Pour les observer directement, les astrophysiciens utilisent des télescopes spatiaux.

Le télescope spatial *Fermi* est l'observatoire de rayons gamma le plus puissant jamais mis en orbite. Il comporte deux instruments principaux : un moniteur de sursauts qui surveille l'ensemble du ciel à l'affût de traces de bouffées transitoires de rayons gamma, et le LAT *(Large Area Telescope)*, qui est le détecteur de rayons gamma doté de la plus grande sensibilité et de la meilleure résolution jamais envoyé dans l'espace.

Le LAT est différent des télescopes optiques : il n'a ni miroirs ni lentilles. Il fonctionne plutôt comme une expérience de physique des particules. Chaque photon gamma incident qui interagit avec un noyau atomique à l'intérieur du télescope est transformé en un positron et un électron. Ces particules sont alors suivies à travers des détecteurs embarqués et un calorimètre mesure leur énergie. Au sol, les astrophysiciens utilisent ces données pour reconstruire la direction et l'énergie du rayon gamma initial.

La plupart des télescopes ne peuvent couvrir qu'une minuscule fraction du ciel à un instant donné, et les astronomes se donnent beaucoup de mal pour décider quelles parties du ciel observer. La concurrence pour le temps de télescope est rude, et il n'est généralement pas possible d'observer de larges bandes de ciel dans lesquelles on n'attend rien de particulièrement intéressant. En revanche, *Fermi* a un champ de vue qui couvre un cinquième du ciel, ce qui permet d'observer l'intégralité de la voûte céleste toutes les trois heures. Cette couverture complète du ciel donne aux astronomes la chance de trouver d'immenses structures peu lumineuses telles que les bulles de Fermi.

– D. F., M. S. et D. M.



Greg Mavson

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

Quand le combustible se fait rare, le cœur de l'étoile s'effondre et libère une énorme quantité d'énergie qui arrache les couches externes de l'étoile dans une explosion de supernova, pouvant laisser derrière elle une étoile à neutrons ou un trou noir. Ces supernovæ créent un vent de particules qui peut gonfler des bulles autour d'un centre galactique.

Nous savons que le centre de la Voie lactée a été une région de formation stellaire intense dans un passé proche. Plusieurs milliers d'étoiles d'à peine six millions d'années entourent la région du trou noir central. Des étoiles suffisamment massives formées à la même période auraient eu le temps d'exploser en supernovæ. Elles auraient alors entraîné un vent de gaz chaud s'élevant de la partie centrale de la Galaxie, un souffle assez puissant pour gonfler les bulles.

Comme nous le voyons, l'histoire des bulles de Fermi est étroitement liée à l'histoire et à l'évolution de la Voie lactée. Les bulles peuvent nous permettre de comprendre les processus physiques par lesquels les trous noirs attirent la matière environnante, et comment les rayons cosmiques de haute énergie interagissent avec le gaz interstellaire. Bien qu'il existe des structures semblables aux bulles de Fermi dans d'autres galaxies, les bulles de la Voie lactée permettent d'étudier ces systèmes de plus près.

L'une des propriétés les plus extraordinaires de ces bulles est qu'elles sont énormes et brillantes en rayons gamma, mais presque invisibles aux autres fréquences. Nous espérons que les nouvelles données du satellite *Planck*, qui a cartographié le rayonnement micro-onde sur l'ensemble du ciel, apporteront des indices importants. Nous essayons aussi de cartographier les bulles en rayons X, mais le champ de vue réduit des instruments actuels représente un sérieux défi pour des structures aussi vastes.

Après la découverte par Galilée de la nature de la Voie lactée, les astronomes ont mis trois siècles pour comprendre que notre Galaxie n'en est qu'une parmi des milliards d'autres. Avec un peu de chance, nous mettrons moins longtemps à comprendre la signification des bulles de Fermi. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Franckowiak et S. Funk, **Giant gamma-ray bubbles in the Milky Way**, *Physics Today*, vol. 67, pp. 60-61, juillet 2014.

W. Atwood *et al.*, ***Fermi* : une fenêtre sur l'Univers extrême**, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

Meng Su *et al.*, **Giant gamma-ray bubbles from *Fermi*-LAT : Active galactic nucleus activity or bipolar galactic wind ?**, *The Astrophysical Journal*, vol. 72(2), pp. 1044-1082, 2010.

TRÉSORS de la Terre

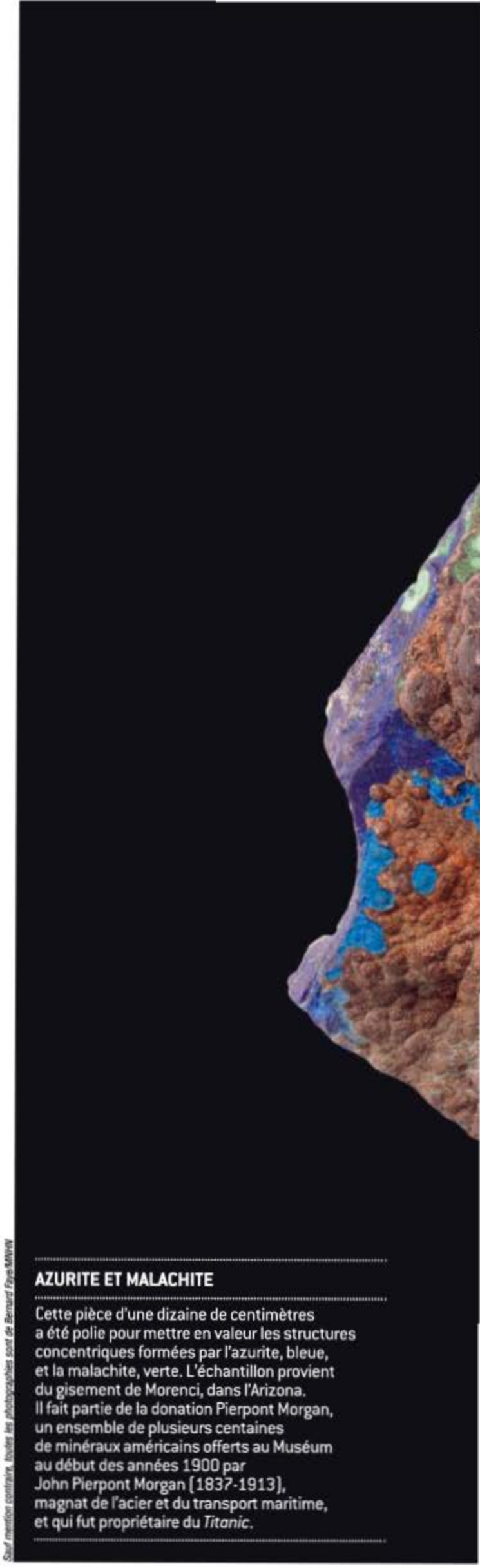
La Galerie de minéralogie du Muséum, à Paris, rouvre ses portes au public avec une exposition de plusieurs centaines de ses plus beaux spécimens. Aperçu sur quelques-uns de ces joyaux.

Maurice Mashaal

Parmi les plus importantes au monde, la collection de minéralogie du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, est riche de près de 130000 spécimens. Le public va pouvoir en admirer certains des plus beaux : après une fermeture de dix ans pour travaux de rénovation, la Galerie de minéralogie a rouvert ses portes le 19 décembre 2014 en exposant environ 600 échantillons de minéraux et de météorites.

Le choix des pièces s'est fait sur des critères esthétiques, scientifiques ou historiques. Les visiteurs pourront contempler des minéraux bruts, des gemmes taillées ou non, une vingtaine de cristaux géants, des joyaux historiques tels que le Grand saphir de Louis XIV, des objets sculptés, des tables florentines... Un échantillonnage qui reflète la grande diversité de la collection de minéralogie, constituée et enrichie depuis près de quatre siècles grâce à des achats, des expéditions naturalistes, des dons ou des opérations de mécénat.

Cette collection et celles de géologie (quelque 334000 spécimens de roches, 4000 morceaux provenant de 1500 météorites, un total de huit kilomètres de carottes de sédiments) sont conservées pour leur majeure partie dans la Galerie de minéralogie [et de géologie]. Ce bâtiment long de près de 200 mètres et datant des années 1830 est le premier, en France, à avoir été construit pour servir de musée. Sa réouverture au public n'est que partielle, l'espace de l'actuelle exposition n'occupant qu'une petite partie (250 mètres carrés) de la Galerie. Pour le reste, il faudra patienter encore quelques années ! ■

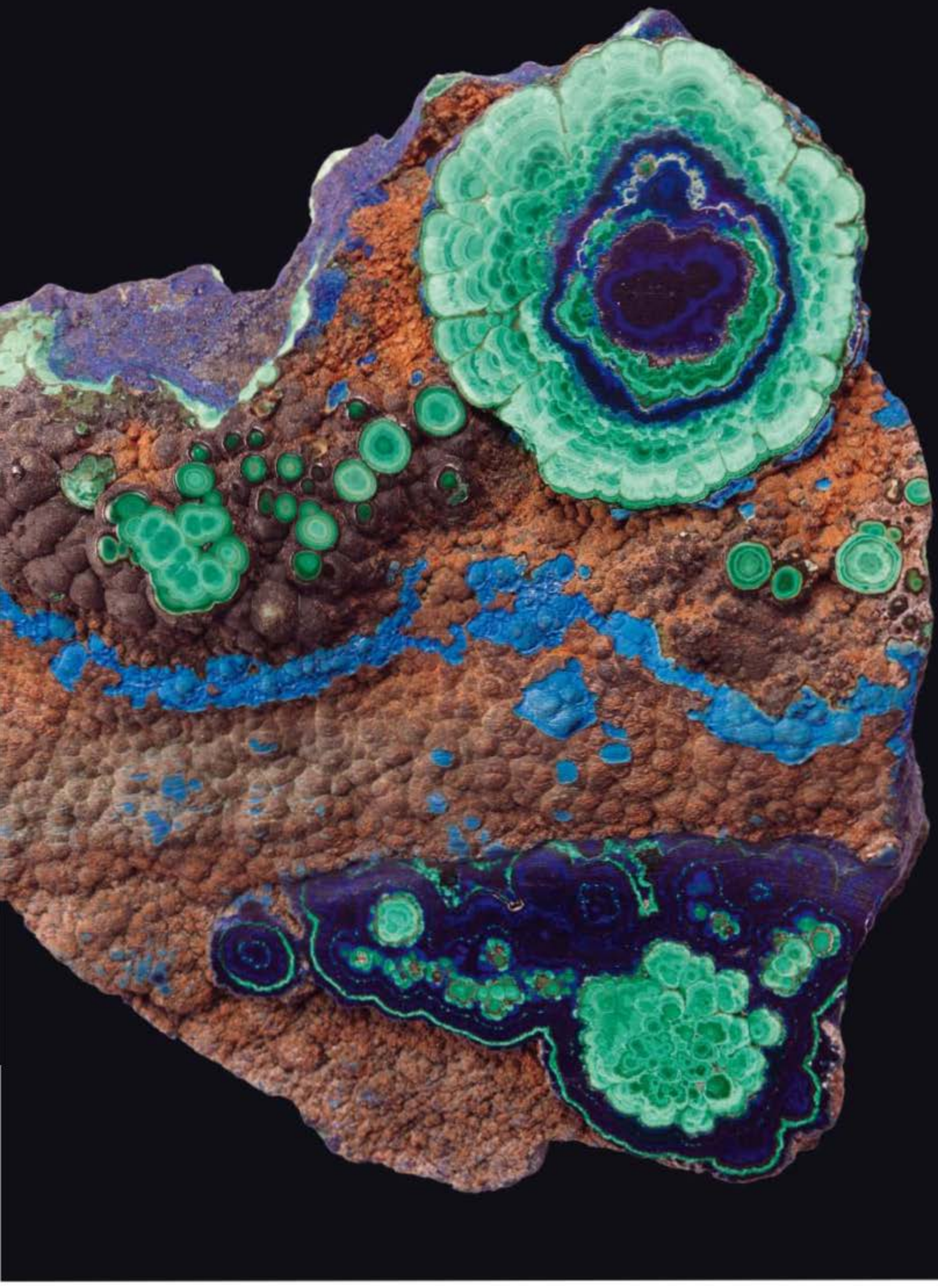


Sauf mention contraire, toutes les photographies sont de Bernard Fay/MNHN

AZURITE ET MALACHITE

Cette pièce d'une dizaine de centimètres a été polie pour mettre en valeur les structures concentriques formées par l'azurite, bleue, et la malachite, verte. L'échantillon provient du gisement de Morenci, dans l'Arizona. Il fait partie de la donation Pierpont Morgan, un ensemble de plusieurs centaines de minéraux américains offerts au Muséum au début des années 1900 par John Pierpont Morgan (1837-1913), magnat de l'acier et du transport maritime, et qui fut propriétaire du *Titanic*.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015



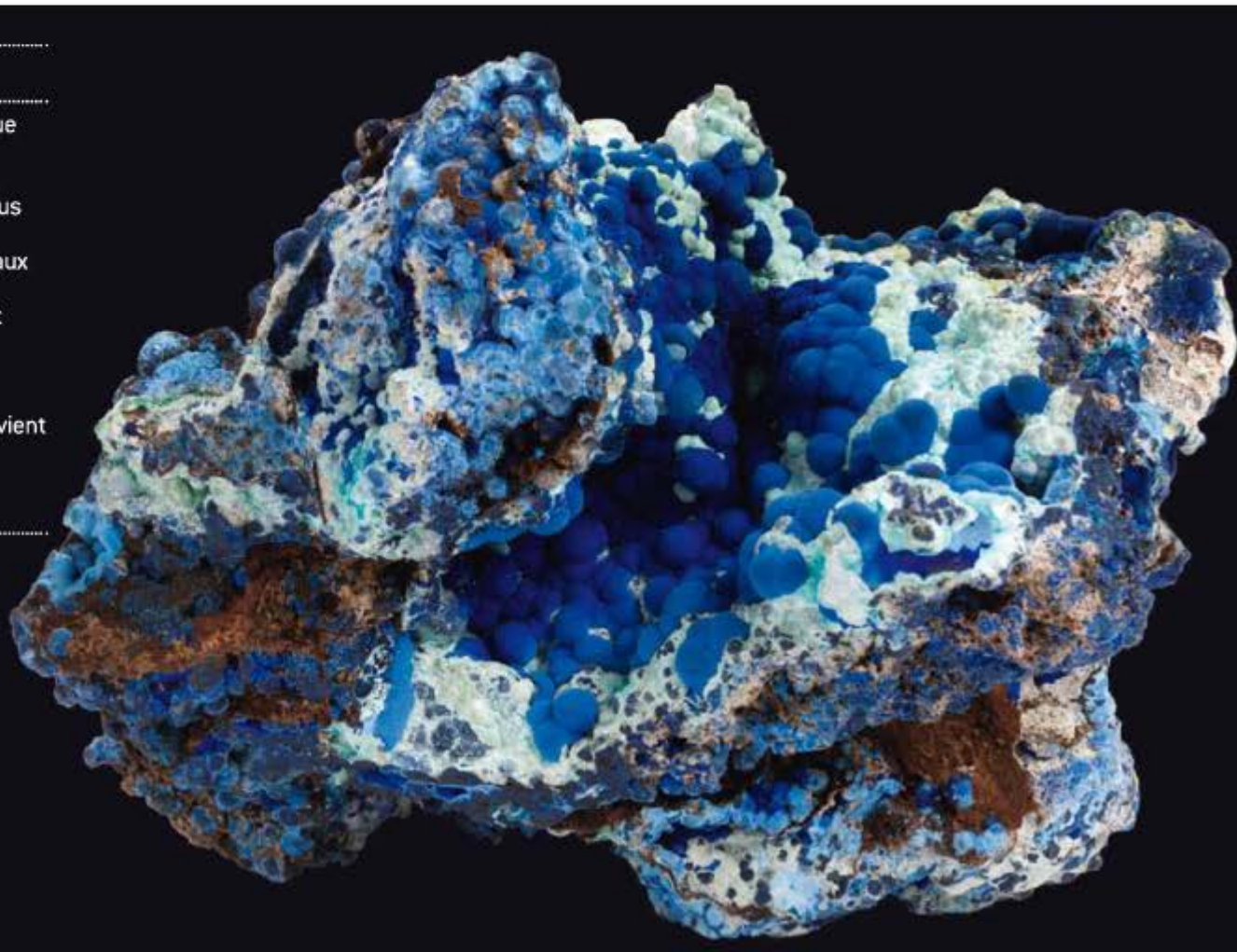
© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

ELBAÏTE RUBELLITE

Cet échantillon d'elbaïte de variété rubellite est un minéral du groupe des silicates appartenant à la famille des tourmalines. D'autres variétés colorées de la même famille sont la verdelite (vert à vert foncé-bleu) et l'indicolite (bleue). La composition chimique de l'elbaïte est $Na(Al, Li)_3 Al_6(BO_3)_3 Si_6O_{18}(OH)_4$. La pièce présentée mesure 17 centimètres dans sa plus grande dimension et provient de Pala, en Californie (donation Pierpont Morgan).

AZURITE

L'azurite (de formule chimique $Cu_3 (CO3)_2 (OH)_2$) est, avec la malachite ($Cu_2 CO_3 (OH)_2$), l'un des deux minéraux les plus communs du cuivre. Connus depuis l'Antiquité, ces minéraux ont été utilisés aussi comme pigments. Quand l'azurite est abondante, elle constitue un bon minerai de cuivre. L'échantillon d'une dizaine de centimètres présenté provient de Bisbee, dans l'Arizona, et fait partie de la donation Pierpont Morgan.



© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

RHODOCHROSITE

La rhodochrosite est un carbonate de manganèse ($MnCO_3$). Cet échantillon, qui mesure 41 centimètres dans sa plus grande dimension, est une section transversale de stalactite et provient de Capillitas, dans la province de Catamarca au Nord-Ouest de l'Argentine (pièce acquise par le Muséum grâce au mécénat du groupe *Total*).
En général, les stalactites sont constituées d'aragonite ($CaCO_3$), mais comme les fluides de ce gisement contiennent du manganèse, de la rhodochrosite a pu se former.
Les différences de teintes sont dues aux différences de concentration en manganèse.

ORPIMENT BRUN ORANGÉ ET CALCITE

Dans cette pièce faisant plus de 15 centimètres, des cristaux d'orpiment se sont formés parmi des cristaux de calcite blanche. L'orpiment est un sulfure d'arsenic (As_2S_3) assez répandu, mais qui se présente rarement sous la forme de cristaux prismatiques. L'échantillon provient du gisement de Shimen, dans la province du Hunan, en Chine.

FOSSILES EN OPALE

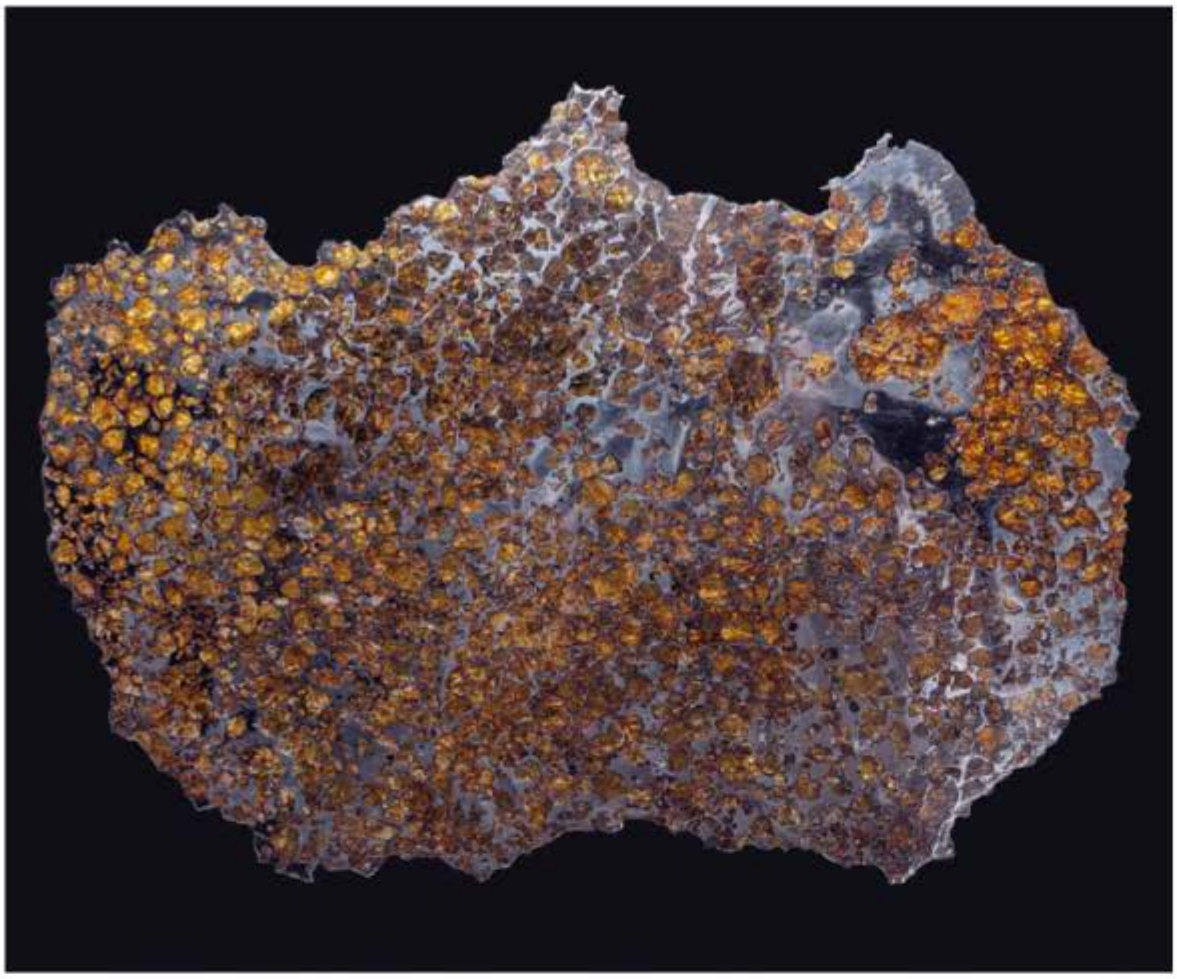
Ces opales proviennent du gisement de Coober Pedy, dans le Sud de l'Australie. Il s'agit ici de fossiles de rostres de bélemnites, des céphalopodes marins disparus à la fin du Crétacé, il y a quelque 65 millions d'années. Longs d'une dizaine de centimètres, ces rostres inclus dans une gangue de calcaire se sont transformés en opales lors de la fossilisation. L'opale est un colloïde de silice hydratée ($SiO_2 \cdot n\,H_2O$). Sa structure cristalline est particulière, en partie amorphe, ce qui est à l'origine des irisations.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

OR ENCHÂSSÉ DANS DU QUARTZ

Un minéral est une substance naturelle, formée généralement par un processus géologique, et qui est le plus souvent sous forme solide dans les conditions habituelles de température et pression. Il est caractérisé par sa composition chimique et sa structure cristalline (à l'échelle atomique). Lorsque le minéral est formé d'un seul élément chimique, on parle d'élément natif. C'est le cas de l'or dans cet échantillon collecté à Saint-Élie, en Guyane française.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015



TRANCHE DE MÉTÉORITE

Cette tranche de météorite pèse 1,26 kilogramme et mesure une quarantaine de centimètres. Elle provient de la météorite d'Imilac, trouvée en 1822 dans le désert chilien de l'Atacama et qui pesait 920 kilogrammes. Elle appartient à la famille des pallasites, météorites constituées de cristaux d'olivine (dont une variété est le péridot) inclus dans une matrice de fer-nickel. Les pallasites proviendraient de la limite entre le noyau et le manteau d'astéroïdes dotés d'une structure interne différenciée.

