

POUR LA SCIENCE

Août 2013 - n° 430

www.pourlascience.fr

édition française de Scientific American

MARS insolite

Des paysages
à couper le souffle

Piqûres d'insectes :
comment s'en protéger ?

Le calcul quantique,
un nouvel horizon
pour la science

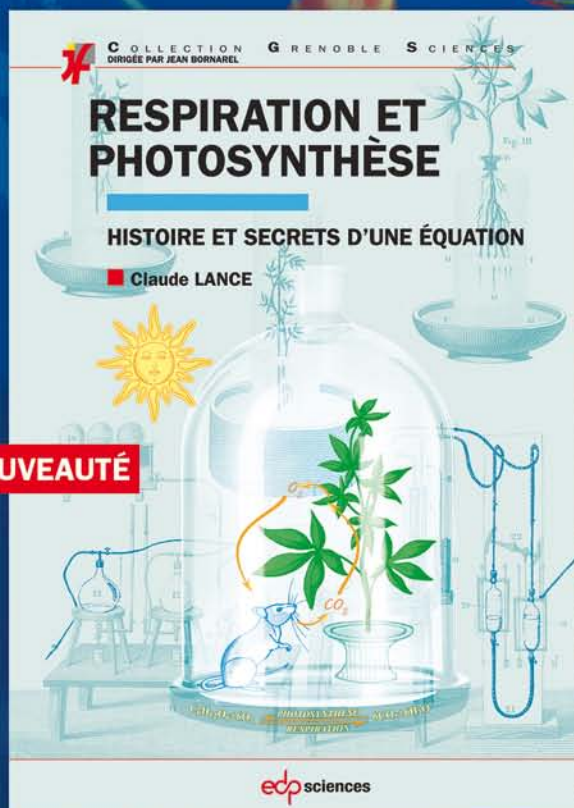
Les animaux sont-ils
affectés par la perte
d'un proche ?

M 02687-430 E 6,20 €



GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ET EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION



■ Des livres (et pap-ebooks) pour les vacances !

Depuis quelques années, les ouvrages sélectionnés et labellisés par *Grenoble Sciences* peuvent concerner des publics plus larges. Le label en assure la qualité.



Pour tous les ouvrages labellisés, visitez notre site internet



<https://www.grenoble-sciences.ujf-grenoble.fr>

Grenoble Sciences, Université Joseph Fourier, Bât. B de Physique,
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

Rhône-Alpes

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Téléphone standard : 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossiers H.S. Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

L'Essentiel Cerveau & Psycho H.S.

Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman,

Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet assistées de Anaïs Grelet

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Impression : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro : François Arleo, Denis Bernard, Bruno Bézard, David Boutelier, Georges Chapouthier, Silvana Condemi, Laure Coulombel, João Duarte, Philippe Frangier, Loïck Magnin, Michel Morange, Simon Perdrix, Philippe Sarda, Pascale Thiollier-Dumartin, George Willcox

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

jf.guillotin@pourlascience.fr, assisté de Nada Mellouk-Raja

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Sinette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. : 04 88 15 12 41

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. Editors: Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President: Steven Inchcombe. 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).



ÉDITO

de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Horizons variés

Le peintre perçoit ce que l'œil non exercé ne voit pas. Il interprète dans son langage couleurs et formes, révélant une réalité que le béotien avait ignorée. Le peintre retranscrit le paysage ou la scène qui l'inspire, de sorte que l'observateur du tableau ne voit pas le monde, mais une interprétation du monde. L'horizon de cet observateur n'est pas celui du peintre, pas plus que celui de l'astronome qui sonde l'Univers, ni celui du physicien qui examine la matière.

Selon Victor Hugo : « La chute des grands hommes rend les médiocres et les petits importants. Quand le Soleil décline à l'horizon, le moindre caillou fait une grande ombre et se croit quelque chose » (*Choses vues*, 1887). Si c'est vrai au coucher du soleil sur Terre, c'est aussi le cas sur la planète Mars. Mais le Terrien ne peut observer. Les sondes envoyées sur la planète rouge le font pour lui et transmettent des photographies de l'horizon martien d'une précision et d'une qualité technique et artistique surprenantes. Si les excursions vers Mars étaient possibles aujourd'hui, les agences de voyages auraient l'embarras du choix pour promouvoir leurs circuits (*voir Mars insolite, des paysages à couper le souffle*, page 25). À n'en pas douter, les artistes trouveront de nouvelles sources d'inspiration.

Les photographies de l'horizon martien sont d'une qualité artistique surprenante.