© MNHN/François Farges

MONOCLE ET BINOCLE

L'agate est une variété de calcédoine, un minéral composé de silice.
Elle présente souvent des bandes concentriques de couleurs différentes, déterminées par les diverses impuretés contenues dans la roche. Celle montrée ici est remarquable par les motifs qu'elle arbore sur ses deux faces.
Elle fait partie des quelque 2 000 belles pierres collectionnées à partir des années 1950 par l'écrivain français Roger Caillois (1913-1978), et dont une part notable est allée au Muséum par dation en 1988.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

CALCITE

Cette calcite dite de Bellecroix provient de Fontainebleau, en région parisienne, et sa taille est de 22 centimètres. Son faciès globulaire, avec une multitude de petits cristaux enchevêtrés, est étonnant. La calcite est un carbonate de calcium ($CaCO_3$) et constitue le principal minéral des roches sédimentaires calcaires. C'est l'un des minéraux les plus répandus et elle présente des centaines de formes différentes, parfois colorées grâce aux impuretés ou inclusions d'autres minéraux. La calcite pure est transparente ; elle a notamment permis de découvrir le phénomène optique de double réfraction.

Trésors de la Terre, exposition à partir du 19 décembre 2014, Galerie de minéralogie, Muséum national d'histoire naturelle, Paris.

Collectif, **Trésors de la Terre - Galerie de minéralogie,** Artlys-MNHN, 2014.

Site Internet de la Galerie de minéralogie du Muséum : www.galeriedemineralogie.fr

Comment se protéger de Big Brother

Alex Pentland

À l'ère des données massives, nos vies entières se retrouvent sur Internet. Comment éviter qu'elles soient surveillées sans le moindre contrôle ? En suivant trois principes.

Pendant les premières décennies de son existence, l'Agence de sécurité américaine (NSA, ou *National Security Agency*) avait pour objectif principal de surveiller l'Union soviétique. Son ennemi était alors monolithique et bien défini. Elle se fondait surtout sur des écoutes téléphoniques, des avions espions et des microphones cachés.

Après les attaques du 11 septembre 2001, la situation a changé. Le principal ennemi de la NSA est devenu un réseau diffus de terroristes. Il pouvait être utile d'espionner n'importe qui. La nature même de l'espionnage a changé, avec la prolifération de nouveaux canaux de communication numériques. La croissance exponentielle des appareils mobiles connectés à Internet ne faisait que commencer. Dès lors, les vieux outils de la NSA se semblaient plus suffisants.

L'agence a réagi en adoptant une nouvelle stratégie : tout collecter. Selon Keith Alexander, le précédent directeur de la NSA, lorsqu'on cherche une aiguille dans une botte de foin, on a besoin de toute la botte. La NSA a d'abord collecté en masse des conversations téléphoniques, obtenant des enregistrements de presque toutes les personnes présentes sur le sol américain, puis elle a rassemblé des données sur le trafic Internet de presque tous les individus à l'échelle mondiale. En peu de temps, la NSA s'est mise à collecter toutes les deux heures une quantité de données équivalente à celle du recensement américain.

L'agence stockait toutes ces données dans ses propres locaux sécurisés, mais une telle concentration n'était pas sans conséquences. Les données personnelles de presque tous les individus du monde entier se trouvaient soudain à une touche de clavier de n'importe quel analyste de la NSA. En outre, le problème des fuites se posait de façon accrue.

Scandalisé par cette gigantesque collecte de l'ombre, Edward Snowden, alors consultant pour la NSA, a téléchargé des milliers de fichiers secrets depuis un serveur à Hawaï, s'est embarqué sur un vol pour Hong Kong et a remis les documents à la presse.

L'ESSENTIEL

- **Les données sur les individus sont essentielles aux gouvernements et aux industries, mais leur collecte peut donner lieu à des abus.**
- **Selon l'auteur, on éviterait ces abus si l'on appliquait quelques principes, notamment la répartition des données massives dans des centres séparés et la sécurisation des transmissions et du stockage.**
- **Les procédures doivent aussi être constamment adaptées pour suivre les évolutions techniques.**

Les gouvernements et les industries ont toujours eu besoin de rassembler des informations sur les individus, par exemple lors des recensements. Mais un saut qualitatif a été franchi avec la collecte de données sur des populations entières par une agence secrète, leur stockage dans des salles de serveurs clandestines et leur exploitation presque sans contrôle extérieur. Il n'est donc pas surprenant que les révélations d'E. Snowden aient déclenché un débat public intense.

Jusqu'ici, ce débat s'est surtout focalisé sur les dimensions morales et politiques du problème, tandis que les aspects techniques et structurels ont peu retenu l'attention. Pourtant, ils sont essentiels et permettraient de mettre en place certains garde-fous. En outre, en matière de collecte et d'utilisation des données massives (ou *big data*), les pratiques gouvernementales sont inadéquates. Ces pratiques, ainsi que leurs processus d'évaluation, doivent évoluer aussi vite que les techniques. Il n'existe pas de solution simple, mais on devrait appliquer quelques principes de base. Présentons-les.

© Shutterstock.com/gguy

PRINCIPE 1

Éparpiller la botte de foin

K. Alexander se trompait sur la recherche d'aiguilles dans une botte de foin. On n'a pas besoin de toute la botte, mais juste de la capacité d'en examiner n'importe quelle partie. Non seulement le stockage d'énormes quantités de données dans un même endroit n'est pas nécessaire, mais il présente un danger aussi bien pour les espions que pour les espionnés. Pour les gouvernements, cela rend les fuites dévastatrices plus probables. Pour les individus, cela crée un risque sans précédent de violation de la vie privée.

Les révélations d'E. Snowden ont montré qu'entre les mains du gouvernement, les données massives sont devenues bien trop concentrées. La NSA et les autres organisations gouvernementales devraient laisser les données en place, sous forme chiffrée et sous la surveillance de l'organisme qui a créé la base de données. En outre, il faudrait stocker séparément les différents types de données : les informations financières dans une base de données à tel endroit, les renseignements médicaux à tel autre endroit, etc. De façon générale, les informations sur les individus devraient être traitées à part. La NSA, ou toute autre entité ayant une raison légale de le faire, sera encore capable d'examiner n'importe quelle partie de cette vaste botte de foin. Elle ne pourra simplement plus stocker la botte entière dans un seul centre de serveurs.

Le plus simple est alors de stopper l'accumulation des données par les agences gouvernementales. Laissons les compagnies de télécommunication et d'Internet garder leurs enregistrements. S'empresser de détruire les centres de données de la NSA n'aurait pas une grande utilité, car leur contenu et les logiciels associés seront bientôt périmés.

La NSA n'abandonnera probablement pas ses activités de collecte de données sans une loi qui l'y oblige ou un ordre de l'exécutif. Pourtant, ce serait dans son intérêt, et les autorités semblent le savoir. En 2013, Ashton Carter, alors adjoint du Secrétaire de la Défense, a diagnostiqué : « L'échec [l'affaire Snowden] a pour origine deux pratiques que nous devons abolir [...]. Il y avait une énorme quantité d'informations concentrée en un endroit. C'est une erreur. » Et en second lieu, « un individu a reçu l'autorité pour

accéder à cette information et la déplacer. Ce n'aurait pas dû être le cas non plus. » Des bases de données chiffrées, réparties sur différents systèmes informatiques, auraient non seulement compliqué une fuite de ce type, mais elles protègeraient aussi contre des cyberattaques venues de l'extérieur. Une intrusion ne donnerait accès qu'à une partie de la base de données. Même des gouvernements autoritaires y trouveraient leur intérêt : la concentration des données faciliterait un piratage massif par des individus qui se seraient introduits dans un centre de stockage.

Répartir les données aiderait aussi à protéger la vie privée, parce que cela rend possible l'analyse des « schémas de communication » entre les bases de données et les opérateurs humains. Chaque fois que quelqu'un rechercherait un élément particulier ou établirait des statistiques, cette opération laisserait une signature caractéristique, composée d'un réseau de liens et de transmissions entre bases de données. On pourrait utiliser ces signatures, métadonnées à propos de métadonnées, pour surveiller les opérations réalisées.

Considérons l'analogie suivante : au sein d'une entreprise, quand les schémas de communication sont visibles (par exemple lorsque des lettres sont transmises d'un service à l'autre), les employés peuvent identifier ceux qui correspondent à des opérations normales, même si les opérations elles-mêmes (le contenu des lettres) leur demeurent cachées. Supposons que le service financier se mette à examiner une quantité anormale de données privées sur la santé des employés : la personne chargée de garder à jour ces informations peut s'en apercevoir et en demander la raison. De même, structurer les opérations liées aux données massives de façon à créer des métadonnées à propos de métadonnées rendrait la surveillance possible. Les sociétés de télécommunication accèderaient à une certaine traçabilité de leurs données. Des associations civiles indépendantes et la presse pourraient s'assurer que les agences gouvernementales ne vont pas trop loin. Avec les métadonnées sur les métadonnées, nous serions capables de faire à la NSA ce que la NSA fait aux autres.

EDWARD SNOWDEN, ALORS CONSULTANT POUR LA NSA, a rendu public en 2013 le programme de surveillance de masse exercé par l'agence.

■ L'AUTEUR

Alex PENTLAND est directeur du Laboratoire de dynamique humaine du MIT, aux États-Unis, et codirige les projets du Forum économique mondial en matière de *big data* et données personnelles.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Pentland, **Social Physics : How Good Ideas Spread - The Lessons from a New Science,** Penguin Press, 2014.

Personal Data: The Emergence of a New Asset Class, World Economic Forum, 2011, www.weforum.org/reports/personal-dataemergence-new-asset-class

A. Pentland, **Orienter la société grâce aux données massives,** *Pour la Science* n° 443, nov. 2013.

PRINCIPE 2

Sécuriser les transmissions

L'élimination des grands centres de données de la NSA n'est qu'une des étapes vers le respect de la vie privée. Il importe aussi de sécuriser le stockage et la transmission des données, notamment *via* le chiffrement. Appliquer cette forme de protection est particulièrement urgent dans un monde où la cybercriminalité et les menaces de cyber-guerre se développent.

Chaque utilisateur de données personnelles – gouvernement, entreprise ou individu –, devrait suivre des règles de sécurité de base. Il faudrait que le partage de données ne soit autorisé qu'entre des systèmes ayant des niveaux de sécurité équivalents. Chaque opération devrait requérir une chaîne fiable de certificats d'identité, afin de savoir d'où viennent les données et où elles vont. Les métadonnées utilisées devraient être contrôlées et les entités qui s'en servent soumises à diverses vérifications, comme on le fait pour lutter contre la fraude touchant les cartes de crédit.

Un bon modèle est ce qu'on appelle un réseau de confiance. Un tel réseau garde la trace des autorisations accordées aux utilisateurs pour chaque opération sur les données, en prenant en compte un cadre légal qui spécifie ce qui peut ou ne peut pas être fait, ainsi que les conséquences d'une violation des autorisations. Grâce à cet historique, les réseaux de confiance peuvent être automatiquement audités afin de vérifier que les données ne sont pas utilisées de façon abusive.

Ces réseaux se sont révélés à la fois sûrs et robustes. Le plus connu est celui de la Société pour les télécommunications financières entre les banques à l'échelle mondiale (SWIFT, pour *Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication*), par lequel quelque 10 000 banques et autres organisations transfèrent de l'argent. Le réseau de SWIFT n'a jamais été piraté (pour autant que nous le sachions).

Lorsqu'on lui a demandé pourquoi il s'était attaqué aux banques, le cambrioleur Willie Sutton aurait répondu : « parce que c'est là que se trouve l'argent ». Aujourd'hui, l'argent se trouve dans le réseau de SWIFT,

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

La solution dans une décentralisation extrême ?

Si les pratiques de la NSA ont causé un scandale international, les agences de renseignement françaises ne sont pas en reste pour la surveillance téléphonique et électronique de grande envergure. Moins d'un mois après les révélations d'Edward Snowden, l'interception des communications privées en France, aux frontières de la légalité, était dénoncée par les médias.

Cette dérive résulte de la centralisation des données, comme l'explique Alex Pentland dans cet article, et du fait qu'il soit devenu trivial de les consulter et de les croiser. Au-delà des pratiques des agences de renseignement, l'ère des données massives est confrontée à des enjeux contradictoires : comment à la fois publier des données d'utilité publique (recensement, fréquentation du métro, géolocalisation pour le covoiturage, etc.) et protéger la vie privée des individus ?

Depuis près d'une dizaine d'années, l'équipe Systèmes d'information sécurisés et mobiles d'Inria (Institut national de recherche en informatique et en automatique), à Paris, dont je suis membre associé, travaille sur le projet PlugDB (pour *Plug Database*, littéralement base de données à brancher). Ce projet se fonde sur des principes proches de ceux présentés par A. Pentland, en particulier la décentralisation des données, tout en allant plus loin sur la sécurité et la confiance. L'élément central du dispositif est un petit appareil sécurisé connectable à un ordinateur. Il permet aux individus de stocker leurs données ou des liens sur ces données, et surtout d'en contrôler l'accès, le partage, la modification et la destruction.

C'est au sein même de ce dispositif hautement sécurisé que s'exécutent les applications de gestion de données, et non dans un serveur d'Internet ou sur un ordinateur. Il faudra alors que les concepteurs d'applications fournissent les logiciels nécessaires pour les faire fonctionner. Le dispositif est sécurisé même contre l'utilisateur : quand ce dernier souhaite utiliser un logiciel, il est assuré que c'est bien lui qui s'exécute, mais il ne peut ni voir ni modifier le code sous-jacent. Les concepteurs sont alors libres de publier ou non le code, pour des raisons de transparence ou de secret industriel.

Prenons l'exemple de l'application *Google Flu Trends*, qui permet de prévoir les épidémies de grippe. Même si *Google* garantit contractuellement l'anonymat des utilisateurs et explique n'avoir besoin que de données agrégées (par exemple le nombre de fois que certains mots clés apparaissent dans une zone géographique), il stocke en réalité de manière centralisée l'intégralité des requêtes posées, ainsi que différents paramètres liés à l'utilisateur (telle l'adresse IP). Et ce pendant plusieurs années ! Ces données sont à la merci d'un piratage et d'un usage abusif par *Google* ou par les États faisant pression sur l'entreprise.

Avec un instrument comme PlugDB, l'utilisateur n'a pas besoin de dévoiler ses données personnelles, dont il reste maître. Il peut choisir la précision de celles qui sont divulguées, surveiller les accès et leur fixer une date limite, etc. La confiance est permise par l'utilisation d'un système d'exploitation transparent (dont le code est librement consultable) et de matériel sécurisé, qui n'autorise pas la falsification des données, même par leur détenteur.

– Benjamin Nguyen
Institut national des sciences appliquées (INSA), Bourges

où des milliers de milliards de dollars transitent chaque jour. Grâce notamment à ses systèmes de contrôle de métadonnées et de vérification automatique, ce réseau de confiance repousse les cambrioleurs et assure un trajet fiable des fonds jusqu'à la destination souhaitée.

Autrefois, les réseaux de confiance étaient complexes et leur fonctionnement coûteux, mais la démocratisation des capacités de calcul les a rendus accessibles à de petites organisations, voire à des individus. En partenariat avec l'Institut de conception guidée par les données, à Boston, mon équipe de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) a participé à la construction de centres de données personnelles ouverts, ou *open* PDS (pour *Personal Data Store*), une version grand public de ce type de système. À l'heure actuelle, nous les testons avec des partenaires industriels et gouvernementaux. L'idée est de permettre à tous un partage de données sensibles, notamment sanitaires et financières, avec un niveau de sécurité équivalent à celui de SWIFT. Quand les réseaux de confiance se répandront, il deviendra plus sûr d'échanger des données, dont l'enregistrement dans des architectures de stockage réparties et sécurisées protégera à la fois les individus et les organisations ; ainsi, les mauvaises utilisations des données massives devraient être évitées.

PRINCIPE 3
Toujours expérimenter

Le dernier principe, peut-être le plus important, est d'admettre que nous n'avons pas toutes les réponses et qu'il n'y a pas de solution définitive. Nous devons continuellement nous adapter. L'ère du numérique est totalement nouvelle, de sorte que nous ne pouvons pas nous contenter de méthodes classiques.

Sous la pression des autres pays, des citoyens et des entreprises du Web, la Maison Blanche a déjà proposé de limiter la surveillance exercée par la NSA. Dans un effort pour restaurer la confiance, les entreprises du Web cherchent à obtenir le droit de diffuser des informations sur les requêtes de l'agence – des métadonnées sur des métadonnées. En mai 2014, la Chambre des Représentants a voté une loi qui, bien que jugée insuffisante par de nombreux défenseurs de la vie privée, commençait à restreindre les collectes massives de données et à introduire un peu plus de transparence (cette loi a cependant été refusée par le Sénat en novembre).

Ces mesures vont dans la bonne direction, mais nous ne pourrons trouver que des solutions à court terme. Les techniques évoluent et les procédures gouvernementales doivent suivre le rythme. Finalement, le changement le plus important serait que nous décidions de conduire en continu des expériences et des tests à petite échelle, afin d'innover sans cesse et de trier ce qui fonctionne de ce qui ne fonctionne pas. ■

La sélection de livres pour la SCIENCE pour Noël

Sciences et images sont à l'honneur pour cette sélection spéciale Noël ! Découvrez la science comme vous ne l'avez jamais vue à travers de splendides photographies d'animaux, d'images du monde microscopique incroyables ou encore d'illustrations mathématiques uniques !

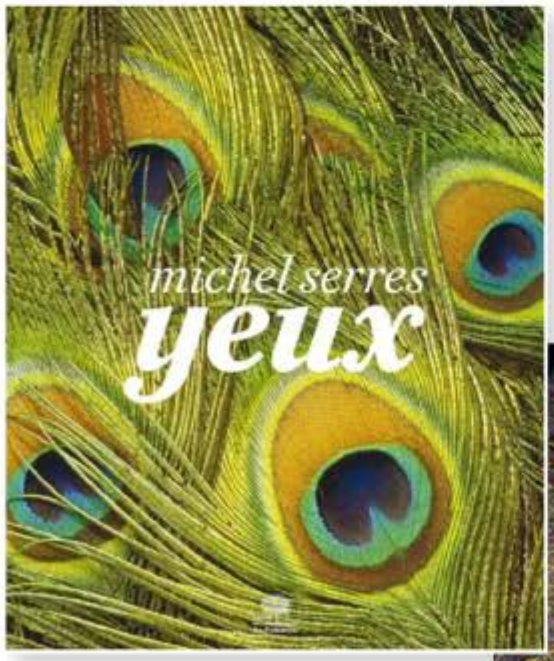
Les chimpanzés des Monts de la Lune

Sabrina Krief et Jean-Michel Krief, préface de Nicolas Hulot

Réf. 70118308

Imaginez-vous au cœur d'une forêt tropicale. À moins de dix mètres, des chimpanzés sauvages. Vous entendez leurs rires, leurs parties de jeu endiablées. Vous les voyez utiliser des outils, prendre soin de leurs petits, se soigner à l'aide de plantes. Voilà ce que vivent depuis plus de quinze ans Sabrina Krief, chercheuse au Muséum national d'Histoire naturelle, et Jean-Michel Krief, photographe. Ce beau livre est aussi le récit d'une aventure scientifique exceptionnelle.

Éditions Belin 2014 - 264 pages - 30 € - 978-2-7011-8308-4



Yeux

Michel Serres

Réf. 74650779

Comment voit-on ? Qu'est-ce que voir ? Être vu ? Quelles performances de vision peut-on rencontrer dans la nature ? Et jusqu'où l'homme pourra-t-il « voir » le monde ? Dans ce livre magnifique, Michel Serres explore, à la façon de variations, les capacités des yeux, de tous les yeux.

Éditions Le Pommier 2014 - 216 pages - 39 € - 978-2-7465-0779-1

En partenariat avec les éditeurs

Belin ÉDITEUR INDÉPENDANT DEPUIS 1777

Éditions Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.

50 expériences pour épater vos amis à table

Jack Guichard
et Guy Simonin

Réf. 74650544

Retournez votre verre de vin sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'une explication simple et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.

Éditions Le Pommier 2013
168 pages – 18,90 €
978-2-7465-0544-5

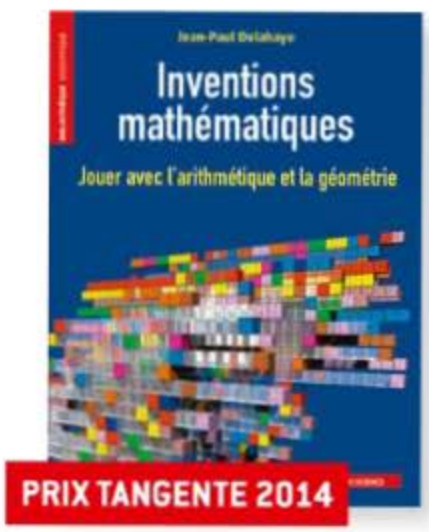
Micromonde

François Michel et Hervé Conge

Réf. 70117566

Partez à la découverte de l'architecture secrète du monde vivant et du monde minéral. Offrez-vous un voyage dans l'intimité de la nature, accompagné de commentaires joyeux.

Éditions Belin 2014 - 192 pages
23 € - 978-2-7011-7566-9



Inventions mathématiques

Jean-Paul Delahaye

Réf. 84245128

Dans ce livre, vous trouverez des figures paradoxales, des jeux classiques comme le Tangram et le cube de Rubik, des problèmes du quotidien tels le découpage d'une pizza ou l'accrochage d'un tableau, etc.

Éditions Belin-Pour la Science 2014
192 pages - 25 € - ISBN 978-2-8424-5128-8

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

BON DE COMMANDE

À retourner accompagné de votre règlement à :
Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil

❑ **Oui, je commande les livres** présentés dans la sélection de *Pour la Science*. Je reporte les titres, prix et références à 6 chiffres correspondant aux ouvrages choisis :

Titre	Réf.	Prix
		€
		€
		€
		€
		€
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger)	+	€
Total à régler	=	€

J'indique mes coordonnées :

Nom :
Prénom :
Adresse :
C.P. : Ville :
Pays : Tél.* :
*facultatif
E-mail* :
@
*pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscules).

Je choisis mon mode de règlement :

❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ par carte bancaire
Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme

Signature obligatoire

SCIENCE Belin

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. **En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ❑.**

DPL447 Offre valable jusqu'au 31.01.2015, dans la limite des stocks disponibles.

HISTOIRE DES SCIENCES

Des *Mille et une nuits* aux oiseaux géants malgaches

L'oiseau Roc rencontré par Sinbad le Marin a-t-il existé ? Probablement pas, mais il a pu être inspiré par les œufs géants d'une espèce récemment éteinte, signalée à Madagascar au XVIIe siècle.

Eric Buffetaut

Les plus anciennes traces d'occupation humaine à Madagascar ne remontent guère qu'à environ deux millénaires avant notre ère. Auparavant, toute une faune très particulière y avait évolué dans l'isolement. Elle comprenait des lémuriens géants, des hippopotames nains et aussi des oiseaux gigantesques, les Aepyornithidés. Des datations récentes au carbone 14 montrent que ces étranges animaux se sont éteints assez récemment, victimes probablement des activités humaines. Il semble bien que les Aepyornithidés aient survécu assez longtemps pour laisser une trace dans les contes et légendes de l'Orient, ainsi que dans les récits des premiers explorateurs européens.

De Sinbad à Marco Polo

À en croire les *Mille et une nuits*, Sinbad le marin rencontra plusieurs fois l'oiseau Roc. Lors de son deuxième voyage, abandonné par ses compagnons sur une île déserte, il y trouva une énorme sphère blanche qui se révéla être un œuf gigantesque lorsqu'un oiseau immense vint se poser sur lui pour le couver. Sinbad reconnut immédiatement l'oiseau Roc, célèbre en Orient. Le rusé marin décida, pour quitter l'île, de s'attacher à une des pattes de l'oiseau avec le tissu de son turban. Quand le Roc s'envola le lendemain matin, il emporta donc Sinbad. L'île où il se posa était peuplée de serpents géants (dont le Roc se nourrissait) et d'aigles. Elle était aussi riche en diamants, dont les visiteurs devaient disputer la récolte aux serpents. Ce que fit Sinbad avant de rentrer à Bassora, fortune faite, avec quelques marchands rencontrés sur l'île.

Lors de son cinquième voyage, entrepris avec plusieurs marchands, Sinbad rencontra de nouveau l'oiseau Roc. Au terme d'une longue traversée, les navigateurs atteignirent une île, sur laquelle ils découvrirent un œuf de Roc prêt à éclore. En dépit des mises en garde de Sinbad, ses compagnons ouvrirent l'œuf avec des haches, découpèrent l'oisillon et le rôtirent. À peine avaient-ils fini leur repas que les parents arrivèrent. Le capitaine mit à la voile le plus vite possible, en vain : les oiseaux, ayant compris ce qu'il était arrivé à leur progéniture, saisirent dans leurs serres d'énormes rochers et les laissèrent tomber sur le navire, qui coula rapidement. Le seul survivant fut Sinbad, qui flotta agrippé à un morceau de l'épave jusqu'à une île voisine, où il subit maintes tribulations aux mains du Vieil Homme de la Mer avant de pouvoir rentrer à Bassora.

L'oiseau Roc n'est pas un simple produit de l'imagination fertile de Schéhérazade. Au Moyen Âge, des récits au sujet d'un énorme oiseau vivant sur des îles de l'océan Indien, capable d'emporter des éléphants dans ses serres, étaient courants en Orient. Marco Polo s'en fit l'écho au XIIIe siècle, notant qu'un tel oiseau habitait des îles au sud de

LES COMPAGNONS DE SINBAD, lors de son cinquième voyage, découvrent un œuf de l'oiseau Roc, qu'ils brisent pour rôtir l'oisillon, s'attirant la colère des parents. Dans le récit des *Mille et une nuits* comme sur cette gravure de Gustave Doré, réalisée vers 1880, l'oiseau ressemble à un rapace géant. Un tel oiseau a-t-il existé ?

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

« Madeigascar ». L'animal ressemblait à un aigle, mais ses dimensions étaient colossales. Son envergure était de 30 pas, et ses plumes longues de 12 pas. Il se nourrissait d'éléphants qu'il emportait dans ses serres avant de les laisser tomber d'une grande hauteur pour se repaître de leur cadavre. Marco Polo ajouta avoir vu à la cour de Kubilai Khan, en Chine, des plumes de Roc d'une longueur immense (il a été suggéré qu'il s'agissait en fait de feuilles de palmier).

Trois siècles après Marco Polo, la rumeur d'un oiseau géant à Madagascar prit un tour différent. C'est un marin bien réel qui en fit état. Étienne de Flacourt avait été envoyé à Madagascar en 1648 par ordre de Richelieu pour ramener le calme parmi les habitants français installés depuis peu sur l'île, devenue, au moins sur le papier, une colonie du royaume de France. Le petit comptoir en question, sur la côte sud-est, avait vite sombré dans l'anarchie et les Malgaches s'étaient révoltés. Ayant rétabli l'ordre et maté la rébellion, l'amiral Flacourt fut le premier Européen à rédiger une description détaillée de Madagascar (du moins d'une partie de l'île), publiée en 1658 sous le titre *Histoire de la grande isle Madagascar*. Il y décrivait la géographie et les événements récents qui l'avaient amené sur place, mais aussi les indigènes, leurs mœurs, leur langage, leurs us et coutumes et leurs croyances, ainsi que la flore et la faune locales.

Un passage en particulier, consacré aux « oyseaux qui hantent les bois », a beaucoup attiré l'attention des paléontologues. Flacourt y décrit le *Vouron patra* : « C'est un grand oyseau qui hante les Ampatres [une région du Sud-Est de Madagascar] et y fait des œufs comme l'Autruche, c'est une espèce d'Autruche, ceux desdits lieux ne le peuvent prendre, il cherche les lieux les plus déserts. »

Flacourt fut tué lors d'un combat naval contre des pirates barbaresques au retour d'un second voyage à Madagascar en 1660, et sa description d'une autruche malgache sombra dans l'oubli. La petite colonie française de Madagascar fut abandonnée. L'intérêt de la France pour Madagascar se manifesta de nouveau au XIXe siècle et culmina en 1897 avec une importante expédition militaire qui conduisit à la colonisation complète de l'île. Mais dès les premières décennies du siècle, les naturalistes français s'étaient intéressés de près à Madagascar, entre autres parce que des preuves tangibles de l'existence d'un oiseau géant y avaient été découvertes.

Des os d'autruches géantes ?

Cette fois encore, des marins ont joué un grand rôle dans ces découvertes. Vers 1830, un capitaine français nommé Victor Sganzin envoya à l'ornithologue Jules Verreaux des notes et des dessins au sujet d'œufs de très grande taille trouvés à Madagascar. En 1834, un autre voyageur français, Jules Goudot, apporta à Paris des fragments de coquilles d'œufs. Le zoologue Paul Gervais tenta d'estimer les dimensions des œufs complets. La suite montra qu'il les avait notablement sous-estimées. Il s'agissait en effet de très gros œufs : en 1848, un certain Dumarèle signala avoir vu sur la côte nord-est de Madagascar un œuf entier qui contenait l'équivalent de 13 bouteilles !

En 1850, enfin, le capitaine Abadie, qui commandait un navire de commerce, apporta au Muséum de Paris trois œufs complets et quelques os, provenant de la côte sud-ouest. Le zoologue Isidore Geoffroy Saint-Hilaire en fit l'étude. Les calculs

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

montrèrent que l'un d'eux avait un volume d'un peu plus de huit litres, soit l'équivalent de 6 œufs d'autruche, 148 œufs de poule, ou 50 000 œufs d'oiseau-mouche ! Geoffroy Saint-Hilaire nomma l'oiseau qui avait pondu ces œufs *Aepyornis maximus* (oiseau élevé le plus grand). Il y voyait à juste titre un ratite – un oiseau apparenté à l'autruche –, mais tous les experts ne partagèrent pas ce point de vue. Achille Valenciennes voulait y voir un gigantesque manchot. Quant au naturaliste italien Giuseppe Bianconi, il croyait non seulement que le récit de Marco Polo avait pour point de départ l'*Aepyornis*, mais aussi que sa description du Roc comme un oiseau géant volant était correcte pour l'essentiel. Dans de nombreux articles publiés dans les années 1860 et 1870, il interpréta donc *Aepyornis* comme un oiseau de proie ressemblant au condor – qui devait vraiment avoir été gigantesque pour pondre de tels œufs.

La question fut réglée lorsque des restes squelettiques plus complets furent découverts à Madagascar par divers voyageurs européens, au premier rang desquels l'explorateur français Alfred Grandidier. Leur étude confirma que les oiseaux géants de Madagascar étaient bel et bien apparentés à l'autruche, comme l'avait compris Isidore Geoffroy Saint-Hilaire. Les os et les œufs énormes d'*Aepyornis* furent très convoités par les naturalistes dès le milieu du XIXe siècle, et on peut en voir dans de nombreux musées européens.

Les oiseaux géants malgaches ont été classés en une famille, les Aepyornithidés, où l'on a distingué deux genres, chacun comprenant plusieurs espèces. Particulièrement grand et robuste, *Aepyornis* atteignait 2,50 mètres de hauteur et pesait peut-être jusqu'à plus de 400 kilogrammes, ce qui en fait un des plus gros oiseaux connus. En revanche, *Mullerornis*, plus petit et plus gracile, n'était pas plus grand qu'une autruche. Notons que les dernières études détaillées sur l'anatomie et la classification des Aepyornithidés remontent au début du XXe siècle et que de nouvelles recherches seraient bienvenues pour préciser le nombre réel d'espèces ayant existé. Quoi qu'il en soit, de nombreux restes de ces oiseaux ont été trouvés dans diverses régions de Madagascar, souvent dans des tourbières et des marais, avec les restes d'autres animaux récemment éteints, parfois au cours du dernier millénaire, parmi lesquels des hippopotames nains et des lémuriens géants.

De très grands oiseaux avaient donc existé à Madagascar à une date relativement récente. Une fois ce fait acquis, on ne tarda pas à exhumer le texte de Flacourt au sujet du *Vouron patra*. En effet, les écrits de l'amiral semblaient indiquer que des Aepyornithidés vivaient encore sur l'île au XVIIe siècle (sans qu'il soit d'ailleurs possible de dire s'il s'agissait d'*Aepyornis* ou de *Mullerornis*). On pouvait dès lors se demander s'ils étaient éteints. Peut-être l'exploration poussée des régions les plus reculées de Madagascar permettrait-elle de découvrir des *Aepyornis* vivants – d'autant plus que jusque dans les années 1890, des rumeurs locales circulaient encore au sujet de l'existence d'oiseaux géants. Mais à mesure que progressait l'exploration de l'île par les Européens, et surtout à la suite de l'occupation par les Français, il devint clair que le *Vouron patra* avait bel et bien disparu. Les notes de Flacourt suggéraient néanmoins que cette disparition n'était pas très ancienne.

Les datations au carbone 14 pratiquées sur des restes d'*Aepyornis* ont permis de préciser vers quelle époque les oiseaux géants ont disparu. Certains spécimens ont fourni des âges de moins de 1 000 ans, et il est donc fort possible que les oiseaux géants existaient encore dans certaines régions de l'île quand Flacourt en entendit parler au milieu du XVIIe siècle. Les traces de présence humaine à Madagascar remontant à environ deux millénaires avant notre ère, l'homme et les Aepyornithidés auraient coexisté assez longtemps. Les causes de l'extinction demeurent mal connues, mais on peut penser que les activités humaines y sont pour quelque chose, avec la

L'AUTEUR

Eric BUFFETAUT est paléontologue au Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, à Paris (CNRS, UMR 8538).

Source : Walter Schoenichen, *Tierleben der Vorzeit*, 1912

LES ŒUFS D'AEPYORNIS équivalaient à six œufs d'autruche et 148 œufs de poule – une comparaison immortalisée sur cette photo de l'ornithologue allemand Georg Krause, au début du XXe siècle (il tient un œuf d'*Aepyornis* dans chaque main, un œuf de poule dans sa main droite et un d'autruche dans sa main gauche).

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

prédation (et la consommation des œufs) et la transformation du milieu naturel, *via* le développement de l'élevage de bovins et la destruction de la végétation originelle par des incendies.

Mais y a-t-il vraiment un lien entre les *Aepyornis* malgaches et la légende de l'oiseau Roc, comme beaucoup l'ont supposé ? Les oiseaux géants de Madagascar n'avaient pas grand chose en commun avec l'énorme oiseau de proie décrit dans les *Mille et une nuits* et par Marco Polo. Ils auraient été bien incapables d'enlever dans leurs serres des éléphants (qui d'ailleurs n'ont jamais vécu à Madagascar), pour la bonne raison que, tout comme celles des autruches, leurs ailes atrophiées ne leur permettaient pas de voler. Le texte de Flacourt suggère bien qu'*Aepyornis* (ou *Mullerornis*) existait encore à l'époque où Marco Polo entendit parler du Roc, mais on voit mal comment un oiseau ressemblant à une autruche aurait pu donner naissance à des récits portant sur un gigantesque rapace.

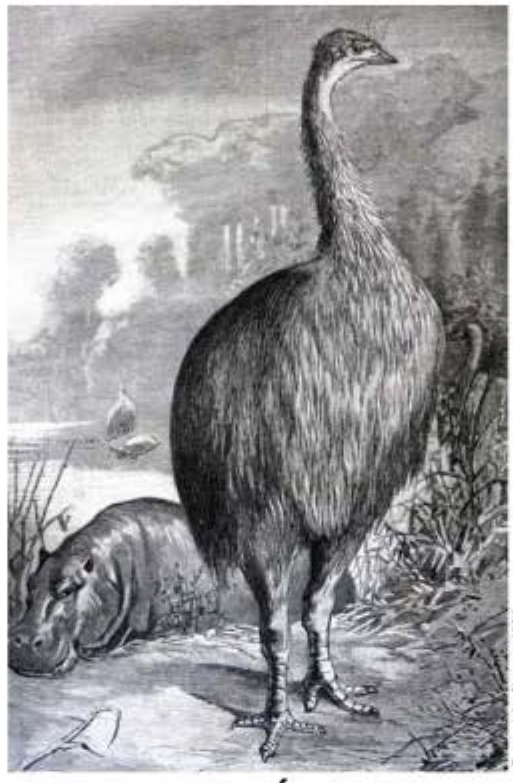
Aepyornis, inspirateur de mythes ?

À vrai dire, il y aurait parmi les animaux malgaches récemment éteints un candidat plus plausible : *Stephanoaetus mahery*, un grand aigle atteignant deux mètres d'envergure, qui avait sans doute pour proies les grands lémuriens (mais n'aurait pu s'attaquer à un éléphant !). Mais ce sont surtout les énormes œufs d'*Aepyornis* qui ont suggéré un lien avec l'oiseau Roc. Henry Yule, auteur d'une traduction en anglais des œuvres de Marco Polo, en était si convaincu qu'en 1871, il utilisa comme frontispice pour cet ouvrage une lithographie représentant « L'œuf du Roc : grandeur nature. Mesuré et dessiné d'après l'œuf de l'*Aepyornis* au *British Museum* ».

De fait, dès le Moyen Âge, des marchands arabes ont atteint Madagascar et les œufs énormes de l'*Aepyornis* ont pu servir de preuves tangibles à des histoires d'oiseaux géants. De tels êtres figurent dans les mythes et légendes de nombreuses contrées où l'on n'a d'ailleurs jamais découvert d'œufs gigantesques. Les grands œufs malgaches ont pu confirmer des récits préexistants plutôt qu'en être l'origine. Selon certains auteurs, l'oiseau Roc serait en fait la personnification des typhons destructeurs de navires qui sévissent dans l'océan Indien. C'est ce que peut suggérer la description du Roc par le voyageur arabe Ibn Battûta au XIVe siècle, qui évoque un tel phénomène météorologique.

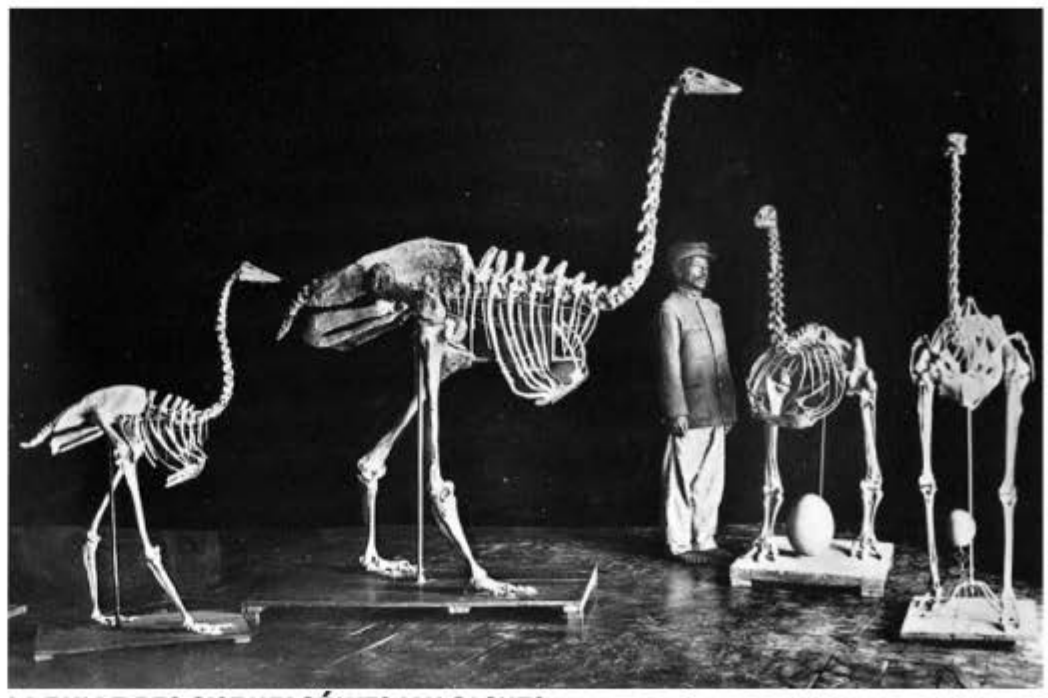
Quoi qu'il en soit, l'*Aepyornis*, oiseau gigantesque aux œufs énormes, peut faire rêver tout autant que le mythique oiseau Roc. En témoigne une nouvelle publiée par H. G. Wells en 1894, *L'île de l'Aepyornis*, qui connut un certain succès et est régulièrement rééditée. Le narrateur anonyme y rencontre un homme balafré du nom de Butcher, qui vit de la collecte et de la vente d'objets d'histoire naturelle, comme cela se faisait beaucoup au XIXe siècle avant les mesures modernes de protection de la nature.