Notre œil de Terriens croit y reconnaître des paysages observés d'un hublot d'avion ou dans quelque lieu sauvage de l'Ouest américain. Nous avons tendance à céder à des biais anthropomorphiques, c'est-à-dire à interpréter le monde à l'aune de l'expérience humaine. C'est donc conscients du risque d'attribuer à des animaux des sentiments humains que certains éthologues étudient le comportement de ceux qui viennent de perdre un petit ou un proche. Ces précautions prises, ils ont identifié des attitudes qui semblent correspondre à ce que l'on nomme deuil chez l'être humain (*voir Des animaux en deuil ?*, page 54).

Et l'horizon du physicien ? Les phénomènes quantiques ont, un temps, paru devoir limiter les observations réalisées à très petite échelle. Toutefois, certains de leurs aspects sont connus avec une précision parfaite, ce qui ouvre aux physiciens des horizons inédits, notamment la possibilité de nouveaux types de calculs (*voir Par-delà l'horizon quantique*, page 48). Et peut-être pourra-t-on montrer que, comme les cailloux, les électrons éclairés par la lumière du soleil couchant ou par une autre source de lumière rasante, font eux aussi une « grande ombre » !

EDITO

BLOC-NOTES

Didier Nordon

Actualités

Ampleur et décadence
d'Angkor



Un mur transparent aux sons

L'épaule-catapulte
des humains

L'ongle, régénérateur du doigt

.. et bien d'autres sujets.

Opinions

POINT DE VUE

Loi Fioraso : quel dommage !

William Rostène

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Fuites d'eau dans les réseaux :
une mine d'économies
potentielles

Lamine Diakhate, Didier Sinapah
et David Duccini

ENTRETIEN

Internet au bord du précipice

Entretien avec Markus Hofmann

Pour empêcher la Toile de s'effondrer
sous le poids des données, le réseau
doit changer radicalement la manière
dont il traite l'information.

VRAI OU FAUX

Faut-il s'étirer après le sport ?

Guillaume Millet

Le numéro comporte deux encarts d'abonnement
pour la Science brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © Kees Veenenbos

DOSSIER

25

PLANÉTOLOGIE

Mars insolite : des paysages à couper le souffle

Les images qui nous parviennent de Mars
ne sont pas seulement spectaculaires.
Elles nous racontent l'histoire
de cette planète et indiquent la présence
probable et actuelle d'eau liquide.



48

PHYSIQUE

Par-delà l'horizon quantique

David Deutsch et Artur Ekert

À ses débuts, la théorie quantique
a semblé imposer des limites à la science
et aux techniques. L'exemple du calcul
quantique montre qu'au contraire,
de nouveaux horizons s'ouvrent.

54

ÉTHOLOGIE

Des animaux en deuil ?

Barbara King

Selon un nombre croissant de témoignages,
le comportement de multiples animaux,
sauvages ou domestiques, est perturbé
par la mort d'un proche. Ces animaux
éprouveraient-ils du chagrin ?

26 Valles Marineris.
mémoire géologique de Mars
J. Flahaut, P. Allemand et C. Quantin-Nata

34 Mars. un remodelage permanent
Alfred McEwen

42 Mars en images
Jessica Flahaut et Pierre Thomas

58 PALÉONTOLOGIE HUMAINE
Le métissage des espèces humaines
Michael Hammer

L'étude des gènes montre que nos ancêtres se sont métissés avec les espèces humaines archaïques qu'ils ont rencontrées. Cette hybridation a sans doute contribué à l'expansion de *Homo sapiens*.

66 ENTOMOLOGIE
Piqûres d'insectes : comment s'en protéger ?
Vincent Robert

Moustiquaires, lotions répulsives, appareils à ultrasons, etc. : le marché regorge de produits censés éviter à leur utilisateur des piqûres, toujours désagréables et parfois dangereuses. Une récente étude globale aide à faire le tri et à pointer certaines tromperies.

Regards

- 74 HISTOIRE DES SCIENCES**
Erreurs fécondes
David Kaiser et Angela Creager
En 1982, Nick Herbert imagine un télégraphe plus rapide que la lumière. Vers 1940, Max Delbrück explore la nature des gènes en étudiant des virus. Deux exemples d'hypothèses erronées, mais fécondes
- 30 LOGIQUE & CALCUL**
La persistance des nombres
Jean-Paul Delahaye
Quand on multiplie les chiffres d'un nombre entier, on trouve un autre nombre entier, et l'on peut recommencer. Combien de fois ? Onze fois au plus... semble-t-il.
- 36 SCIENCE & FICTION**
Armures à toute épreuve
Sébastien Steyer et Roland Lehoucq
- 38 ART & SCIENCE**
L'art quantique se tisse
Loïc Mangin
- 40 IDÉES DE PHYSIQUE**
Des bateaux qui décollent
Jean-Michel Courtu et Édouard Kierlik
- 43 SCIENCE & GASTRONOMIE**
Devoirs de vacances
Hervé This
- 44 À LIRE**

Rendez-vous sur

SCIENCE.fr

le site de référence

de l'actualité scientifique internationale

Toutes les sciences en un clic

Des actualités quotidiennes
Des articles en libre accès
Votre magazine numérique en ligne*
Plus de 8 ans d'archives*

Des services exclusifs

Les réactions aux articles**
Des offres d'emploi scientifique
Des newsletters**
Un espace abonnement

*Service payant. Si vous êtes abonné(e), les numéros compris dans votre abonnement sont offerts.
**Service gratuit. Les numéros offerts sont limités.