Butcher a une curieuse histoire à raconter. Dans un marais de la côte orientale de Madagascar, il a découvert des œufs d'*Aepyornis* « aussi frais que s'ils venaient d'être pondus », bien que datant probablement de plusieurs siècles. Il emporte les œufs dans son embarcation, mais les choses tournent mal lorsque ses aides indigènes se rebellent contre lui et qu'il doit les abattre. Il se retrouve à la dérive sur l'océan dans un petit canot, ne devant sa survie qu'aux œufs d'*Aepyornis*, qui se



Source : *La Nature*, 1894

L'OISEAU MALGACHE ÉTEINT *AEPYORNIS*, ici reconstitué en 1894 d'après une description du zoologue Émile Oustalet, ressemblait à une autruche géante. En arrière-plan, on distingue d'autres éléments de la faune récemment éteinte de Madagascar, notamment un hippopotame nain et des tortues géantes.



Source : Charles Lamberton, *Mémoires de l'Académie Malgache*, 1934

LA TAILLE DES OISEAUX GÉANTS MALGACHES variait selon les espèces, comme le montre cette collection de squelettes du Musée de Tananarive au début des années 1930. De gauche à droite : *Mullerornis agilis*, *Aepyornis maximus*, *Aepyornis hildebrandti* et une autruche actuelle *(Struthio camelus)* pour comparaison.

révèlent comestibles. Quand il aborde enfin sur un atoll désert, il ne reste qu'un seul œuf, qui finit par éclore, donnant naissance à un poussin d'*Aepyornis*. Le jeune oiseau fournit d'abord une agréable compagnie au naufragé, qui le nourrit de poisson et prend soin de lui. Au bout de deux ans, l'*Aepyornis* ayant atteint une hauteur de plus de quatre mètres, la nourriture vient à manquer et l'oiseau se tourne contre son protecteur. Devenu agressif, il lui taillade le visage avec son bec et le pourchasse, l'obligeant à se réfugier dans le lagon ou dans des arbres.

Face à ce danger, Butcher finit par tuer l'*Aepyornis* en le faisant tomber à l'aide d'une corde et en l'égorgeant. Il est enfin recueilli par un yacht de passage et retourne en Angleterre, où il vend les énormes os de son ex-protégé à un naturaliste. Ceux-ci sont décrits comme une nouvelle espèce, *Aepyornis vastus* – Wells se moquant ainsi gentiment de la propension des paléontologues à utiliser des superlatifs, tels *maximus* ou *titan*, pour désigner les espèces d'*Aepyornis*.

Avec la nouvelle de Wells, nous voici presque revenus à notre point de départ. Tout comme Sinbad le marin rencontre l'oiseau Roc et ses œufs sur des îles mythiques, c'est sur un atoll imaginaire que Butcher doit se défendre contre un *Aepyornis* sorti d'un œuf énorme. Il n'est pas certain que l'*Aepyornis* soit réellement à l'origine de la légende du Roc, comme beaucoup l'ont cru, et il sera sans nul doute difficile de démontrer ou d'infirmer cette hypothèse. Il reste que ces oiseaux géants exercent une sorte de fascination sur l'esprit humain, qui s'est exprimée sous forme de mythes, légendes, contes ou récits de science-fiction suivant le lieu et l'époque. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

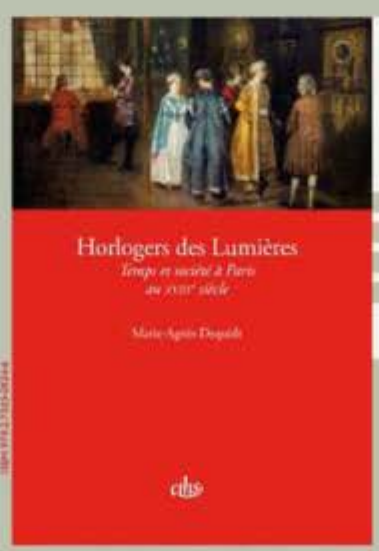
E. Buffetaut, **From Sinbad the Sailor to H.G. Wells : Aepyornis and the Rûkh bird**, in L. Talairach-Vielmas et M. Bouchet (coord.), **Lost and found : in search of extinct species**, pp. 159-166, Muséum d'histoire naturelle de Toulouse, 2013.

S. Goodman et W. L. Jungers, **Extinct Madagascar**, University of Chicago Press, 2014.

D. Gommery *et al.*, **Madagascar. Premiers habitants et biodiversité passée**, *Archeologia*, vol. 494, pp. 40-49, 2011.

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques
une collection complète d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

Les grands ensembles en France
Gwenaëlle Le Goullon
360 pages
15 x 22 cm
br
29 €



Horlogers des Lumières
Marie-Agnès Dequidt
400 pages
15 x 22 cm
br
29 €

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques • ventes@cths.fr • vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr • Distribution Sodis

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

2ÈME ÉDITION

UNIVERS CONVERGENTS

SCIENCES - FICTIONS - SOCIÉTÉ

—

Le Ciné Club de l'Institut Henri Poincaré

—

Au Cinéma Grand Action,
5 rue des Écoles, Paris 5.

TOUS LES DERNIERS MARDIS DU MOIS - 19H30

En présence de Cédric Villani et de nombreux intervenants.

› 27 JANVIER - *Rencontres du 3ème type*
Saura-t-on communiquer avec des extraterrestres ?

› 24 FÉVRIER - *L'Homme au complet blanc*
Un progrès scientifique peut-il mettre en danger notre modèle économique ?

› 31 MARS - *Out of the present*
Quelle géopolitique pour l'espace ?

› 28 AVRIL - *Contagion*
Comment la société s'organise-t-elle pour gérer une pandémie ?

› 26 MAI - *Her*
La frontière entre l'humain et l'ordinateur va-t-elle disparaître ?

› 30 JUIN - *Planète interdite*
La science-fiction doit-elle se soucier de la science ?

› Entrée libre sur réservation
15 jours avant chaque séance :
www.ihp.fr/fr/cine-club-2015

En partenariat avec

© image centrale créée sur ordinateur par les membres du projet HEVEA
Mise en page : Marine Giacomi • marinegiacomi.wix.com/marinegiacomi

LOGIQUE & CALCUL

Le problème du sudoku

La donnée de 16 chiffres dans une grille de sudoku est insuffisante pour que la solution du problème soit unique. Pour le prouver, il a fallu énumérer toutes les grilles, en usant d'astuces afin de raccourcir les calculs.

Jean-Paul DELAHAYE

C'est une illusion de croire que la puissance des machines nous dispense de réfléchir. À propos du problème des données minimales au sudoku, nous allons voir que la limite du faisable est vite atteinte, et que pour la repousser, il faut de l'ingéniosité, des mathématiques et quand même beaucoup de patience.

Rappelons les règles du sudoku et fixons quelques termes. Une « grille de sudoku complète » est un tableau carré de $9 \times 9 = 81$ cases contenant chacune un chiffre de 1 à 9 et tel que :

(a) chaque ligne et chaque colonne contiennent chaque chiffre une fois exactement ;

(b) chaque sous-tableau 3×3 (résultat du découpage de la grille en neuf carrés de neuf cases) contient chaque chiffre une fois exactement.

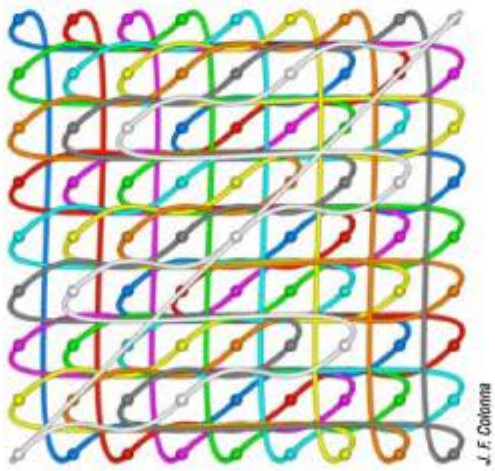
Une grille partielle est un « problème de sudoku correct » s'il existe une façon unique de compléter la grille en une grille de sudoku complète, ce qui est le but du jeu.

Précisons qu'au sudoku, l'ordinateur est gagnant sur l'humain : il existe un grand nombre de programmes permettant à l'ordinateur de battre de vitesse le meilleur humain. Les bons programmes trouvent la solution d'un problème, aussi difficile soit-il, en moins d'un millième de seconde. On joue donc pour le plaisir de l'exercice.

Quand on cherche à formuler un énoncé, si l'on spécifie trop peu de cases, la grille partielle ne constitue pas un problème correct (c'est évident si on ne retient qu'une case), car plusieurs solutions seront possibles. Dans les journaux, les grilles proposées comportent environ 25 cases remplies. On sait cependant qu'il existe des grilles correctes de sudoku ne comportant que 17 données *(voir l'encadré ci-contre)*.

Le problème des données minimales est : *Quel est le plus petit nombre de données d'un problème de sudoku correct ?*

L'exemple à 17 données montre que ce minimum est 17 ou moins. On a longtemps cherché, sans succès, des problèmes corrects à 16 données ; on a donc conjecturé que 17 est la réponse.



VISUALISATION D'UN SUDOKU
par Jean-François Colonna. Chaque couleur est associée à un chiffre.

Au moins 16 ou 17 cases ?

Le problème est resté ouvert jusqu'à ce que, en décembre 2011, la réponse soit fournie par Gary McGuire, de l'Université de Dublin, et son équipe. À la suite d'un calcul étalé sur une année et correspondant à 800 années de calcul d'un processeur unique, la conclusion fut qu'il n'existe aucune grille correcte de sudoku à 16 données et donc que le nombre minimal de données d'un problème correct de sudoku est 17.

Il s'agit d'un théorème mathématique, et puisque c'est la question mathématique concernant le sudoku qui a demandé le plus d'effort, on l'appellera « Le théorème du sudoku ». Le travail qui a conduit à l'énoncer est une démonstration. Comme cela se

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

produit maintenant de plus en plus souvent, il s'agit d'une démonstration avec un ordinateur *(voir l'encadré page 78 pour d'autres exemples)*. Le détail des étapes du calcul n'a pas été publié, car cela donnerait un document d'une longueur colossale. L'article rendant compte de la preuve n'est donc que la description de la méthode utilisée, comportant, entre autres, les énoncés et démonstrations des propositions purement mathématiques utiles, mais pas assez d'éléments pour que l'on puisse vérifier le théorème sans tout reprogrammer et recalculer.

Des versions préliminaires de l'article étaient disponibles depuis un moment, mais il n'a été publié dans sa forme définitive que le 12 juin 2014, dans la revue *Experimental Mathematics*. Malgré cette publication officielle, essentielle pour qu'un résultat soit considéré comme sérieux, et une vérification du calcul menée par une autre équipe (en septembre 2013), certains chercheurs, dont Joshua Cooper de l'Université de Caroline du Sud, doutent du statut de ce théorème dont la « démonstration », d'un type particulier, exclut difficilement le risque d'erreur. Nous y reviendrons.

Dans un premier temps, présentons la méthode de preuve utilisée par G. McGuire et les autres équipes qui ont abordé le problème. Nous insisterons sur l'utilité d'une analyse mathématique préliminaire, la collaboration d'autres équipes (ayant mené d'autres calculs volumineux et transmis des programmes à G. McGuire et son équipe), la rigueur méthodologique indispensable, le délicat savoir-faire nécessaire à la programmation et à la réalisation des calculs et, enfin, l'incroyable quantité de calculs effectués.

Existe-t-il une grille complète G dont on peut extraire 16 données qui, quand on les complète (en respectant les règles du sudoku), donnent nécessairement la grille G ?

Des grilles intéressantes

La grille *a* comporte 17 données et n'a qu'une seule solution, *b*. Ce type de grille a posé la question : peut-on faire plus économique et ne fixer que 16 données dans une grille tout en préservant l'unicité de la solution ?

Le calcul de Gary McGuire et de son équipe montre que pour avoir une solution unique, il faut toujours spécifier au moins 17 cases. Mais parfois, 17 données ne suffisent pas. La grille *c* fournit un exemple où 18 données sont nécessaires (aucune sous-grille à 17 données n'est correcte). Cette grille permet aussi d'illustrer la puissance de la méthode des *sous-ensembles inévitables* au cœur des programmes de G. McGuire.

Considérons les deux colonnes verticales de trois chiffres en jaune en haut à gauche (1, 4, 7) et au centre (4, 7, 1). Si on les échange, on obtient une nouvelle grille complète de sudoku. Cela prouve que tout problème conduisant à cette grille doit comporter une donnée parmi les six cases concernées. Il en va de même pour les deux colonnes jaunes en haut au centre (4, 7, 1) et à droite (7, 1, 4), ainsi que pour les colonnes (1, 4, 7), et (7, 1, 4) en jaune en haut. Il en résulte que parmi les neuf cases jaunes en haut, deux doivent être données dans tout problème ayant cette grille comme solution unique.

C'est aussi vrai pour les autres paquets de neuf cases (en bleu, en rouge) de la zone du haut, de la zone du milieu et de la zone du bas. Cela fait en tout neuf paquets de neuf cases, et pour chacun deux données au moins à retenir. Tout problème conduisant à *c* doit donc comporter au moins 18 données. Il n'y aura donc, dans ce cas particulier, aucun énoncé correct à 17 données.

Pour toute grille, un raisonnement montre qu'un problème correct comporte au moins huit données. S'il ne comporte que sept données ou moins et doit conduire à une grille G fixée, ces données ne mentionnent pas deux chiffres, par exemple le 8 et le 9, et donc les sept données ne peuvent pas distinguer la grille complète visée G et la même grille G' où l'on a interverti les 8 et les 9. Les sept données ne constituent donc pas un problème correct.

De tels raisonnements mathématiques ne permettent pas aujourd'hui d'aller plus loin : on ne sait même pas prouver sans machine que huit données ne suffisent jamais à composer un problème correct.

a

1						5	2	
				7	8			
						6		
	9			4				
			5			1		
	7							
		6	2					
	4						7	8
								3

b

1	6	8	4	9	3	5	2	7
4	5	2	6	7	8	3	9	1
9	3	7	1	5	2	6	8	4
6	9	3	8	4	1	7	5	2
8	2	4	5	6	7	1	3	9
5	7	1	3	2	9	8	4	6
7	8	6	2	3	4	9	1	5
3	4	5	9	1	6	2	7	8
2	1	9	7	8	5	4	6	3

c

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	5	6	7	8	9	1	2	3
7	8	9	1	2	3	4	5	6
2	3	4	5	6	7	8	9	1
5	6	7	8	9	1	2	3	4
8	9	1	2	3	4	5	6	7
3	4	5	6	7	8	9	1	2
6	7	8	9	1	2	3	4	5
9	1	2	3	4	5	6	7	8

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

Les démonstrations par ordinateur

Le recours à l'ordinateur pour démontrer des résultats mathématiques est de plus en plus fréquent. Souvent, l'ordinateur n'intervient qu'associé à des résultats purement mathématiques démontrés à la main et qui posent les bases des algorithmes confiés à la machine. C'est le cas pour le théorème des 17 données du sudoku.

Les démonstrations de théorèmes dépendant de calculs informatiques ont souvent été jugées insatisfaisantes, car d'une part, aucun humain seul ne peut les contrôler, d'autre part, les programmes et leurs calculs sont susceptibles d'erreurs de toutes sortes. Pour limiter ce risque d'erreurs, on a développé une méthode de « preuve formelle » par ordinateur, qui diminue considérablement ce risque et qui permet même une meilleure garantie de justesse que les preuves humaines dans certains cas. (voir cette rubrique de juin 2011, *Du rêve à la réalité des preuves*). On met en œuvre des « assistants de preuves », des logiciels spécialisés que les mathématiciens utilisent pour écrire pas à pas toutes les étapes d'une démonstration, sans en oublier aucune (oubli qui est possible quand la preuve est menée par un humain en utilisant de nombreux raccourcis).

La preuve complète mise au point est vérifiée par une procédure indépendante et très pointilleuse ; éventuellement, cette vérification est confiée à plusieurs autres logiciels de contrôle. Les logiciels de contrôle peuvent eux-mêmes avoir été soumis à des contrôles très stricts « prouvant » leur bon fonctionnement. On parvient ainsi à une certitude quasi parfaite qu'une preuve est correcte.

a

Parmi les théorèmes soumis à cette vérification par la méthode des assistants de preuves, deux ont retenu particulièrement l'attention. L'un est le théorème des quatre couleurs, qui indique que « toute carte peut être coloriée avec quatre couleurs sans que deux pays voisins soient colorés de la même façon » *(a)* ; il a été démontré en 1976 et vérifié formellement en 2005 par une équipe de l'Inria.

L'autre est le théorème de Thomas Hales qui résout la conjecture de Kepler sur l'empilement le plus dense des

b

sphères *(b)*, démontré en 1998 et formellement vérifié par T. Hales et son équipe en 2014.

Malheureusement, dans le cas du résultat de Gary McGuire sur le sudoku, la méthode des assistants de preuve ne pourra sans doute pas s'appliquer avant longtemps : le calcul effectué est énorme et, à moins d'avancées mathématiques nouvelles, une preuve formelle ne pourra que refaire le calcul dans un cadre plus rigoureux pour éviter les erreurs, ce qui demande encore plus de calculs, chose impossible à envisager aujourd'hui.

La méthode de résolution se décompose en trois étapes : (A) énumérer toutes les grilles complètes de sudoku ; (B) pour chacune, considérer toutes les façons d'en extraire 16 données ; et (C) pour chaque jeu de 16 données ainsi extrait, faire fonctionner une méthode de résolution de manière à trouver au moins deux solutions différentes.

Si toutes les grilles complètes passent ce test, alors on aura démontré que 16 données ne sont jamais suffisantes et que 17 est donc la bonne réponse. Le faire brutalement comme je viens de le décrire demanderait des siècles de calcul.

Trois remarques économisent du temps de calcul et, bien employées, donnent une durée de calcul raisonnable.

Point (A) : limiter l'énumération des grilles complètes qu'on fait dérouler.

Point (B) : trouver des méthodes évitant d'énumérer tous les sous-ensembles de 16 éléments d'un ensemble de 81 éléments, car il y en a trop !

Point (C) : disposer d'un algorithme de test le plus efficace possible pour tester si une grille partielle est un problème correct.

Un catalogue intelligent et complet des grilles

Remarquons qu'on aurait pu procéder autrement : (A') énumérer toutes les grilles partielles possibles de 16 données, puis (B') montrer que chacune a plusieurs solutions. Toutefois, la théorie des « ensembles inévitables », qui permet de réduire considérablement les calculs de (B) (expliquée plus loin), rend la méthode en trois étapes (A-B-C) plus efficace que la méthode en deux étapes (A'-B').

Le nombre de grilles complètes différentes semble avoir été connu par Mark Brader dès 2003, mais c'est en 2006 qu'un document de Bertram Felgenhauer et Frazer Jarvis l'a justifié. Ce nombre est énorme et égal à $9! \times 2^{13} \times 3^4 \times 27\,704\,267\,971 = 6\,670\,903\,752\,021\,072\,936\,960 = 6{,}6\ldots \times 10^{21}$.

C'est, en ordre de grandeur, la mémoire cumulée numérique de tous les dispositifs informatiques (téléphones compris), et ces dispositifs opèrent tous ensemble environ 10^{21} instructions par seconde. Ces chiffres sont imprécis, en particulier parce qu'on ne peut pas savoir quelles machines ont cessé de fonctionner, mais à un facteur 10 près, ils indiquent où nous en sommes.

Traiter une grille de sudoku pour savoir si elle possède des sous-grilles correctes à 16 données est un gros travail. Procéder

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

naïvement, même en mettant tous les dispositifs de calcul terrestres à la tâche, n'aurait même pas permis de résoudre le problème. Réduire le nombre de grilles à étudier est le premier point où les mathématiques ont aidé l'équipe de G. McGuire.

Si, dans une grille complète de sudoku, on change tous les 1 en 9 et tous les 9 en 1, on obtient une autre grille complète de sudoku. Si la première admet des problèmes corrects à 16 données, c'est aussi le cas de la seconde : partant d'un problème correct pour la première, on change les 1 en 9 et les 9 en 1, et on obtient un problème correct pour la seconde. Il suffit donc d'étudier l'une des deux. L'échange des 1 et des 9 n'est pas la seule transformation qui conduit à trouver des grilles équivalentes. En fait, toute permutation des neuf chiffres 1, 2,..., 9 permet, à partir d'une grille complète, d'en construire une autre équivalente pour notre problème. Pour chaque grille, ce procédé donne $9! = 9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 =$ 362 880 grilles équivalentes. Voilà déjà une belle réduction du calcul à entreprendre.

Cependant, la permutation des chiffres n'est pas la seule façon d'obtenir des grilles équivalentes. Voici la liste de quelques autres opérations qui, appliquées à une grille complète, donnent des grilles équivalentes.

– Choisir deux bandes horizontales et les échanger. Une bande horizontale est une série de trois carrés 3×3 placés les uns à côtés des autres (il y en a trois : une en haut, une au milieu, une en bas).

– Échanger deux bandes verticales. Une bande verticale est une série de trois carrés 3×3 placés les uns au-dessus des autres (il y en a trois : une à droite, une au centre, une à gauche).

– Échanger deux colonnes d'une même bande verticale.

– Échanger deux lignes d'une même bande horizontale.

– Transposer la grille (la ligne 1 devient la colonne 1, la ligne 2 devient la colonne 2, etc.).

Finalement, une grille est équivalente à un très grand nombre d'autres. Les grilles se regroupent en classes et il suffit de traiter une grille de chacune des classes.

9	3	7	8	5	6	2	4	1
5	6	2	1	9	4	3	8	7
4	8	1	2	7	3	5	6	9
8	2	3	6	4	7	9	1	5
6	1	5	9	3	2	4	7	8
7	4	9	5	8	1	6	2	3
3	7	8	4	6	9	1	5	2
1	9	6	7	2	5	8	3	4
2	5	4	3	1	8	7	9	6

DEUX « ENSEMBLES INÉVITABLES » sont indiqués *(en bleu et en orange)* dans cette grille. Chacun nécessite une donnée au moins pour que la solution au sudoku soit unique.

L'utilisation d'outils de la théorie des groupes, dont le lemme de Burnside *(voir Le miraculeux « lemme de Burnside » dans la rubrique de décembre 2006)*, a permis de connaître le nombre exact de grilles complètes non équivalentes : il y en a $5\,472\,730\,538 \approx 5{,}5 \times 10^9$.

Glenn Fowler, chercheur aux Laboratoires AT&T, a constitué un catalogue complet des grilles en ne retenant qu'une seule grille par classe d'équivalence. Un algorithme de compression spécialement conçu pour les grilles de sudoku a permis de stocker tout le catalogue de G. Fowler sur six gigaoctets, ce qui est assez remarquable puisque cet algorithme permet de n'utiliser qu'un octet (8 bits) environ par grille.

Chercher les « ensembles inévitables »

Si l'on s'y prend sans finesse, pour chacune des grilles retenues, il faut envisager toutes les façons d'extraire 16 données. Or il y a $33\,594\,090\,947\,249\,085 \approx 3{,}4 \times 10^{16}$ façons de choisir 16 cases parmi 81. Cela conduirait à résoudre un grand nombre de problèmes de sudoku pour découvrir à chaque fois qu'il y a deux solutions ou plus. Ce nombre serait énorme, car égal à : $5\,472\,730\,538 \times 33\,594\,090\,947\,249\,085 = 183\,851\,407\,423\,359\,414\,572\,057\,730 \approx 1{,}8 \times 10^{26}$.

Nous savons que ce nombre est bien au-delà de ce qui est envisageable, même en utilisant toute la puissance de calcul disponible sur la planète. Les mathématiques à nouveau ont dû proposer une idée intéressante qui s'applique à d'autres problèmes, la « méthode des ensembles inévitables ». Expliquons cette idée sur l'exemple de la grille complète G ci-contre.

Pour construire un problème correct ayant pour solution cette grille G, il faut que l'une des données du problème soit l'une des quatre cases en bleu, en haut de la grille. En effet, il existe une autre grille complète G' très proche de G obtenue en échangeant seulement, dans les quatre cases en bleu, les 9 et les 5. Si les données de la grille partielle n'indiquent rien concernant ces quatre cases, il sera impossible

L'histoire de la conjecture

L'étude du problème du sudoku minimal par Gary McGuire et son équipe a commencé en 2005, par la mise au point d'un premier programme recherchant, pour une grille complète fixée, toutes les sous-grilles partielles correctes.

Cependant, c'est seulement en 2009, voyant que la solution du problème était peut-être atteignable, que G. McGuire et ses collègues ont entrepris des travaux systématiques. En effet, Gordon Royle avait à cette époque réuni une collection importante de problèmes corrects différents à 17 données. Il recherchait en même temps, mais en vain, un problème ne demandant que 16 données. Cette situation rendait plausible la conjecture que 16 données ne suffisent jamais. Une étonnante grille ayant 29 sous-grilles correctes à 17 données attira l'attention *(ci-dessous)*. On ne connaît aujourd'hui encore aucune grille complète ayant 30 sous-grilles correctes à 17 données. Encouragé par ce grand nombre de sous-grilles correctes à 17 données, on espéra un moment en extraire une sous-grille correcte à 16 données. En vain, ce qui fut considéré comme un indice de plus en faveur de la conjecture.

Avant d'en arriver au résultat que 16 données sont insuffisantes, un calcul mené par une équipe de l'Université de Graz en Autriche montra, en 2008, que 11 ne suffisent pas. Le calcul entrepris par cette équipe pour montrer que 12 ne suffisent pas fut abandonné sans aboutir. On était donc loin du but. Rappelons toutefois que le raisonnement mathématique pur ne réussit pas mieux que 7 *(voir l'encadré page 77)* ; la démonstration par ordinateur était donc déjà en avance.

En 2008, une jeune fille de 17 ans proposa une preuve mathématique que 16 données sont insuffisantes, mais on découvrit rapidement une erreur dans son raisonnement, que personne n'a su corriger.

En 2010, une équipe de l'Université Chiao Tung à Taïwan entreprit de s'attaquer au problème des 16 données en utilisant une méthode de calcul distribué. Elle évalua alors qu'avec les outils dont elle disposait, le problème serait résolu en menant un calcul de 2 400 années-processeurs, par exemple, en faisant calculer 2 400 ordinateurs de table chacun pendant un an. Le calcul a abouti en septembre 2013 (après celui de G. McGuire). C'est la seule vérification à ce jour du théorème des 16 données.

Le calcul de G. McGuire et de son équipe se déroula sur toute l'année 2011, opérant l'équivalent de 800 années-processeurs de calculs. Pour chaque grille de sudoku complète, le temps de traitement a été enregistré. Il a fallu en moyenne 3,6 secondes par grille. L'article rendant compte du résultat a été publié en 2014.

6	3	9	2	4	1	7	8	5
2	8	4	7	6	5	1	9	3
5	1	7	9	8	3	6	2	4
1	2	3	8	5	7	9	4	6
7	9	6	4	3	2	8	5	1
4	5	8	6	1	9	2	3	7
3	4	2	1	7	8	5	6	9
8	6	1	5	9	4	3	7	2
9	7	5	3	2	6	4	1	8

LE MATHÉMATICIEN GARY MCGUIRE *(ci-dessus)* **et un sudoku ayant 29 sous-grilles correctes à 17 données** *(ci-contre)*.

de savoir si la solution est G ou G', et donc le problème sera incorrect. Il en va de même avec les six cases en orangé : permuter les deux rectangles de trois données (7, 2, 1) et (1, 7, 2) donne une grille G" qui n'est exclue que si l'on spécifie au moins une des six cases.

De tels ensembles se dénomment des *ensembles inévitables*. Si, pour une grille complète G, on en trouve k, et qu'ils sont disjoints, alors on est certain que toute grille partielle conduisant à G comportera au moins une donnée dans chaque ensemble inévitable et donc en comportera au moins k. Lorsque certains ensembles inévitables ont une intersection commune, la situation, un peu plus difficile, impose tout de même un nombre minimum de données à toute grille partielle conduisant à G.

La lutte finale

Le travail pour traiter une grille complète G et montrer qu'il faut toujours au moins 17 données se ramène alors à la recherche et à l'exploitation d'ensembles inévitables aussi nombreux que possible. Après divers essais, les chercheurs ont adopté la stratégie suivante, qui a été appliquée à chacune des 5,5 milliards de grilles complètes du catalogue de G. Fowler.

(a) Déterminer (en mettant au point les algorithmes nécessaires) tous les ensembles inévitables de moins de 13 cases. Trouver tous les ensembles inévitables sans limitation de taille, ce qui *a priori* semble meilleur, conduit à plus de calculs au total.

(b) En déduire (toujours en mettant soigneusement au point les algorithmes nécessaires) toutes les sous-grilles de 16 données convenables pour cette famille d'ensembles inévitables, c'est-à-dire ayant au moins un élément dans chaque ensemble inévitable. Cette partie retient considérablement moins de grilles partielles à 16 éléments que les $3{,}4 \times 10^{16}$ grilles partielles *a priori* envisageables. En moyenne, une grille complète de sudoku a 360 ensembles inévitables de moins de 13 cases.

(c) Pour les grilles partielles retenues, utiliser un programme de test qui indique si oui ou non il y a une solution unique.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

Pour mettre tout cela en place et le programmer aussi efficacement que possible, il a fallu développer quelques résultats mathématiques sur les ensembles inévitables, et surtout être soigneux dans la programmation des algorithmes.

Cette qualité des programmes de l'équipe de G. McGuire a permis de gagner la compétition engagée avec une équipe chinoise (parvenue au même résultat, mais plus d'un an après). Le calcul des Chinois n'a cependant pas été vain, puisqu'en aboutissant au même résultat, il appuie l'affirmation que 17 est bien le nombre minimum de données d'une grille partielle correcte de sudoku.

La partie finale de la méthode exige l'utilisation d'un programme pour résoudre les sudokus, programme qui doit être capable d'indiquer qu'une grille partielle est incorrecte car elle autorise plusieurs solutions.

Là encore, le partage gratuit de programmes entre chercheurs a été utile. Plutôt que de développer leur propre programme de résolution de sudokus, l'équipe a préféré rechercher le meilleur de ceux déjà développés. Leur choix s'est porté sur un programme *open-source* (donc libre d'utilisation, contrôlable et modifiable) dû à Brian Turner, un ingénieur de *Google* qui développe des logiciels de jeux pour son plaisir. Ce programme rapide a cependant été encore accéléré et peut tester en une seconde 50 000 problèmes à 16 données.

Une fois tous les éléments en place et vérifiés, l'exploration du catalogue à la recherche d'une grille partielle à 16 données a été engagée. Après un an de calcul, la réponse est arrivée : il n'en existe pas !

Définitivement résolu ?

Ce formidable travail collectif et informatique pour réussir à démontrer « Le théorème du sudoku » pose cependant un problème : peut-on faire confiance à ce calcul fondé sur une série de programmes délicats fonctionnant une année entière sur des centaines de processeurs différents, et qui n'a été vérifié qu'une fois depuis par une méthode assez proche ?

Le point qui rend difficile une certitude absolue est dû à la nature du calcul, qui n'est que la recherche infructueuse d'une grille correcte à 16 données. Lorsqu'un ordinateur trouve une solution à un problème et que cette solution est contrôlable par une autre méthode plus rapide que la phase de recherche (comme dans la chasse aux grands nombres premiers), on a peu de raisons de douter de l'exactitude de la solution trouvée. Le premier programme peut comporter des erreurs ou dysfonctionner à cause d'un bug interne ou dans le système d'exploitation, il se peut aussi que le programme oublie une partie du calcul que les programmeurs prévoyaient, etc. Rien de tout cela n'est grave si, à l'issue du calcul, on propose quelque chose de rapidement et indépendamment contrôlable par d'autres programmes ; on se moquera de la phase préliminaire éventuellement très longue et qui n'a plus d'importance pour l'affirmation mathématique.

Ici, la situation est opposée : le programme a recherché quelque chose pendant un an et n'a rien trouvé, et il faut être certain que rien n'a été oublié. Il faut donc être certain que les idées mathématiques sont chacune parfaitement maîtrisées et mises en place, que les programmes ont été écrits sans la moindre erreur, qu'il n'y a pas de bug dans le système d'exploitation de la machine (qui aurait pu faire sauter l'exécution d'une partie des instructions) et qu'à chaque instant le calcul a bien été mené comme il devait l'être sans être perturbé par une panne de disque dur ou par un rayon cosmique. Les craintes sont compréhensibles.

Seule la poursuite du travail sur le sujet, la mise au point de nouvelles méthodes, mathématiques ou techniques, conduisant à d'autres confirmations (si possible plus rapides et avec des programmes indépendants) fournira la certitude attendue. Un assistant de preuve *(voir l'encadré page 78)* ne serait guère utile, car il est à parier qu'il serait beaucoup trop lent (valider les calculs oblige ici à les refaire, même pour l'assistant de preuve). L'ordinateur est utile, mais restons conscients des erreurs possibles dans les preuves informatiques de non-existence, qui ne doivent pas être considérées avec le même œil que les preuves d'existence. ■

L'AUTEUR

J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

G. McGuire *et al.*, **There is no 16-clue sudoku : Solving the sudoku minimum number of clues problem *via* hitting set enumeration**, *Experimental Mathematics*, vol. 23(2), pp. 190-217, 2014.

J. Cooper et A. Kirkpatrick, **Critical sets for sudoku and general graph colorings**, *Discrete Mathematics*, vol. 315, pp. 112-119, 2014.

J. Rosenhouse et L. Taalman, **Taking Sudoku Seriously : The Math Behind the World's Most Popular Pencil Puzzle**, Oxford University Press, 2012.

H.-H. Lin et I-C. Wu, **An efficient approach to solving the minimum sudoku problem**, *ICGA Journal*, vol. 3, pp. 191-208, 2011.

Références supplémentaires sur le site www.pourlascience.fr

Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Respirer... comme un poisson dans l'eau

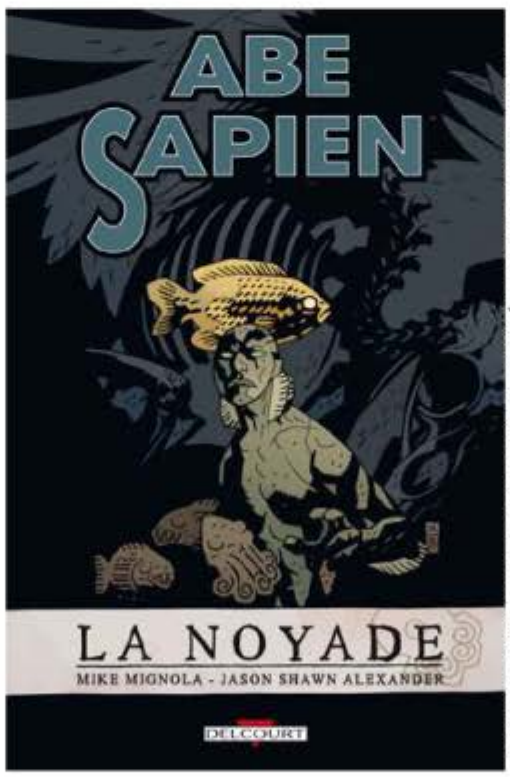
Les humains et leurs ancêtres ont perdu depuis longtemps la capacité de respirer dans l'eau. Mais pourrions-nous retourner vivre un jour en milieu aquatique ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Quel lien existe-t-il entre Mark Harris dans la série *L'homme de l'Atlantide*, le monstre du film *L'étrange créature du lac noir* (un des premiers films en 3D, de 1954) et les habitants natifs de la planète Aquablue de la bande dessinée éponyme ? Tous sont des humanoïdes imaginaires dotés de branchies ! Ces personnages incarnent le fantasme de pouvoir vivre et respirer librement dans l'eau, sorte de retour freudien dans le ventre de la mère. Mais si ces héros subaquatiques font rêver, que nous apprend la science sur les possibilités de respirer dans l'eau ?

Dans la nature, les branchies sont apparues plusieurs fois au cours de l'évolution et prennent différentes formes. On les retrouve chez les vertébrés (certains « poissons », les amphibiens à l'état larvaire) ou les invertébrés (vers, crustacés, échinodermes...). Elles dérivent de tissus divers (parois du pharynx, replis de la trachée, etc.) et sont surtout utilisées comme organes respiratoires en milieu aquatique mais peuvent aussi servir, comme chez la moule, à piéger la nourriture.

Quelle que soit leur origine, les branchies prennent la forme de replis, de lamelles et autres filaments tapissés de membranes très vascularisées. Grâce à leur importante surface de contact avec le milieu externe, ces formes optimisent les échanges gazeux : le dioxygène dissous dans l'eau passe dans le sang et le dioxyde de carbone est évacué.



Abe Sapien © & ™ 2014 Mike Mignola - Tous droits réservés. © 2014 Éditions Delcourt pour la version française

ABE SAPIEN RESPIRE SOUS L'EAU grâce à des branchies externes. Ce personnage fictif est tiré de l'univers du comics *Hellboy*.

Les branchies se comportent donc dans l'eau un peu comme les poumons dans l'air, à la différence notable que l'eau est un fluide 60 fois plus visqueux et 800 fois plus dense que l'air, avec une concentration en dioxygène bien inférieure ! Ainsi, pour absorber un litre de dioxygène, les branchies doivent brasser un volume 12 à 20 fois plus important dans l'eau que les poumons dans l'air.

En outre, les poumons, ces sacs qui doivent être dégonflés pour être réactivés, sont inadaptés dans l'eau. Il faudrait trop de travail pour brasser des volumes suffisants d'eau. Mais ce n'est pas vrai pour tous les liquides.

Dans le film *Abyss* (James Cameron, 1989), Lindsey Bringman doit plonger à plusieurs milliers de mètres de profondeur. Pour ce faire, elle remplit son scaphandre d'un fluide respiratoire qui existe vraiment : le perfluorocarbure, un liquide capable de dissoudre 15 fois plus de dioxygène que l'eau. Ce composé est actuellement à l'étude pour traiter les défaillances respiratoires aiguës – on parle de ventilation liquidienne partielle ou totale. D'ailleurs, la scène où l'héroïne du film teste ce fluide sur un rat a été réalisée sans trucage – ce qui a déclenché l'ire des associations de protection des animaux et a conduit à censurer la scène au Royaume-Uni, le rongeur paniquant à l'idée de se noyer.

Mais plutôt que de forcer notre corps à respirer des liquides riches en dioxygène,

© 2015 Marc Boutavy, marcboutavy.fr, cossima-productions.com

COMMENT RESPIRER SOUS L'EAU ? Grâce à des branchies situées à la base du cou. Cette « sirène » rappelle l'axolotl, salamandre cavernicole qui conserve des traits larvaires, dont des branchies externes.

ne pourrions-nous pas, comme d'autres personnages de science-fiction, respirer dans l'eau à l'aide de branchies ? L'idée n'est pas totalement absurde : l'embryon humain présente, à la quatrième et à la cinquième semaine, des arcs branchiaux qui donneraient des poches et des fentes branchiales. Ces fentes avaient déjà été observées par les embryologistes du XIXe siècle, qui y voyaient une trace d'un ancien stade « poisson ». Hélas, ces arcs branchiaux se résorbent au cours de l'embryogenèse.

Suffirait-il alors d'inhiber le gène à l'origine de cette régression pour conserver les branchies ? C'est loin d'être aussi simple. Une cascade complexe de gènes, et non un gène unique, intervient dans le processus : modifier un élément chamboulerait l'ensemble de la chaîne... Si certains états de caractères morphologiques sont réversibles au cours de l'évolution, ce n'est pas le cas de complexes anatomiques entiers.

Pour disposer de branchies, il nous faudrait plutôt retarder une partie de notre développement, ce qui nous permettrait peut-être de conserver nos fentes branchiales embryonnaires tout en atteignant la maturité. Ce phénomène nommé néoténie est fréquent chez les amphibiens : l'exemple le plus connu est l'axolotl, une salamandre cavernicole et aquatique qui ne se métamorphose pas et conserve de belles branchies externes présentes dès son stade larvaire.

Cependant, le port de branchies n'est pas sans inconvénient non plus : lorsqu'il n'est pas dans son bassin, Abe Sapien, l'homme-poisson bleu dans la série de comics *Hellboy* de Mike Mignola, doit se promener à l'air libre avec une imposante combinaison munie de capsules d'eau au niveau du cou pour ne pas mourir asphyxié. Mark Harris, lui, commence à suffoquer après seulement quelques heures passées à l'air libre...

Une solution serait alors d'être muni à la fois de branchies et de poumons, comme cela s'est déjà produit au cours de l'évolution : si beaucoup d'amphibiens, au cours de leur développement, respirent par des branchies puis par des poumons, les polyptères et les dipneustes sont deux groupes de « poissons » qui jouissent des deux systèmes à la fois !

Une symbiose avec une algue

Comment pourrions-nous alors respirer un jour sous l'eau ? Regardons du côté du héros de *Harry Potter et la coupe de feu* (roman de J. K. Rowling adapté à l'écran en 2005) qui, en avalant simplement une algue magique, se voit pousser des branchies, mais aussi des pieds et des mains palmés.

Certes, la magie défie ici toute logique, mais il semble que chez certaines espèces, l'interaction avec certaines algues aide réellement à respirer sous l'eau : Ryan Kerney, du *Gettysburg College* aux États-Unis, et ses collègues ont montré que des algues vertes *(Oophila amblystomatis)* vivent en symbiose dans des œufs et des embryons de salamandres maculées *(Ambystoma maculatum)* en cours de développement. On parle ici d'endosymbiose, la première observée entre des algues et des vertébrés ! Ces algues, qui colonisent les tissus et cellules des amphibiens avant que leur système immunitaire ne se forme et ne les rejette, se transmettraient même sous forme de kystes de génération en génération. Elles aident l'embryon à fixer l'oxygène (ce qu'il effectue déjà par la peau) et, en retour, se nourrissent de ses déchets riches en azote. Vivre en symbiose avec des algues serait-il donc la solution ?

Le fantasme de l'homme ou de la femme-poisson ne date pas d'hier. Dans l'Antiquité, le grand voyageur et géographe Pausanias imaginait le dieu Triton de la mythologie grecque comme un monstre subaquatique : « À la place de ses oreilles, il a des branchies et le nez d'un homme, mais la bouche est plus large et les dents sont celles d'une bête. » Ne désespérons pas. Un jour peut-être, nous écrirons ces lignes et vous les lirez... comme un poisson dans l'eau ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

Claude à la plage

Des astronomes détectives ont reconstitué les faits et gestes de Claude Monet l'après-midi du 5 février 1883 : il était sur la plage d'Étretat et peignait Coucher de soleil à Étretat.

Loïc MANGIN

Que faisait Claude Monet le 13 novembre 1872, vers 7 h 35 du matin ? Il peignait *Impression, soleil levant*, la toile qui allait donner son nom au mouvement impressionniste. L'artiste était installé au Havre, à la fenêtre de sa chambre à l'Hôtel de l'Amirauté, face au port. Il a par ailleurs beaucoup visité la Normandie et notamment la région d'Étretat où il a séjourné au moins à sept reprises de 1864 à 1886 : au total, on lui connaît près de 80 œuvres exécutées dans les environs de la station balnéaire.

En janvier 1883, Monet y passe trois semaines durant lesquelles il peint 19 toiles où, bien sûr, figurent en bonne place les célèbres falaises sculptées en une arche et une aiguille. *Coucher de soleil à Étretat (voir la représentation page ci-contre)* est l'une de ses œuvres les plus connues. Elle est aujourd'hui conservée au Musée d'art de Caroline du Nord, à Raleigh, aux États-Unis. De quel endroit a-t-elle été peinte ? À quel moment ?