→ **ERRARE HUMANUM EST**

■ a Grèce, premier producteur mondial de paradoxes. On y trouve des marathoniens qui ne courent jamais à Marathon et des dissolus qui mènent une vie spartiate (à Sparte). Les grands bourgeois béotiens sont raffinés. Certains Crétois disent la vérité et ont un ventre d'amateur de hamburgers. À Lesbos, il existe des lesbiennes croqueuses d'hommes ; en Laconie, des laconiens bavards ; à Olympie, des olympiens nerveux ; sur l'île d'Ithaque, des voyageurs qui savent retourner chez eux directement ; dans les îles Sporades, des réunions régulières. Les bossues corinthiennes, doriennes ou ioniennes ne se tiennent pas plus droites qu'ailleurs. Il y a même des défaitistes à Samothrace !

→ **POUR FAIRE PATIENTER**

■ Lorsque, dans un débat, quelqu'un annonce : « Je voudrais rebondir sur ce que vient de dire Untel », on ne peut pas prévoir si son intervention va prolonger celle d'Untel, va la contredire ou n'avoir aucun rapport. Dans tous les cas, pourtant, la phrase est justifiée.

Il y a mille façons de rebondir, en effet. Le rebond d'un ballon de foot est plus ou moins prévisible et change peu sa direction initiale. Le rebond d'une balle contre un mur est plus ou moins prévisible et change du tout au tout sa direction initiale. Le rebondissement d'une affaire politique ou judiciaire

a fait partir dans une direction imprévisible, en rupture avec les épisodes précédents. Rebond du ballon, rebondissement du feuilleton, il s'agit toujours de rebondir.

La formule « Je voudrais rebondir sur ce que vient de dire Untel » n'engage donc rien. Elle donne l'illusion que l'intervenant a la vivacité propre à ce qui rebondit, alors qu'elle n'est qu'un temps mort pendant lequel il se prépare. Cette cheville passe-partout mérite bien son succès.

→ **MATÉRIELLEMENT SYMBOLIQUE**

Récemment, le dollar est repassé au-dessus de la barre symbolique des 100 yens, le Dow Jones a franchi la barre symbolique des 15 000 points. La concentration en CO_2 atmosphérique a franchi la barre symbolique des 400 ppm. Pompidou prévoyait une révolution en France si la barre symbolique des 500 000 chômeurs était franchie ; récemment, la barre symbolique des trois millions de chômeurs l'a été. Aux États-Unis, le taux de chômage a franchi la barre symbolique des dix pour cent en 2009.

Chaque jour, on annonce que telle barre symbolique a été franchie. Un million d'exemplaires vendus, 25 000 visiteurs sur un site, un milliard d'euros de chiffre d'affaires... En général, le passage se fait par-dessus, mais il y a des exceptions. Depuis 1968, les sprinteurs sont sous la barre symbolique des dix secondes aux 100 mètres.

Demander : « Symbolique de quoi ? » serait n'avoir rien compris à notre monde. L'expression a cours dans les médias et chez les communicants : autant dire qu'elle n'a pas de sens précis. Elle convoque la vague notion de « chiffre rond », rien de plus.

Reste un problème métaphysique. En 1985, l'Ukrainien Sergueï Bubka fut le premier à sauter six mètres à la perche. Le nombre 6 étant, dans le domaine du saut à la perche, un chiffre rond, il a franchi là une barre symbolique. Mais cette barre était on ne peut plus matérielle : sa fonction était de se

soumettre à la loi de la gravitation et de tomber si Bubka avait manqué son essai. Quelle est donc la vraie nature, la nature profonde, de la barre : matérielle ou symbolique ?

→ **CLAIR OBSCUR**

■ Lorsque je résume l'entrevue que je viens d'avoir avec mon patron en mathématisant : « Il m'a démontré par $a+b$ que... », je pose mon problème à l'aide de termes mathématiques. On ne saurait dire pour autant que j'ai mathématisé la situation.

Lorsque les carabiniers chantent que la meilleure façon de marcher est de mettre un pied devant l'autre et de recommencer, la pertinence de leur algorithme est indiscutable. On ne saurait pour autant les créditer d'avoir réussi cette autre façon de mathématiser une situation qui consiste à marcher. On ne saurait pas non plus la modéliser par un algorithme.