Donald Olson de la *Texas State University*, à San Marcos, aux États-Unis, et ses collègues ont répondu. Ils se sont d'ailleurs fait une spécialité de ce genre d'interrogations, puisque c'est à eux que l'on doit de savoir précisément quand et où a été peinte *Impression, soleil levant*. Ils se sont également intéressés à d'autres œuvres de Monet, mais aussi de Vincent van Gogh et d'Edvard Munch.

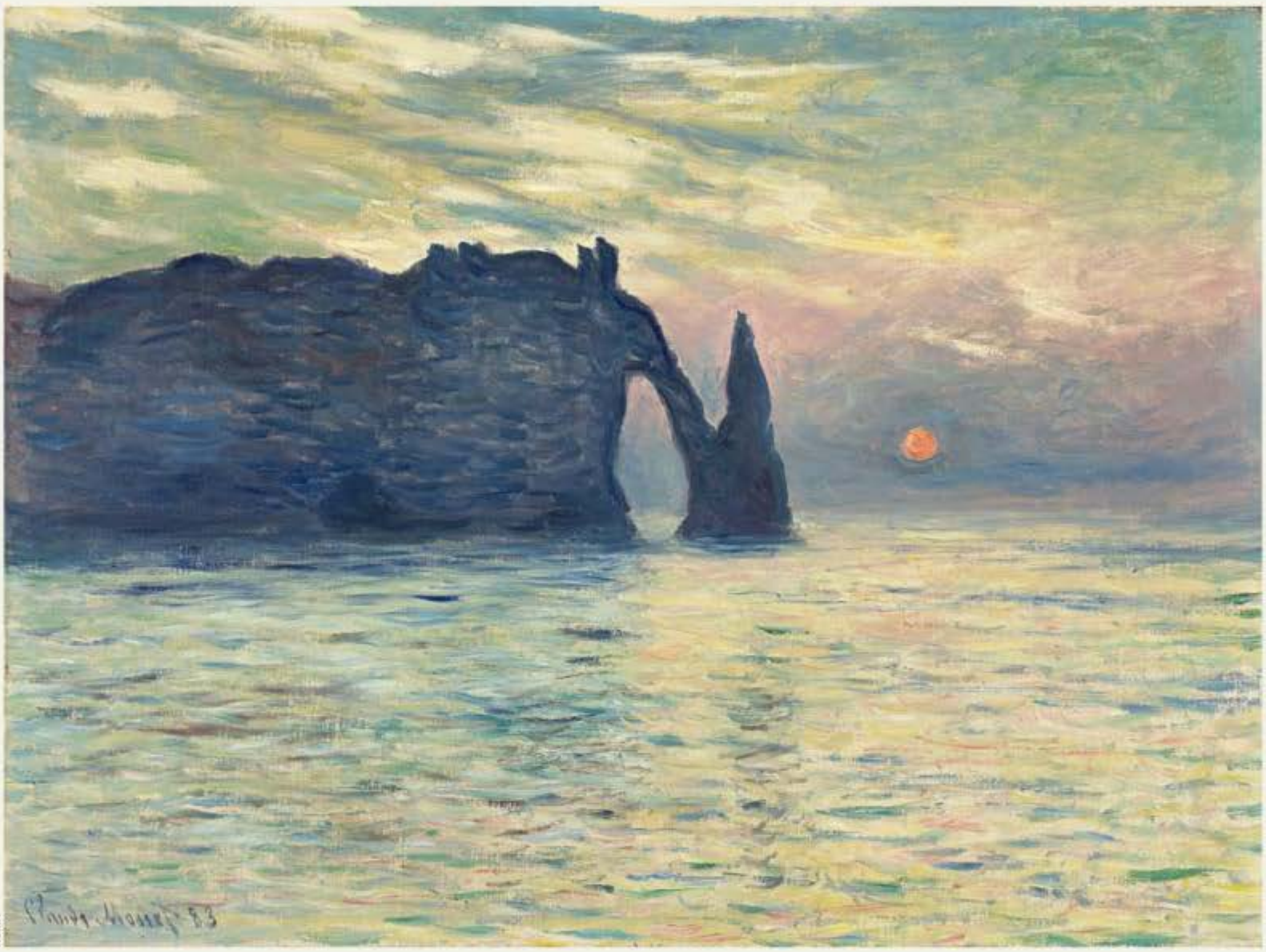
Claude Monet s'est installé sur la plage d'Étretat, à l'endroit du point jaune, pour peindre *Coucher de Soleil à Étretat*, en février 1883.

Coucher de soleil à Étretat montre un soleil un peu au-dessus de la mer, près de la porte d'Aval (l'arche en calcaire) et l'Aiguille *(voir la carte ci-dessous)*. La ligne d'horizon est visible à travers la porte tandis que les deux formations rocheuses se superposent. Selon l'historien d'art Robert Herbert, Monet s'était installé à l'extrémité Nord de la plage d'Étretat, tout près d'une autre arche, plus petite, nommée porte d'Amont.

Pour le vérifier, D. Olson et son équipe se sont rendus sur place en août 2012. Très vite, à mesure qu'ils arpentaient la plage avec des reproductions sur carte postale des peintures de Monet, les « détectives » ont compris que l'historien s'était trompé : de l'endroit qu'il proposait, l'Aiguille se détache de la porte d'Aval, à l'inverse de ce que l'on observe sur la toile. En parcourant la plage d'une extrémité à l'autre, ils ont localisé un point plus vraisemblable au regard de l'œuvre *(le point jaune sur la carte)*. Ses coordonnées sont 49,7112 degrés Nord et 0,2044 degré Est. Lors de votre prochain séjour à Étretat, avec un GPS, vous pourrez vous mettre à la place du peintre.

La question de l'endroit étant réglée, restait à déterminer la date et l'heure. Pour ce faire, les Américains ont utilisé plusieurs séries de photographies, dont certaines ont été prises par Jean Langlois, un membre de la Société astronomique du Havre. Il est venu plusieurs fois en février et a multiplié les points de vue sur la plage d'Étretat pour prendre ses clichés. L'analyse de ces

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015



MOMA

images a révélé que, pour correspondre à celui représenté, le soleil devait avoir une déclinaison de –16°. La déclinaison d'un astre est l'équivalent de la latitude terrestre projetée sur la sphère céleste. Un programme informatique en a déduit que *Coucher de soleil à Étretat* a été peint le 5 février 1883, avec une incertitude d'environ deux jours. Cinq jours restaient donc en lice, du 3 au 7.

Affiner la datation a nécessité de reconstituer les marées de cette époque et de les faire coïncider avec le niveau de la mer peint par Monet. Des relevés météorologiques ont aussi été précieux, ainsi que la correspondance de l'artiste.

Une lettre nous apprend que le 3 février, il arpentait la plage de Jambourg, de l'autre côté de la porte d'Aval. Une autre missive indique qu'il passa la journée du 4 février avec son frère. Il se promet d'ailleurs une dure journée de travail le lendemain. Les 6 et 7 février peuvent aussi être écartés en raison de la météo et des marées. Le 5 février s'impose donc.

L'heure exacte fut déterminée grâce à la mesure de la hauteur de l'aiguille (quasi inchangée depuis un siècle), qui permet de rendre compte de la hauteur du Soleil dans le ciel. Partant, quelques calculs donnent enfin la réponse : Monet a peint *Coucher de soleil à Étretat* le 5 février 1883, à 16 h 53. Le mois prochain, n'hésitez pas à aller vérifier sur place, avec une reproduction du tableau dans la main. ■

D. W. Olson *et al.*, **Dating an impressionist's sunset**, *Sky and Telescope*, pp. 34-41, février 2014.

La position du Soleil dans le ciel et la hauteur de la marée dans *Coucher de soleil à Étretat*, de Claude Monet, ont aidé à dater l'œuvre : elle a été peinte le 5 février 1883, peu avant 17 heures.

IDÉES DE PHYSIQUE

L'œuf dur et la toupie-bascule

Un œuf dur que l'on fait tourner rapidement se redresse spontanément. Un phénomène étonnant, où le frottement se conjugue à des effets gyroscopiques.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment distinguer un œuf dur d'un œuf cru ? Facile ! Posez votre œuf sur la table et faites-le tourner à grande vitesse autour de lui-même. Vous constaterez que l'œuf cru poursuivra sa rotation « à plat », tandis que l'œuf dur se dressera spontanément sur l'une de ses extrémités. Ce comportement est apparenté à celui de la toupie tippe-top, popularisée au début des années 1950 et constituée d'une tige emmanchée sur une calotte sphérique : une fois lancée, cette toupie finit par se renverser et par tourner sur son manche ! Le redressement est contre-intuitif, car le centre de gravité de la toupie s'élève. Comment l'expliquer ?

■ **LES AUTEURS**

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : http://blog.idphys.fr

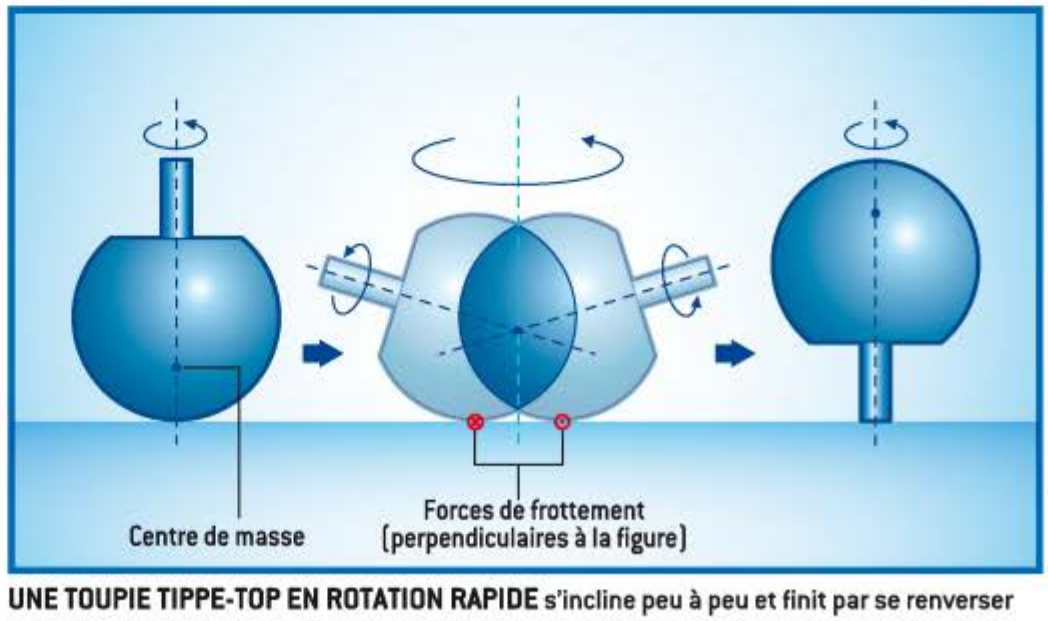
Frottements redresseurs

Immobile, reposant sur son ventre sphérique et sa petite tige pointant vers le haut, la toupie tippe-top paraît banale. À l'époque de sa diffusion, elle a pourtant attiré l'attention des physiciens, et non des moindres : une photographie célèbre montre ainsi Wolfgang Pauli et Niels Bohr, des lauréats du Nobel, penchés sur la toupie et en pleine interrogation.

Pour comprendre le retournement inattendu et l'élévation du centre de masse, les physiciens se sont rapidement mis d'accord sur le rôle essentiel des frottements entre la toupie et le sol. Un bilan d'énergie va nous en convaincre.

Initialement, la tippe-top repose à l'équilibre sur sa base, le centre de masse étant au plus bas. Dans cette position, on lui imprime une rotation rapide autour de son axe de symétrie *(voir la figure ci-dessous)*. La toupie se retourne et son centre de masse se retrouve au plus haut, la rotation s'effectuant à nouveau autour de l'axe de symétrie. Puisque le centre de masse s'est élevé, l'énergie potentielle de la toupie a augmenté ; et comme aucune énergie n'a été fournie, la hausse de l'énergie potentielle ne peut se faire qu'au détriment de l'énergie cinétique de rotation.

La vitesse de rotation de la toupie a ainsi diminué, ce qui a nécessité l'action d'un couple. Lequel ? Ce couple ne peut provenir du poids, qui est vertical, donc perpendiculaire à la direction de rotation ; le coupable est donc



Dessins de Bruno Vacaro

UNE TOUPIE TIPPE-TOP EN ROTATION RAPIDE s'incline peu à peu et finit par se renverser pour tourner sur sa tige. Au cours de ce processus, la hauteur du centre de masse de la toupie augmente. Dans la phase intermédiaire, l'objet donne l'impression de flotter au-dessus du support, car le volume commun aux positions successives de la toupie au cours de son mouvement est légèrement surélevé par rapport au support.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

la composante horizontale de la réaction du support, qui comprend la force de frottement. Cette dernière à la fois ralentit la rotation et crée un « couplage », une dépendance, entre la rotation propre de la toupie et la rotation à l'origine du redressement.

Pour comprendre ce couplage, observons une tippe-top en fin de redressement, quand elle tourne sur sa tige. Elle se comporte alors comme une toupie ordinaire qui, initialement inclinée, se redresse peu à peu vers la verticale. Pourquoi se redresse-t-elle ? Le mouvement d'une toupie inclinée est la combinaison d'une rotation rapide autour de l'axe de symétrie (la rotation propre de la toupie), et d'un lent mouvement de rotation de cet axe autour de l'axe vertical, la précession *(voir la figure ci-contre)*. On montre que ce dernier engendre un couple dit gyroscopique, qui compense le couple dû au poids et empêche la toupie de tomber *(voir Batailles de toupies, Pour la Science de décembre 2014)*.

Or lorsque la pointe de la toupie est sphérique ou cylindrique, son point de contact avec le support est animé d'une certaine vitesse en raison de la rotation propre de la toupie. Il en résulte une force de frottement qui ralentit la rotation propre et, ce qui est beaucoup moins évident, accélère la précession. À cause du couple gyroscopique, on montre que l'effet de cette force est un redressement de l'axe de la toupie vers la verticale.

Couplage entre rotation propre et précession

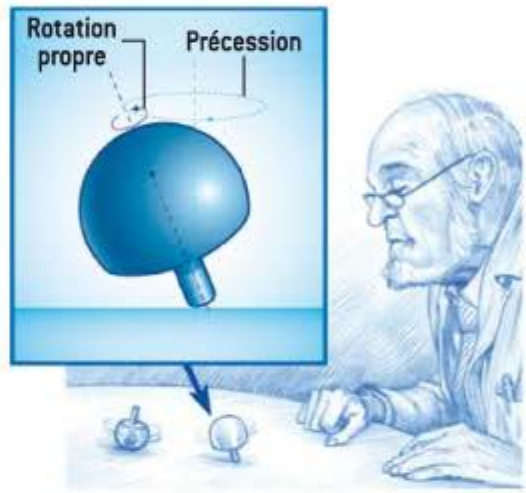
Que peut-on en déduire pour la tippe-top ? Comme avec la toupie ordinaire, le frottement de la tippe-top avec le support crée un couplage entre la rotation propre et le mouvement de précession, et le couple gyroscopique associé à cet effet entraîne un basculement de l'axe vers la verticale.

Cependant, la tippe-top ne se comporte comme une toupie ordinaire qu'après s'être redressée. Détaillons les conséquences du frottement durant la phase précédente, lorsque la tippe-top repose encore sur sa partie sphérique. L'observation et des simulations numériques indiquent que le couplage entre rotation propre et précession est si fort que l'essentiel de la rotation propre est converti en précession autour de la verticale. De plus, à cause de la faible courbure au point de contact et de la rotation autour du centre de masse, ce couplage induit une précession en sens inverse de ce qui se passe avec la toupie classique ; il a donc un effet déstabilisant : l'axe de rotation s'incline de plus en plus.

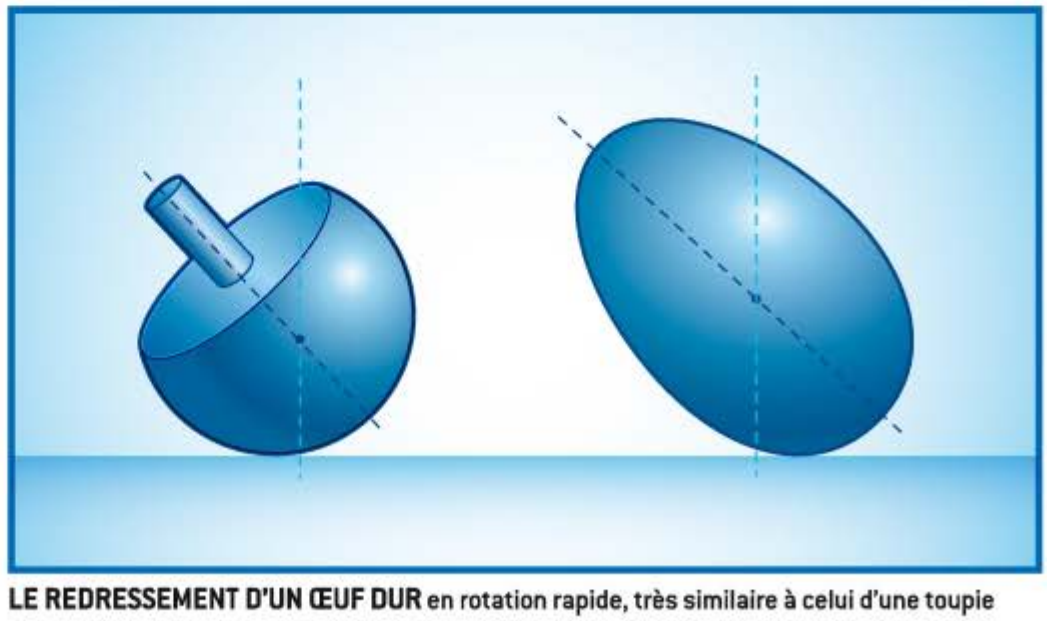
Ensuite, pendant que la toupie s'incline, la rotation propre décroît, s'annule lorsque la toupie est horizontale et repart en sens inverse lors du redressement : le sens de la rotation propre par rapport à l'axe de symétrie de la toupie s'est inversé.

Malgré le caractère dissipatif du frottement, certaines grandeurs se conservent dans cette évolution. Ainsi, dans le cas général d'un solide en rotation rapide et présentant un axe de symétrie, le Britannique Keith Moffatt et le Japonais Yutaka Shimomura ont montré en 2002 que le produit de la vitesse angulaire de rotation du solide (par rapport à la verticale) par la hauteur du centre de gravité est une constante, dite de Jellet. Il s'ensuit que, comme le frottement freine la rotation, le centre de masse doit nécessairement s'élever.

Il faut enfin ajouter que, pour la tippe-top, il arrive un moment où, lorsqu'elle est suffisamment inclinée, la tige elle-même vient toucher le sol. On a alors non plus



LA PRÉCESSION est la rotation de l'axe de symétrie de la toupie autour de la verticale. Ce mouvement engendre un couple dit gyroscopique, qui conduit au redressement de la toupie tippe-top dans la seconde phase de son basculement.



LE REDRESSEMENT D'UN ŒUF DUR en rotation rapide, très similaire à celui d'une toupie tippe-top, peut s'expliquer par un calcul montrant que le produit de la vitesse angulaire de rotation autour de la verticale par la hauteur du centre de masse est approximativement une constante. Comme le frottement freine la rotation, le centre de masse doit alors s'élever pour que le produit reste inchangé.

une, mais deux forces de frottement, de même sens, qui tendent donc à incliner la toupie encore plus. En raison du caractère brutal de cet ajout, il est fréquent que la tippe-top bondisse sur sa tige.

Qu'en est-il pour l'œuf ? Comme pour la tippe-top, le détail des forces et des couples est très délicat à analyser, mais l'existence de la constante de Jellet permet de comprendre en partie le redressement.

Il y a toutefois des différences avec la toupie. D'abord, l'œuf part à plat. Par conséquent, au cours de son redressement, son moment d'inertie par rapport à la verticale (qui mesure la répartition des masses par rapport à l'axe de rotation) varie beaucoup. Malgré le frottement, surtout s'il est faible, sa rotation propre peut accélérer dans certaines phases, comme un patineur qui ramènerait ses bras le long de son corps. Par ailleurs, lorsque la rotation initiale est très rapide (1 600 tours par minute dans les expériences de Y. Shimomura !), les petites asymétries de l'œuf suffisent pour qu'il effectue des petits bonds, de l'ordre d'un dixième de millimètre.

Enfin, on peut s'interroger : pourquoi l'œuf cru ne se redresse-t-il pas ? La rotation de la coquille ne se communique que progressivement au liquide interne, comme lorsqu'on fait tourner une cuillère dans une casserole d'eau. Cependant, la viscosité du liquide est si élevée que la résistance à l'écoulement dissipe vite l'énergie de rotation, laquelle devient insuffisante pour faire monter l'œuf. En revanche, si on arrête brusquement l'œuf, l'œuf cru redémarrera un peu après avoir été relâché (au contraire de l'œuf dur), car son intérieur est, lui, resté en rotation. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

H. K. Moffatt et Y. Shimomura, **Spinning eggs – a paradox resolved**, *Nature*, vol. 416, pp. 385-386, 2002.

R. J. Cohen, **The tippe top revisited**, *American Journal of Physics*, vol. 45(1), pp. 12-17, 1977.

W. A. Pliskin, **The tippe top (topsy-turvy top)**, *American Journal of Physics*, vol. 22, pp. 28-32, 1954.

Retrouvez la rubrique Idées de physique sur www.pourlascience.fr

Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis 1996

maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr *

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

QUESTION AUX EXPERTS

Pourquoi l'IRM est-elle si bruyante ?