Mathématiser une situation ne se réduit donc pas à la mettre en équation ou à la décrire par un algorithme. Il faut découvrir une vérité *a priori* cachée, essentielle à cette situation, impossible à exprimer autrement qu'en termes mathématiques et en tirer un moyen nouveau de gérer la situation.

Analyser mieux ce que mathématiser veut dire serait difficile et polémique, comme chaque fois qu'on prétend déterminer ce qui est essentiel et ce qui ne l'est pas. Heureusement, il n'est pas de problème dont on ne puisse se sortir par une pirouette. Russell définissait les mathématiques comme la matière dans laquelle « on ne sait jamais de

«...qu'on parle, ni si ce qu'on dit est vrai...». A sa suite, définissons le fait de mathématiser une situation comme le fait de la décrire en termes tels que nul ne comprend plus de quoi il retourne et d'en déduire une solution dont nul ne sait si elle a un rapport avec le problème initialement posé.

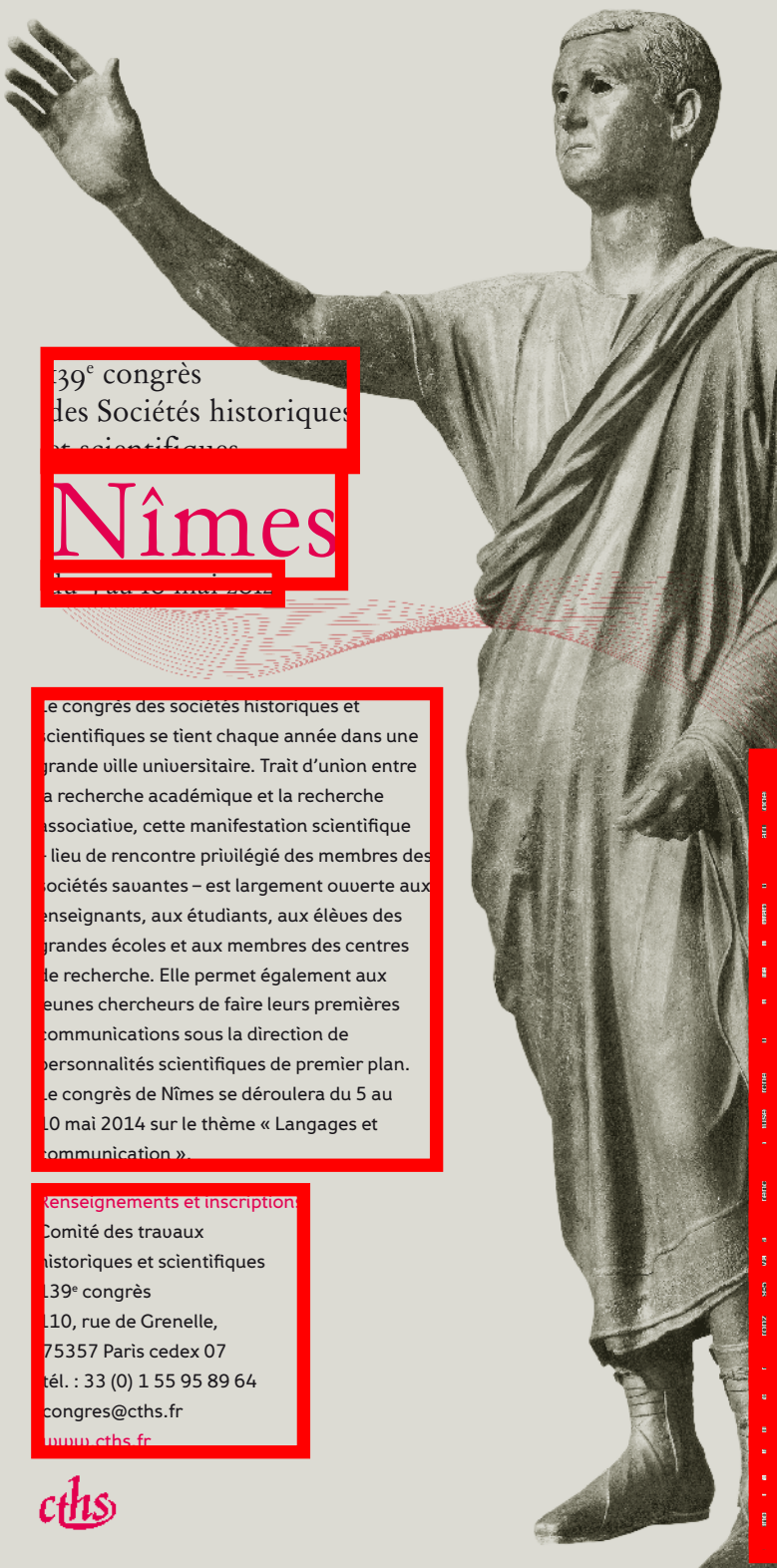
→ RENONCER A COMPRENDRE ?