Le bruit résulte des vibrations des bobines conductrices servant à localiser l'origine des signaux IRM émis.

Cyril POUPON

© Levent Konuk/shutterstock.com

Si vous avez déjà passé un examen par IRM, vous avez entendu, quand vous étiez allongé dans l'appareil, une série de claquements. Ces sons sont graves pour une IRM anatomique, destinée à visualiser une partie du corps, et aigus pour une IRM fonctionnelle, qui visualise l'activité du cerveau. D'où provient ce bruit ?

L'IRM (imagerie par résonance magnétique) exploite les propriétés magnétiques des noyaux d'hydrogène de l'eau contenue dans les tissus biologiques. Au cours d'un examen, l'organe à explorer est plongé dans un champ magnétique intense (1,5 à 3 teslas, soit plus de 100 000 fois celui de la Terre). Ce champ magnétique statique (constant dans le temps) est créé à l'aide d'un électro-aimant, constitué d'une bobine de conducteur électrique plongée dans de l'hélium liquide. Ce bain, à une température de 4,2 kelvins (4,2 degrés au-dessus du zéro absolu), rend le matériau supraconducteur, c'est-à-dire annule sa résistance électrique (ce qui permet au courant, très intense, de circuler sans perte).

Les tissus mous contiennent une quantité importante d'eau (jusqu'à 80 % dans le cerveau), dont les molécules se comportent comme de petits aimants, nommés spins. Ceux-ci s'orientent dans la direction du champ magnétique statique lorsqu'ils sont placés au centre de l'électro-aimant. À leur état d'équilibre, les spins tournent autour de l'axe du champ (mouvement dit de précession) à une fréquence proportionnelle à l'amplitude de ce dernier. Grâce à une antenne placée autour de l'organe exploré, on émet alors une onde radio de même fréquence, qui agit sur les spins. Ceux-ci entrent en résonance avec l'onde radio (d'où le nom de cette modalité d'imagerie), ce qui se traduit par un basculement du spin par rapport au plan perpendiculaire au champ magnétique ; quand le spin revient à sa position initiale, il émet une onde électromagnétique, captée par une antenne réceptrice.

Les propriétés magnétiques des tissus contenant l'eau perturbent les spins et influent sur l'amplitude du signal recueilli, ce qui crée le contraste dans les images d'IRM. Dans le cas de l'IRM fonctionnelle classique, les propriétés magnétiques du sang varient quand il apporte de l'oxygène aux aires cérébrales qui s'activent, d'où une modification du signal.

Des bobines secouées

Pour localiser le point d'émission du signal, on utilise trois bobines dites de gradient de champ magnétique, alignées le long d'axes différents. Ces bobines font varier localement le champ magnétique, de sorte que la fréquence de précession et l'orientation des spins deviennent spécifiques de leur position. La fréquence de l'onde émise par un spin est alors caractéristique de la localisation de ce dernier. En pratique, l'antenne reçoit un mélange des signaux émis par tous les points. Par un traitement informatique reposant sur une analyse dite de Fourier, on décompose le signal en ses éléments de différentes fréquences, ce qui permet de reconstituer une image de l'organe exploré.

Les bobines de gradient sont alimentées par des courants électriques alternatifs de plusieurs centaines d'ampères, qui ne durent que quelques millisecondes. Le champ magnétique statique agit sur ces courants et engendre des forces mécaniques radiales (dites forces de Laplace), faisant vibrer les bobines. Ainsi, à chaque fois qu'une image est prise, il se produit un train de vibrations qui émet un claquement sonore, dont la fréquence est égale à celle des vibrations. Le bruit est plus aigu pour une IRM fonctionnelle car il faut faire varier les courants plus vite pour acquérir de nombreuses images et suivre l'évolution de l'activité cérébrale, d'où des vibrations de plus haute fréquence.

C'est donc le processus de lecture tridimensionnelle du signal qui crée du bruit. À trois teslas, ce bruit peut atteindre 125 décibels, équivalant à l'intensité perçue lors d'un concert de rock. Des protections acoustiques, tels des bouchons d'oreille ou des casques, s'imposent alors. Ces protections sont conçues pour ramener le niveau de bruit en deçà de 99 décibels, maximum autorisé par l'administration sanitaire américaine (la *Food & Drug Administration*, ou FDA). ■

Cyril POUPON est directeur de l'Unité d'imagerie par résonance magnétique nucléaire et de spectroscopie (UNIRS) du centre NeuroSpin du CEA à Gif-sur-Yvette.

Dans l'intérêt de la science

france inter

mathieu vidard | la tête au carré 14:05-15:00

SCIENCE & GASTRONOMIE

Le sel et sa perception

Des mets ayant la même quantité de sel procurent des sensations de salé différentes, selon leur structure.

Hervé THIS

© Jean-Michel Thiriet

Saler ? Le sel est devenu si commun que l'État ne juge plus nécessaire de percevoir la gabelle et d'envoyer les contrebandiers aux galères. Cuisinières et cuisiniers essayent seulement de doser le sel de telle façon que le plat ait du goût, mais sans excès de saveur salée.

Un mets non salé est en effet fade, et l'ajout de sel augmente le goût. La dissolution du chlorure de sodium dans un liquide conduit à l'hydratation des ions chlorure et des ions sodium, ce qui chasse de l'aliment les solutés les moins solubles dans la solution aqueuse ; or les composés odorants sont souvent de ce type. C'est ainsi que le sel fait ressortir le goût d'un potage de légumes, par exemple.

Toutefois les autorités sanitaires préconisent de réduire la quantité de sel que nous consommons (entre 8 et 12 grammes par jour) : se dresse devant nous le spectre de l'hypertension et de toutes les maladies associées. Et comme 80 % du sel que nous absorbons provient de nos aliments, les agences de santé prônent des efforts de recherche pour identifier des techniques culinaires qui réduiraient l'ajout de sel.

Si les particuliers sont démunis, les industriels ont cherché des méthodes et ils ont compris, par exemple, que des systèmes gélifiés à plusieurs couches peuvent conserver une saveur sucrée alors que certaines couches sont sans sucre. Cette découverte a été transposée au sel dans le pain : dans certains systèmes, une répartition intelligente du sel compense une réduction qui atteint presque 30 % ! À l'Inra de Dijon, en 2013, Marion Emorine, Chantal Septier, Thierry Thomas-Danguin et Christian Salles ont mesuré un effet analogue pour des biscuits à deux couches, montrant de surcroît qu'une forte différence de concentration dans les deux couches augmente la perception du sel.

Le même type d'effet s'observe dans des potages où sont dispersés des morceaux de poulet, mais les scientifiques qui avaient fait l'étude avaient omis de considérer l'effet de la taille des morceaux. Mes collègues dijonnais ont récemment montré que, pour des flans, la taille des morceaux de jambon dispersés dans le gel influe sur la perception du salé, à quantité de sel constante.

En réalité, les récentes analyses sensorielles donnent lieu à deux résultats. Le premier concerne l'ajout de morceaux de jambon : la perception du salé augmente avec l'ajout de jambon, même quand il est peu salé. On soupçonne que cet effet résulte notamment de l'association mentale du goût de jambon avec la saveur salée, par des consommateurs français habitués à cette association. Par ailleurs, la comparaison de flans contenant du jambon broyé, ou des particules de jambon de 0,6 gramme, ou des particules de 2,5 grammes, a montré que l'intensité salée augmente dans cet ordre : pas de jambon, grosses particules, petites particules, jambon broyé – que la quantité totale de sel soit globalement faible (1,8 gramme par kilogramme) ou forte (3 grammes par kilogramme).

Un tel effet corrobore des études sur des fromages effectuées en 2001 par Erwan Engel et ses collègues, de l'Inra de Dijon. Ils avaient alors comparé des fromages entiers, du fromage râpé et du fromage reconstitué à partir de matière grasse de fromage, d'un extrait de fromage dans l'eau et de protéines de fromage obtenues après broyage dans l'eau et centrifugation. La perception du sel était augmentée par la division. Pourquoi ? Dans le cas du fromage, la libération facilitée des ions minéraux semble être la cause, et cette explication pourrait être reprise pour le jambon.

Si l'on comprend mieux que l'on peut réduire la quantité de sel, il reste que le cuisinier doit fixer la quantité totale à utiliser, face à des convives ayant des préférences différentes. Comment faire ce choix ? Interrogé, le cuisinier français Pierre Gagnaire répond que le bon est le beau à manger et que la question est artistique et non technique. Il ne viendrait à l'idée de personne de demander à Mozart d'ajouter des violons dans une pièce d'orchestre ; de même, le mets doit être une composition, et le sel n'est pas un curseur, comme le croient ceux qui s'arrêtent à l'aspect technique de la cuisine. ■

Hervé THIS, physico-chimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la Fondation Science& culture alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

■ MATHÉMATIQUES

Le mystère des nombres

Marcus du Sautoy

Héloïse d'Ormesson, 2014
(363 pages, 23 euros).

L'auteur, un mathématicien britannique connu pour son œuvre de vulgarisation, « rentre en lui-même » pour déterminer comment il comprend les faits mathématiques. Les domaines qu'il expose sont compréhensibles sans grand bagage mathématique, car Marcus du Sautoy les présente de manière conviviale, « benoîtement » pourrions-nous dire : l'exemple numérique précède le cas général qui en découle presque naturellement.

Cette méthode d'exposition montre la genèse du théorème et permet d'en saisir la portée. Ainsi l'exemple du petit théorème de Fermat est un chef-d'œuvre de clarté, alors que dans les livres habituels le théorème est parachuté, un « don de Dieu » où toute explication originelle est absente : après une formulation concise et absconse, le lecteur est immédiatement confronté à l'utilisation. Cette initiation est ardue et peu didactique.

Parenthèse : ce mot « didactique » est aujourd'hui presque une insulte dans la bouche des petits marquis de la pensée pédagogique dogmatique. Ils proclament que la transmission de la connaissance ne les intéresse pas en regard de la nécessaire « autonomie » de la pensée qu'il faut inculquer aux lecteurs. Comme si la réflexion et l'invention ne se fondaient pas sur le savoir… Bref une ânerie, qui s'est souvent propagée par le passé et se perpétue malheureusement aujourd'hui. Fin de la parenthèse.

Les exposés de Marcus du Sautoy allient avec bonheur réflexions arithmétiques et visualisations géométriques, ce qui fortifie la compréhension. La lecture de ce livre est un voyage initiatique dans le grenier cérébral de l'auteur où les faits anciens sont observés d'un œil nouveau. J'ai été étonné et ravi par le procédé inventé par Watts pour faire des billes métalliques, où on lâche une goutte de métal en fusion du haut d'une tour pour que sa chute la rende sphérique. On aimerait en savoir plus, car les gouttes de pluie ne sont pas sphériques, mais Marcus du Sautoy n'a ici que la possibilité de nous donner le goût des choses, et doit nous laisser approfondir les sujets qui nous intéressent.

Ainsi, Marcus du Sautoy maîtrise l'échange philosophiquement mystérieux entre les qualités intrinsèques des nombres et leurs associations extrinsèques, improbables et étonnamment fertiles. Les Mayas associaient un Dieu à la position des nombres, les Pythagoriciens leur associaient des propriétés secrètes, saint Augustin contraignait Dieu à se plier aux caractéristiques des nombres, Marcus du Sautoy en dévoile les prodigieux usages. Pas de magie, une vibrante excitation des neurones.

Philippe Boulanger

■ HISTOIRE DES SCIENCES

Sur la nature du feu aux siècles classiques

Robert Locqueneux

L'Harmattan, 2014
(262 pages, 27 euros).

Le « phlogistique » est un cas classique de l'histoire des sciences. Ce terme fait référence à une substance imaginée par les chimistes du XVIIe siècle pour expliquer la combustion, et dont l'existence a été remise en cause par le grand Antoine Lavoisier à la fin du XVIIIe siècle.

L'idée était que tous les matériaux inflammables contiendraient du phlogistique qui se dégagerait en brûlant ; plus ils en contiendraient, plus ils brûleraient. Le phlogistique était ainsi la matière du feu fixée dans un corps et s'en dégageant lors de la combustion. Mais, en montrant que la combustion nécessite la présence d'oxygène, le savant français aurait réfuté cette théorie et fondé la chimie moderne.

Dans ses grandes lignes, cette vision n'est pas fausse. Dans le détail, la situation est plus complexe, comme on peut le découvrir dans ce livre de l'historien des sciences Robert Locqueneux, qui effectue un tour d'horizon des théories sur le feu, du XVIIe siècle jusqu'au début du XIXe siècle.

La notion de masse se trouve au cœur de cette histoire de changement de théorie. Si du phlogistique se dégage lors d'une combustion, le corps brûlé devrait être plus léger. Or ce n'est pas ce que Lavoisier constate. Après analyse, il arrive à la conclusion qu'un corps brûlé augmente sa masse « exactement dans la proportion de la quantité d'air détruit ou décomposé ».

Cela conduit Lavoisier à rejeter la théorie du phlogistique. Il n'en maintient pas moins que, lors d'une combustion, il y a dégagement d'une matière du feu, qu'il désigne par le terme de calorique. Mais cette dernière est, cette fois, un « fluide très subtil, très élastique, qui environne de toutes parts la planète que nous habitons, [et] qui pénètre avec plus ou moins de facilité les corps qui la composent ».

Lavoisier réfute donc bien la théorie du phlogistique, mais

il continue à donner du crédit à l'idée qu'il existe une substance à la base des phénomènes de combustion. Il faudra attendre la seconde moitié du XIXe siècle pour qu'une interprétation cinématique de la chaleur finisse par s'imposer. Si la « révolution » de Lavoisier marque ainsi une rupture avec les conceptions qui la précèdent, elle se caractérise aussi par de fortes continuités.

En tout cas, en présentant de très nombreux extraits de sources historiques, cet ouvrage permet de mieux comprendre comment on est passé, pour ce qui concerne le feu, des conceptions du XVIIe siècle, héritées de l'Antiquité, à la théorie du phlogistique, puis aux idées de Lavoisier.

Thomas Lepeltier
Philosophe des sciences, Oxford

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

■ ÉTHOLOGIE

Lunes de miel

Jacques Loset

La Salamandre, 2014
(196 pages, 45 euros).

Si vous recherchez un ouvrage sur la biologie de l'ours, vous serez déçus. En revanche, si la relation sensible à l'animal et à son milieu vous intéresse, cet ouvrage vous interpellera. Un texte court mais dense replace dans son contexte une série de photographies d'ours dans les Balkans. Elles ont été prises par le naturaliste suisse Jacques Loset qui, au fil d'une vingtaine d'années, a immortalisé des moments fugaces et des ambiances.

C'est aussi une histoire humaine qui est contée. Impliquant sa famille, l'auteur s'est fait adopter par une région aux océans forestiers où vivent ours et chasseurs. Du reste, l'amitié avec Janez le chasseur joue un rôle essentiel, puisqu'il l'aide à monter ses affûts, à obtenir les autorisations, à bricoler ses installations. Car avec Jacques Loset, la patience, les angles

de vue précis, aidés parfois par un éclairage ingénieux, permettent de faire ressortir le côté théâtral d'une nature méfiante et difficile à observer. Ici, l'œil du naturaliste est mis au service d'un vrai travail artistique. On suit les ours au gré des saisons et des heures de la journée dans des milieux forestiers et rocheux. De facture assez classique au début, les jeux sur la baisse de luminosité font peu à peu oublier le livre et nous transportent dans les ambiances fraîches et sauvages des forêts balkaniques. Nous sommes dans l'intimité de l'ours.

Les amateurs de gravures animalières penseront à Robert Hainard, qui savait mettre son œil de naturaliste au service d'une esquisse d'un animal passant fugacement au crépuscule. L'hommage à cet autre Suisse à la fin de l'ouvrage est donc une évidence. Il faut saluer ici le travail d'édition de *La Salamandre*.

L'ouvrage est luxueux et on sent le respect pour l'animal et le travail de l'auteur. La dimension artistique est donc au service d'une volonté de cohabitation : « En fin de compte, si le débat sur les grands prédateurs suscite autant de passions, c'est qu'il pose une question bien plus fondamentale : ne pouvons-nous pas partager la Terre avec les autres êtres vivants plutôt que de nous acharner à en faire notre seule niche écologique ? ».

La modestie de l'auteur vis-à-vis des sociétés locales et de la nature se vérifie dans l'affectation des droits. L'intégralité sera versée pour planter des arbres fruitiers et améliorer le milieu pour les ours.

Farid Benhammou
Biogéographe de l'environnement

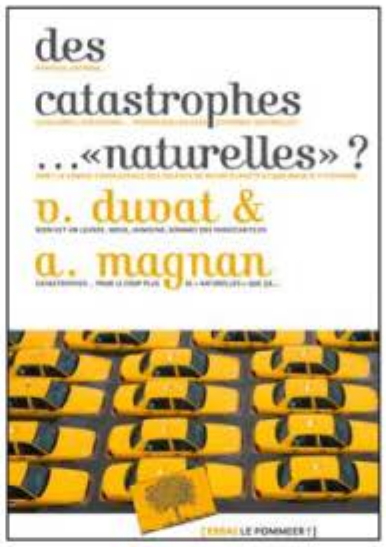
■ GÉOGRAPHIE

Des catastrophes ...« naturelles » ?

Virginie Duvat et Alexandre Magnan

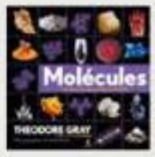
Le Pommier, 2014
(311 pages, 23 euros).

Virginie Duvat (spécialiste des milieux tropicaux) et Alexandre Magnan (spécialiste des questions de vulnérabilité et d'adaptation au changement climatique) nous entraînent dans un passionnant ouvrage sur les conséquences humaines des catastrophes naturelles.



Ce livre résulte de sept études détaillées : les submersions au Bangladesh, la tempête Xynthia en Vendée, le cyclone Katrina sur la Nouvelle Orléans, le cyclone Luis sur Saint-Martin dans les Caraïbes, le tremblement de terre suivi du tsunami au Japon en 2011, le tsunami aux Maldives en 2004, et pour finir une analyse plus large sur le risque de submersion dans les îles du Pacifique.

Ces exemples permettent de mieux comprendre l'incroyable complexité des causes expliquant les destructions et les pertes humaines : celles-ci ne sont pas simplement proportionnelles à la gravité de l'événement, mais s'expliquent surtout par les choix politiques et économiques. Ainsi, les auteurs décrivent l'entrelacement des causes expliquant le lourd bilan du cyclone Katrina comme les conséquences de l'orientation donnée à l'action publique suite au 11 septembre 2001 par l'administration Bush (lutte contre le terrorisme plutôt que gestion des risques naturels), du poids de la pauvreté et ses conséquences inattendues (les plus



Molécules

Théodore Gray

Place des Victoires, 2014
(240 pages, 19,95 euros).

À l'aide de photographies bien prises et mises en pages d'objets naturels ou artificiels, ce livre sous-titré un peu pompeusement « L'architecture du quotidien et de l'infini » nous fait réaliser avec étonnement où sont les molécules dont on entend souvent les noms mais qu'on ne relie pas toujours à des pans de réalité. Ainsi, la kératine est dans les plumes et les poils, le nylon dans les bas et l'acrylique, les sucres partout dans ce que nous mangeons, la laine de roche dans nos murs, etc. Le tout en 14 sections aux sujets congruents.

Mécanique quantique

Michel et Alexandre Gondran

Matériologiques, 2014
(334 pages, 25 euros).

Ce livre OVNI surprend. Deux mathématiciens et informaticiens, défenseurs de la théorie de l'onde-pilote de de Broglie et Bohm, y échafaudent une interprétation commune aux descriptions classique, relativiste et quantique de la réalité physique. Pour la construire, ils introduisent le concept de « particule indiscernée », qui n'est ni une particule ni une onde, mais « une réalité augmentée par rapport à la mécanique classique ». Fondés sur des simulations numériques à base d'intégrales de chemin, leurs raisonnements sont difficiles à croire sans refaire des calculs.

À la recherche de Spartacus

Aldo Schiavone

Belin, 2014
(158 pages, 19 euros).

Rendre la vie à un personnage historique en ne s'appuyant que sur les faits rapportés dans les textes : voilà la prouesse réussie ici par un grand historien de l'Antiquité.
En 70 avant notre ère, les gens étaient comme nous, mais pensaient autrement. « Une fois esclave, toujours esclave ! », pensaient les Romains ; « Un jour libre, toujours libre ! », leur imposa Spartacus en mourant au combat. Lisez et vous saurez que l'ordre romain a failli être changé, car les révoltes serviles étaient de véritables guerres civiles.

Le beau livre de la Terre

Patrick de Wever et Jean-François Buoncristiani

Dunod, 2014
(413 pages, 25,90 euros).

La Terre, une histoire fascinante ! Dans cette collection de beaux livres, chaque double page évoque par le texte et l'image un événement, un phénomène, un lieu lié à l'histoire de notre planète. Les auteurs nous embarquent ainsi dans une aventure géologique qui commence avec la formation de la Terre, où l'on croise les premiers êtres vivants, la dérive de l'Inde, *Homo sapiens*, le septième continent et la disparition de la planète au bout de dix milliards d'années.

Sur les doigts, jusqu'à 9 999

J. Gavin et A. Schärlig

PPUR, 2014
(164 pages, 44 euros).

Avec les doigts, on compte jusqu'à 10, non ? Nous oui, mais les anciens Grecs, Romains et Arabes utilisaient une technique qui permet de compter jusqu'à 99 sur une main et jusqu'à 9 999 sur deux. Les auteurs présentent cette méthode rarement évoquée en histoire des mathématiques et pourtant utilisée pendant près de 2 000 ans, jusqu'à sa disparition au début du XVIIe siècle. Ils s'appuient sur des textes qui confirment sa pratique et les techniques de calcul associées. Ils montrent aussi sa portée symbolique et l'usage qui en était fait par les sculpteurs et les peintres.