A force de recherches, il est arrivé à douter de l'objet même de ses recherches », écrit Balzac dans *Le chef-d'œuvre inconnu*. Le personnage vieillesse est peintre, mais la remarque se transpose à toutes les activités. Le mathématicien sait moins qu'un autre ce qu'est un nombre, le physicien sait moins qu'un autre ce qu'est la matière, le linguiste sait moins qu'un autre ce qu'est une langue, etc. Pourquoi ? Parce que, en réfléchissant à ces notions, ils se sont rendu compte qu'elles recèlent des difficultés qu'on ne soupçonne pas quand on les utilise sans y prêter attention. Les spécialistes subissent la mésaventure commune à tant d'amoureux passionnés : l'excès de leur passion peut faire fuir l'être qu'ils adorent.

Plus on cherche à comprendre quelque objet, d'origine naturelle ou humaine, plus cet objet échappe. Mystérieuse loi inhérente à notre monde. Que signifie-t-elle ? Pourquoi est-elle si obstinée à s'appliquer pratiquement toujours et partout ? Comprendre cela serait passionnant, mais ne tentons surtout pas de le faire : le mystère ne manquerait pas de nous échapper encore plus.



Langages et communication



39^e congrès
des Sociétés historiques
et scientifiques

Nîmes

Le congrès des sociétés historiques et scientifiques se tient chaque année dans une grande ville universitaire. Trait d'union entre la recherche académique et la recherche associative, cette manifestation scientifique a lieu de rencontre privilégié des membres des sociétés savantes – est largement ouverte aux enseignants, aux étudiants, aux élèves des grandes écoles et aux membres des centres de recherche. Elle permet également aux jeunes chercheurs de faire leurs premières communications sous la direction de personnalités scientifiques de premier plan. Le congrès de Nîmes se déroulera du 5 au 10 mai 2014 sur le thème « Langages et communication ».

enseignements et inscription:

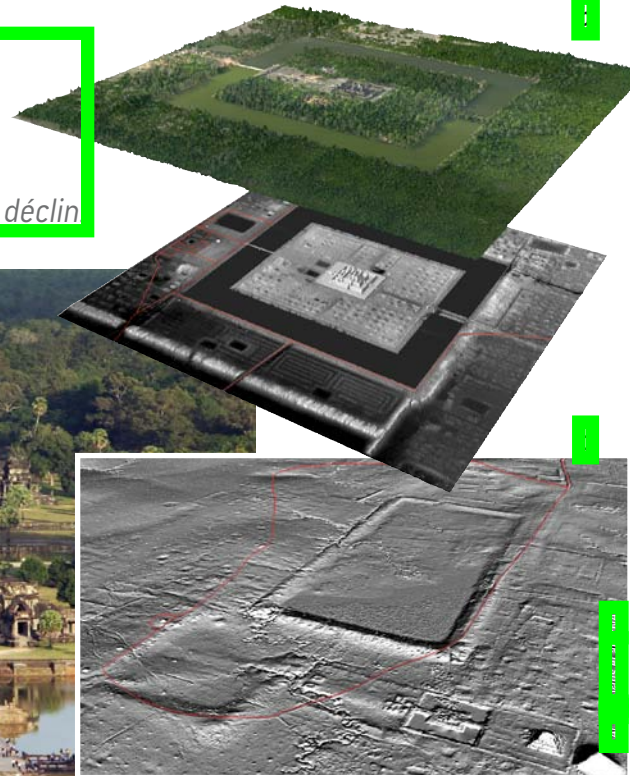
Comité des travaux
historiques et scientifiques
39^e congrès
10, rue de Grenelle,
75357 Paris cedex 07
tél. : 33 (0) 1 55 95 89 64
congres@cths.fr
www.cths.fr

cths

Archéologie

Ampleur et décadence d'Angkor

Une cartographie par télédétection laser du site d'Angkor, au Cambodge, révèle que la cité médiévale était bien plus dense qu'on ne le pensait. Une donnée qui corrobore le scénario de son déclin



Le temple Angkor Vat (a, b) n'était pas perdu dans la forêt comme aujourd'hui, mais entouré d'une vaste cité s'appuyant sur un réseau complexe d'infrastructures hydrauliques. C'est ce qu'a montré la cartographie de la région par laser héliporté (b, c, en gris). Les archéologues ont détecté de nombreux bassins peu profonds, invisibles par les autres techniques (c). Les lignes rouges indiquent les infrastructures modernes.