Flora Gallica. Flore de France

Jean-Marc Tison et Bruno de Foucault (dir.)

Biotope, 2014
(1196 pages, 89 euros).

Ce guide d'identification de la flore des plantes vasculaires de France était très attendu et est appelé à devenir la « Bible » des botanistes, amateurs ou professionnels, de cette région. Fruit d'un projet de la Société botanique de France ayant duré 13 ans et impliqué 75 collaborateurs, il rassemble des clefs détaillées permettant d'identifier plus de 6 000 taxons, dont environ 5 000 espèces poussant spontanément en France continentale et en Corse. Avec une taxonomie et une phylogénie à jour !

pauvres sans automobiles n'ont pu évacuer la ville), du rôle des réseaux sociaux (les populations défavorisées n'avaient pas forcément de liens dans d'autres villes ou d'autres États, alors pourquoi fuir quand on ne sait pas où aller ?), de la complexité de la gestion des ouvrages publics (une digue est dangereuse lorsqu'elle n'est pas entretenue, or la multiplication des intervenants rend cet entretien presque impossible), de la confiance attribuée à la gestion du risque (la construction d'une digue donne la fallacieuse impression de supprimer le danger alors qu'elle ne fait que le diminuer), des errements de la politique d'aménagement du territoire (urbaniser des territoires inondables au nom du développement économique revient à exposer de nouvelles populations au risque d'inondation), etc.

Ce sont donc des causes sociales qui expliquent l'ampleur des drames provoqués par les catastrophes naturelles, souvent jugées à tort comme exceptionnelles, ce qui revient à minimiser les responsabilités individuelles ou collectives. Les auteurs terminent par un plaidoyer en faveur de l'acceptation et de la compréhension des risques naturels : par exemple, en consentant que certains bords de mer soient rendus aux écosystèmes d'origine (mangroves ou récifs de coraux sous les tropiques, marais dans les pays tempérés), car ceux-ci ont la capacité d'amortir les submersions.

Il faut souligner la grande clarté du texte, l'utilité des cartes et la capacité des deux auteurs à rendre intelligibles des questions complexes mais essentielles pour l'avenir, le réchauffement climatique risquant de multiplier les événements climatiques extrêmes.

Valérie Chansigaud
SPHERE, Université Paris 7

■ **NUTRITION**

Savez-vous goûter... Les légumes secs ?

Bruno Couder, Gilles Daveau, Danièle Mischlich, Caroline Rio

Presses de l'École des hautes études en santé publique, 2014
(125 pages, 22 euros).

Trop onéreux, trop longs à préparer, sans grande valeur nutritive malgré leur côté roboratif, les légumes ont progressivement perdu de leur aura auprès des consommateurs, d'autant plus que les chefs cuisiniers et restaurateurs les ont relégués, durant les dernières décennies, au rôle mineur d'accompagnement ou de décoration. Quant aux fruits, apparaître sur une carte digne de ce nom relevait jusqu'à présent d'une parfaite incongruité. Au sein de la famille très hétéroclite des légumes, une catégorie a particulièrement souffert d'un ostracisme de longue date : les légumes secs. Les légumineuses en particulier, dont la consommation sous forme sèche était de 3,2 kg par an en 1960, contre seulement 1,2 kg par an aujourd'hui (selon l'étude PNNS/INCa 2), ne représentent plus que 12 grammes par jour chez les hommes et 8 chez les femmes (étude SU.VI.MAX).

Mais les temps changent. Sous l'impulsion d'une prise de conscience récente de leurs bénéfices pour la santé, notamment grâce au succès du régime méditerranéen, fruits et légumes et tout particulièrement les légumes secs ont redoré leur image de marque et font dorénavant consensus auprès de l'ensemble des acteurs de la santé, de l'agroalimentaire et de la restauration. Pour autant, la bonne volonté ne suffit pas : au-delà de la prise de conscience par les consommateurs de leurs vertus nutritionnelles, il faut se donner les moyens de les rendre attractifs.

Un modèle alimentaire aussi vertueux soit-il ne peut être bon pour la santé que si on l'associe au plaisir (du goût, de l'odorat, des yeux), au désir onirique, à la satisfaction et au bien-être. C'est tout l'enjeu de ce livre que l'on parcourt avec gourmandise, où les coauteurs (deux chefs cuisiniers, un médecin de santé publique et une diététicienne) marient leurs compétences pour nous offrir un festival de recettes plus alléchantes les unes que les autres. Celles-ci sont classées en fonction du type de repas envisagé : « sur le pouce », en entrée, en plat de résistance, en version exotique, en sauces et assaisonnement …

D'excellentes photos illustrent le propos qui se termine par des conseils pratiques et des références bibliographiques utiles. Encore un livre de cuisine ? Plus que cela : un livre à mettre entre toutes les mains et à déguster lentement et avec bonheur au fil des pages.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 447 - Janvier 2015

*Des numéros reçus, compris dans l'abonnement en cours uniquement.

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science - Service Abonnements - Libre réponse 90 382 - 75 281 Paris cedex 06

1. MA FORMULE

❑ **OUI, je m'abonne à l'offre « Passion » pour 6,33€ par mois ou 76€ pour 1 an.** Je reçois **le magazine *Pour la Science*** (12 nos/an) **+ son hors-série *Dossier Pour la Science*** (4 nos/an) et bénéficie gratuitement des versions numériques pendant la durée de mon abonnement sur **www.pourlascience.fr.**

Mon e-mail obligatoire pour l'accès aux contenus numériques *(à remplir en majuscules)*

_____@_____

À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. : _____
Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ Je règle par prélèvement **6,33€ par mois* et reçois en cadeau le *Dossier Pour la Science* n°81 "L'hérédité sans gènes"** (réf. M0770681).
Je remplis l'autorisation ci-dessous en joignant impérativement un IBAN/BIC.

SCIENCE

*Pour la France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'Europe (pays de la zone SEPA) : 7,66€ par mois. Abonnement en reconduction tacite dénonçable à tout moment auprès du service abonnement. Conditions complètes sur www.pourlascience.fr

AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT PAR MANDAT SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

1 - COORDONNÉES DU TITULAIRE DU COMPTE

Nom, prénom _____

Adresse _____
Numéro et nom de la rue

_____ _____ _____
Code postal Ville Pays

2 - COORDONNÉES BANCAIRES

IBAN _____
Numéro d'identification international du compte bancaire - IBAN (International Bank Acount Number)

BIC _____
Code International d'identifica tion de votre banque - BIC (Bank Identifier Code)

Type de paiement Paiement récurrent/répétitif

3 - DATE ET SIGNATURE OBLIGATOIRES

À _____

Date _____

Signature :

NOM DU CRÉANCIER **ICS N° FR92ZZZ426900**

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

N° de référence unique de mandat (RUM)

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

❑ Je préfère régler mon abonnement d'un an en **une seule fois 76€** sans bénéficier du cadeau.

** Offre valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ - autres pays 35€.

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science* ❑ Par carte bancaire N° _____

Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire

* Offre numérique, valable sans limitation de zone géographique. L'abonnement en prélèvement est renouvelé tacitement à échéance et dénonçable à tout moment avec un préavis de 1 mois. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. **Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case** ❑.

PLS447 Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 31.01.2015

BLOC-NOTES
de Didier Nordon

INCONCEVABLE RIEN

Dans sa conférence *Why does the universe exist ?* (visible sur ted.com), le philosophe américain Jim Holt raconte que, quand il était étudiant, il a posé à son professeur la question qui le tourmentait : « Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? ». Le professeur répondit : « S'il n'y avait rien, vous ne seriez pas satisfait non plus ».

C'est pourtant vrai ! Nous sommes cernés par l'inconcevable. Que la matière ait été là de toute éternité est inconcevable, qu'elle ait surgi l'est également. Mais l'hypothèse « Il n'y a rien » n'est pas plus concevable. Imaginer l'absence de matière dans l'absence d'espace, au sein de l'absence de temps, n'est pas à notre portée.

Il y a quelque chose. Suite à quoi, nous sommes là – et sommes interloqués. S'il n'y avait rien, nous ne serions pas là – et il y aurait quand même de quoi être interloqué.

NATURELLEMENT ARTIFICIEL

Élaboré par des gens qui connaissent la solution, un sudoku est un problème artificiel. À l'inverse, l'escalade d'une paroi rocheuse apparaît comme un problème posé par la nature.

En fait, une escalade est aussi peu naturelle qu'un sudoku. La nature a dressé la paroi, mais n'invite à aucune escalade. Nombre de sociétés ont vécu sans pratiquer d'alpinisme. Escalader la paroi ne devient un problème qu'à partir du moment où quelqu'un se met en tête de le faire.

Les seuls problèmes naturels sont ceux que l'humanité affronte depuis toujours et partout : se déplacer, se nourrir, se soigner, etc. Bien qu'ils portent l'empreinte de la diversité des cultures et des techniques, les gestes par lesquels elle y répond (marcher, manger, etc.) sont, eux aussi, naturels.

Il arrive qu'un chercheur déclare dans un exposé : « Une question naturelle qui se pose alors est… ». Mais si la question était vraiment naturelle, c'est-à-dire imposée à l'homme par la nature, cela fait longtemps que l'humanité s'y serait confrontée. Tout au plus peut-on soutenir qu'il est dans la nature de l'homme d'aller le plus loin possible dans les directions qu'il explore. En ce cas, la démarche du chercheur est naturelle. Et elle le mène à une question qui ne l'est pas.

CONTRÔLE, CRÉATIVITÉ, VÉRITÉ

Dans sa postface à *Mes blagues, ma philosophie* de Slavoj Žižek (PUF, 2014), l'artiste britannique Momus écrit : « Parce que nous vivons dans une société qui préfère massivement le contrôle à la créativité, le fait de dire la vérité est terriblement surestimé. »

Les prémisses de Momus sont discutables. Notre société préfère le contrôle à la créativité ? Oui et non. Certes, la bureaucratie impose ses normes, mais l'inventivité artistique foisonne autant qu'autrefois, et il s'y adjoint une inventivité technologique débridée. On surestime le fait de dire la vérité ? Oui et non. Certes, on idolâtre la transparence, mais bien des bonimenteurs font de brillantes carrières.

Le lien entre goût pour le contrôle et goût pour la vérité est discutable aussi. L'omniprésence des évaluations incite les évalués à trafiquer leurs rapports d'activité. La recherche de vérités, en sciences, est plus erratique que maîtrisée.

Pourtant, Momus met bien le doigt sur quelque chose. Rapprocher contrôle, créativité, vérité, est fondé. Ces trois aspirations structurent notre société, et nous avons à nous déterminer par rapport à elles. Non sans tiraillements. Nous voulons et ne voulons pas le contrôle, qui favorise la sécurité, mais menace les libertés. Nous voulons et ne voulons pas la créativité, qui multiplie les nouveautés appréciables, mais finit par nous submerger. Nous voulons et ne voulons pas la vérité, ce but élevé qui est parfois dérangeant. Ainsi, l'incertitude affectant les prémisses de Momus est à l'image de la nôtre, donc renforce leur pertinence ! En signalant que contrôle, créativité, vérité, sont corrélés et suscitent des tensions, Momus ouvre une belle piste de réflexion.

INTELLECTUELS MALHONNÊTES

Le métier d'intellectuel est le seul à être doté d'un type spécifique d'honnêteté – l'honnêteté intellectuelle, justement. On ne parle pas d'honnêteté boulangère, ingénieure, menuisière – ou financière.

L'expression honnêteté intellectuelle n'aurait pas lieu d'être si elle désignait l'application aux choses de l'esprit de la notion générale d'honnêteté. On se contenterait de dire que tel intellectuel est honnête, ou pas. De fait, l'honnêteté intellectuelle est d'une nature autre que l'honnêteté (un peu comme l'eau écarlate est d'une nature autre que l'eau : un adjectif réussit parfois à transmuter une substance !). Un intellectuel peut user d'arguments spécieux, ne pas faire les expériences sur lesquelles il s'appuie, et être honnête : jamais il ne songerait à s'approprier le bien matériel d'autrui.

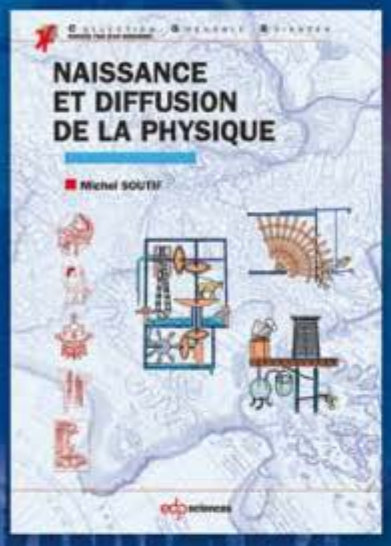
Un boulanger malhonnête dans son métier, on a tôt fait de le soupçonner d'être malhonnête en toutes circonstances. Un intellectuel malhonnête dans son métier, on l'accuse de malhonnêteté intellectuelle. Du coup, on est moins prompt à le soupçonner de malhonnêteté en général, et on le juge moins sévèrement. Ainsi, disposer d'une notion de malhonnêteté qui leur est propre est un privilège des intellectuels… ■

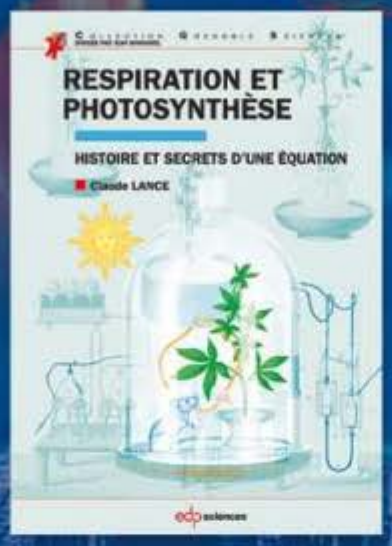
Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Janvier 2015 – N° d'édition M077447-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/194 461 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

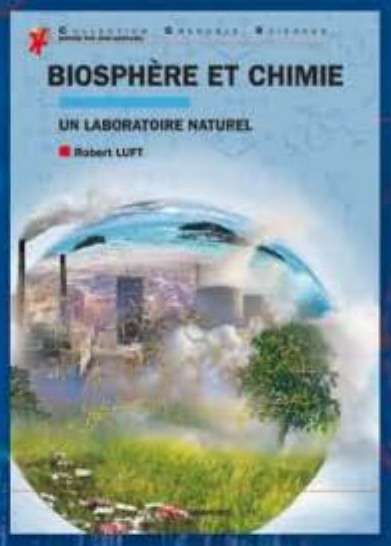
GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

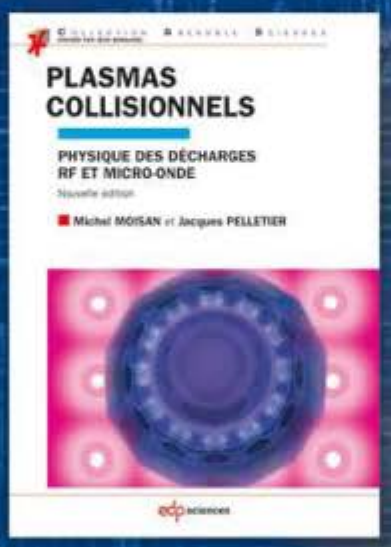
En 2014, Grenoble Sciences a labellisé des ouvrages originaux pour des publics variés.

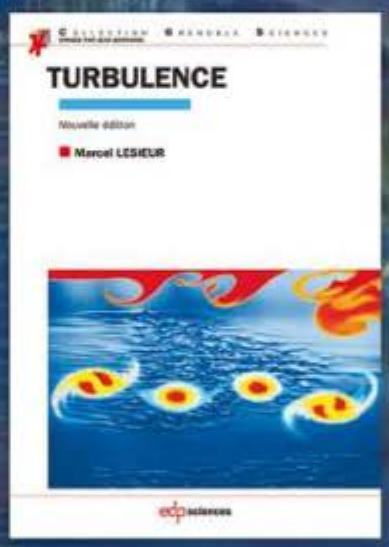






■ **Pour un large public cultivé**





■ **Une approche originale d'un concept bien connu**

■ **Des livres de référence de niveau Master**

www.grenoble-sciences.fr

■ GRENOBLE SCIENCES

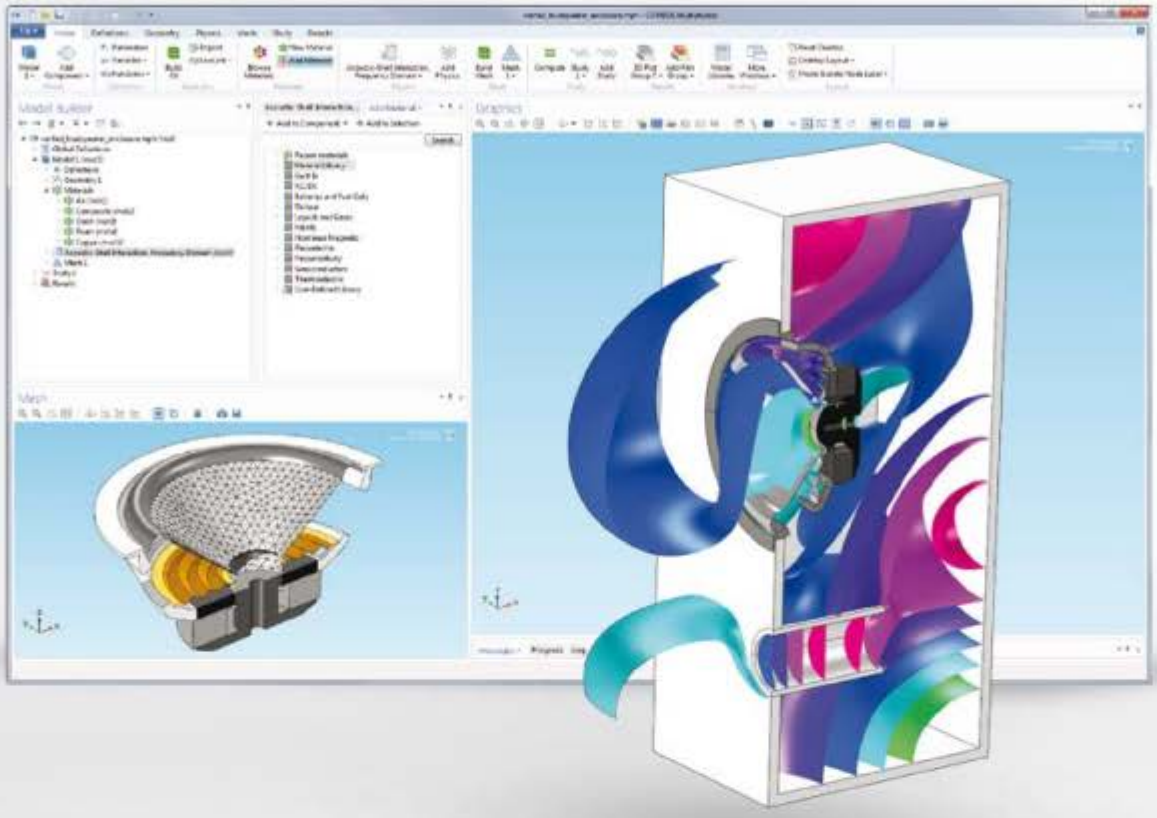
POUR COMMANDER : les ouvrages en français sont en vente dans le rayon *Sciences* des librairies ou sur internet : *http://www.edition-sciences.com*

Grenoble Sciences, Université Joseph Fourier, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – BP 53, 38041 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95 – Fax. (33)4 76 51 45 79
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

Université Joseph Fourier GRENOBLE

Région RhôneAlpes

ENCEINTE ACOUSTIQUE: Ondes de pression émises par un haut-parleur. Ce modèle couple l'électromagnétisme dans la bobine, la mécanique des structures dans la membrane ainsi que l'acoustique à l'intérieur et autour de l'enceinte.



TESTEZ ET OPTIMISEZ VOS DESIGNS AVEC COMSOL MULTIPHYSICS®

Nos outils de simulation multiphysique intègrent tous les effets physiques du monde réel. De ce fait, ils reproduisent avec précision le comportement de vos designs. Pour en savoir plus sur COMSOL Multiphysics, rendez-vous sur www.comsol.fr

Product Suite

COMSOL Multiphysics

ELECTRICAL
AC/DC Module
RF Module
Wave Optics Module
MEMS Module
Plasma Module
Semiconductor Module

MECHANICAL
Heat Transfer Module
Structural Mechanics Module
Nonlinear Structural Materials Module
Geomechanics Module
Fatigue Module
Multibody Dynamics Module
Acoustics Module

FLUID
CFD Module
Mixer Module
Microfluidics Module
Subsurface Flow Module
Pipe Flow Module
Molecular Flow Module

CHEMICAL
Chemical Reaction Engineering Module
Batteries & Fuel Cells Module
Electrodeposition Module
Corrosion Module
Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE
Optimization Module
Material Library
Particle Tracing Module

INTERFACING
LiveLink™ *for* MATLAB®
LiveLink™ *for* Excel®
CAD Import Module
ECAD Import Module
LiveLink™ *for* SolidWorks®
LiveLink™ *for* Inventor®
LiveLink™ *for* AutoCAD®
LiveLink™ *for* Creo™ Parametric
LiveLink™ *for* Pro/ENGINEER®
LiveLink™ *for* Solid Edge®
File Import *for* CATIA® V5

COMSOL

© Copyright 2014 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those trademark owners. For a list of such trademark owners, see www.comsol.com/trademarks