A l'évocation d'Angkor, on pense aux somptueux vestiges des temples en pierre gravés, perdus dans la forêt tropicale. Cette vision ne correspond qu'à la partie émergée du site. Depuis 50 ans, l'étude d'Angkor a révélé que la capitale médiévale khmère, née au IX^e siècle, s'étendait sur environ 1 000 kilomètres carrés, bien au-delà des enceintes des temples, et était alimentée par un réseau hydraulique complexe. Fruit d'un consortium international coordonné par Damian Evans, de l'Université de Sydney, en Australie, une nouvelle cartographie au laser permet de préciser l'organisation urbaine d'Angkor et conforte les hypothèses avancées pour expliquer son déclin au XV^e siècle.

Jusque dans les années 1950, l'étude d'Angkor s'est résumée à celle des temples, de leurs divinités, de leurs inscriptions, essentiellement religieuses, et des dynasties royales qui s'y sont

succédé, pour une raison simple : il ne restait aucune trace de vie urbaine en surface. Construites en matériaux périssables – sans doute du bois, du bambou et de la paille –, les habitations ont disparu au fil du temps.

Puis les fouilles stratigraphiques, associées à la télédétection, ont révélé autour des temples tout un réseau d'établissements et d'aménagements hydrauliques et agricoles. Toutefois, la description restait lacunaire dans les zones de forêt dense, notamment au cœur d'Angkor. Les archéologues australiens et français ont scanné la région avec un lidar héliporté. Ce dispositif envoie un faisceau laser infrarouge sur le relief et enregistre sa réflexion. Après 20 heures de vol et 370 kilomètres carrés couverts, un logiciel a filtré des milliards de points récoltés pour isoler ceux qui ont atteint le sol et ainsi construire un modèle topographique précis du terrain. Des centaines de bassins hydrauliques ont ainsi été détectés bien

au-delà du centre d'Angkor, tant à l'intérieur des enceintes des temples qu'à l'extérieur.

Cette campagne de mesures révèle qu'Angkor était une vaste mégapole assez dense et aux infrastructures centralisées. Cela corrobore l'hypothèse selon laquelle deux périodes de 30 ans de fortes instabilités des moussons, aux XIV^e et XV^e siècles, auraient précipité l'abandon de la cité. Le rôle crucial de ces infrastructures centralisées aurait en effet rendu difficile la vie des citoyens lors d'écarts climatiques importants.

Guidés par le lidar, les archéologues vérifient ces observations sur le terrain. « Ces fouilles sont indispensables pour préciser l'urbanisme et l'hydraulique complexe d'Angkor. Et avec la richesse des données du lidar, cela nous prendra plusieurs années ! », explique Christophe Pottier, de l'École française d'Extrême-Orient, coauteur des travaux.

→ Marie-Neige Cordonnier

D. H. Evans et al., PNAS, à paraître.

Zoologie

La course ralentie du guépard

Le guépard réussit à chasser en ralentissant! C'est ce qu'a constaté l'équipe d'Alan Wilson, du Collège royal

vétérinaire de Londres, quand elle a équipé cinq guépards sauvages d'un GPS, d'accéléromètres et de gyroscopes et enregistré pas moins de 367 sprints de chasse.

En effet, malgré des pointes de vitesse de 70 à 93 kilomètres par heure (record connu : 105 km/h), la chasse de ces merveilleux sprinteurs n'a été couronnée de succès que dans 25 pour cent des cas... succès qui n'était corrélé ni à leur pointe de vitesse ni à leur accélération. Pourquoi?

Un guépard pèse jusqu'à 70 kilogrammes, alors que ses proies pèsent en général moins de 50 kilogrammes et sont donc spécialistes du zigzag. S'il



effectuait un virage alors qu'il est lancé à 105 kilomètres par heure, le rayon de courbure

dépasserait 50 mètres... C'est pourquoi le guépard utilise sa pointe de vitesse seulement pour se rapprocher comme un missile de son gibier, avant de freiner brutalement (quatre mètres par seconde et par foulée de sept ou huit mètres) afin de revenir à une vitesse juste supérieure à celle de sa proie zigzagante. Il a alors besoin de toute la souplesse de son échine et de ses pattes afin d'entrer en contact avec sa proie et lui faire un « croche-patte », avant de l'étouffer d'une morsure au cou.

→ François Savatier

Nature, vol. 498, pp. 185-189, 2013

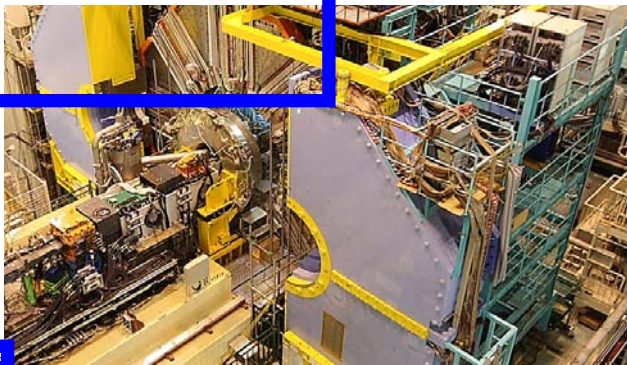
Physique des particules

Une particule à quatre quarks?

Le physicien américain Murray Gell-Mann s'inspira de « Three Quarks for Muster Mark », phrase tirée de l'imagerie

Naked, de l'écrivain irlandais James Joyce, pour nommer les constituants des hadrons (particules sensibles à l'interaction forte). Ainsi, les quarks – il en existe six types notés u , d , c , s , t et b – s'assemblent par trois pour former les baryons, et par paires quark-antiquark pour les mésons. Mais d'autres associations sont-elles possibles? La théorie ne l'exclut pas. Les deux expériences Belle, à Tsukuba au Japon, et BESIII, à Beijing en Chine, installées auprès de collisionneurs de particules, ont observé de façon indépendante un signal qui correspondrait à un hadron composé de deux quarks et deux antiquarks.

Ces expériences ont mis en évidence un hadron étonnant, nommé $Z_c(3900)$. D'après sa masse, ce hadron doit contenir une paire quark c -antiquark $\bar{c}$. En outre, il



L'expérience Belle à Tsukuba, au Japon, sur l'accélérateur KEKB

est chargé électriquement. Il pourrait donc contenir quatre quarks pour satisfaire ces contraintes, par exemple un quark c , un quark u , un antiquark $\bar{d}$ et un antiquark $\bar{c}$. Une telle configuration à deux quarks et deux antiquarks serait une première.

Une autre explication plus classique est cependant possible. Le hadron $Z_c(3900)$ ne serait pas un édifice unique, mais une paire de mésons, un méson D et un

antiméson $\bar{D}$, en interaction et formant une sorte de « molécule hadronique ». La distinction entre deux mésons D et un hadron $Z_c(3900)$ est juste une question de degré d'interaction entre les constituants. De plus amples études sur les mésons D pourraient trancher la question de l'interprétation de $Z_c(3900)$.

→ Jean Banny

Phys. Rev. Lett., vol. 110, articles 252001 et 252002, 2013

En bref

Pluton et ses lunes

L'Union internationale d'astronomie a officialisé les noms des quatrième et cinquième satellites de Pluton découverts en 2011 et 2012: Kerberos et Styx. L'organisme avait invité le grand public à se prononcer sur ce choix en imposant la contrainte de noms liés à la mythologie du monde des enfers, comme pour Pluton. Et l'on ne devait pas créer de confusion avec d'autres objets célestes, comme cela aurait été le cas avec « Vulcain » (on parle d'astéroïde vulcanoïde pour un corps gravitant à proximité du soleil).

Tris dans la toile

La surface des insectes butineurs se charge électriquement pendant le vol à cause des frottements avec l'air. Cet effet d'électricité statique présente un intérêt, car les grains de pollen se collent plus facilement à l'insecte. Victor Ortega-Gimenez, de l'Université de Californie à Berkeley, a montré que cette charge a aussi un inconvénient pour le butineur: les toiles d'araignée, qui se polarisent aisément grâce à leur contenu en eau, piègent les insectes de façon plus efficace.

IRM avec du glucose

Une équipe menée par Simon Walker-Samuel et Xavier Golay, de l'University College de Londres, a développé une technique pour visualiser *in vivo* l'absorption de glucose par les tissus, et cela sans marqueurs radioactifs. La méthode, nommée glucoCEST, utilise l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Relativement facile à mettre en œuvre, elle exploite le fait que les tumeurs consomment davantage de glucose que les tissus normaux. Les chercheurs ont montré que leur technique est sensible, chez la souris, à des tumeurs colorectales et qu'elle en distingue même les types.

En bref

Une bouffée d'ondes radio

Dan Thornton, de l'Université de Manchester, et ses collègues ont observé quatre signaux très brefs, d'un millième de seconde, en ondes radio. Ils confirment une détection analogue qui date de 2007. L'origine de ces signaux est extragalactique et pourrait être distante de 5,5 à 10 milliards d'années-lumière. La source est encore inconnue. Parmi les explications possibles figurent les magnétars (des étoiles à neutrons à champ magnétique intense) ou l'effondrement de trous noirs en rotation.

Une cité maya majeure

Découvrir une importante cité maya à deux heures de Jeep à travers la jungle : qui aurait cru que cela soit encore possible ? C'est pourtant ce qui est arrivé à l'équipe d'Ivan Sprajc, de l'Institut d'anthropologie et d'études spatiales à Lubiana, en Slovénie. La découverte a eu lieu au Sud-Est de la ville de Campeche, au Mexique, grâce à des images satellites. Nommée Chactún, la cité comportait au moins dix grands monuments. Elle occupait le centre d'une zone de plus de 3000 kilomètres carrés d'une province maya, les Basses terres centrales, jusque-là mal explorées.

Médecine

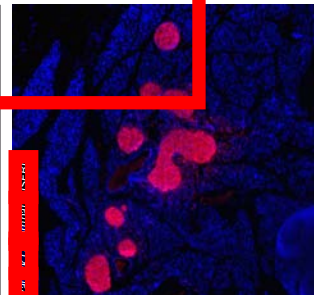
Diabète : rétablir la production d'insuline

Le diabète de type 1 touche plus de 30 millions de personnes dans le monde. Il se manifeste notamment par un manque d'insuline, dû à la destruction dans le pancréas des cellules β (qui synthétisent cette hormone) par le système immunitaire. Les traitements actuels, à base d'injections d'insuline, permettent aux malades de mener une vie normale, mais leur espérance de vie est réduite de cinq à huit ans. Deux nouvelles études se sont plutôt concentrées sur la préservation ou le rétablissement de la production d'insuline par l'organisme.

La première a été réalisée par une équipe néerlandaise menée par Lawrence Steinman, de l'Université Stanford. Elle visait à neutraliser la réaction immunitaire délétère, durant laquelle des cellules immunitaires nommées lymphocytes T CD8 s'attaquent aux cellules β . Les chercheurs ont

élaboré une molécule qui, injectée régulièrement, entraînerait une baisse du nombre de ces lymphocytes. Cependant, leurs résultats et le principe d'une désactivation partielle du système immunitaire sont controversés.

Dans la seconde étude, l'équipe de Patrick Collombat, de l'INSERM, a cherché un moyen de reconstituer le stock de cellules β des diabétiques. De précédents travaux sur de jeunes souris avaient montré qu'un autre type de cellules pancréatiques, dites α , se transforment en cellules β lorsqu'elles ont s'exprimer un gène nommé *Pax4*, habituellement silencieux dans ces cellules. Les biologistes ont réussi à créer des souris génétiquement modifiées où ce gène s'exprime et entraîne la transformation cellulaire à l'âge adulte. Ils ont ainsi montré que l'on pouvait reconstituer plusieurs fois le stock de cellules β , après l'avoir détruit



Dans le pancréas, la modification de l'expression d'un gène a entraîné la transformation de cellules α en cellules β productrices d'insuline (en rose).

chimiquement pour simuler le diabète. La prochaine étape sera de déclencher la transformation des cellules α par des molécules pharmacologiques.

→ Guillaume Jacquemont

K. Al-Hasani et al., *Dev. Cell*, en ligne le 27 juin 2013 ; B. O. Roep et al., *Sci. Transl. Med.*, vol. 5, 191ra82, 2013

Physique

Un mur transparent aux sons

Une plaque rigide percée de quelques petits trous sur lesquels est tendu un film élastique, transmet très bien les sons d'une certaine fréquence. Sam Lee, de l'Université Yonsei à Séoul, en Corée du Sud, et trois collègues l'ont montré à la fois par des calculs et par des expériences. Il s'agit là d'un effet de concentration de l'énergie acoustique à travers les trous, étonnant par son intensité et qui devrait trouver facilement des applications.

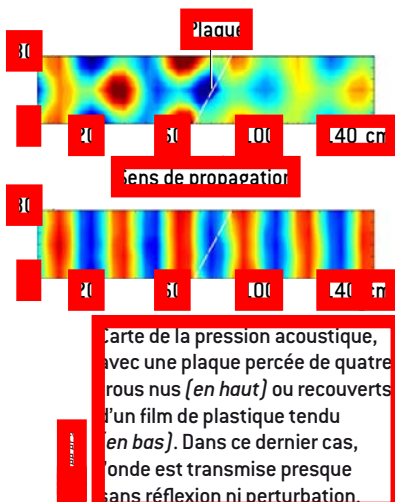
Un mur rigide réfléchit complètement une onde sonore incidente parce qu'aucun volume d'air ne peut le traverser. Si on le

perce de très petits trous, la situation ne change guère, à cause de l'inertie des petites colonnes d'air mises en mouvement à l'intérieur des trous. L'équipe de S. Lee a eu l'idée de supprimer cette inertie en recouvrant les trous d'une mince membrane de plastique tendue. Lorsque la fréquence de l'onde sonore incidente est en correspondance avec la fréquence propre de vibration de la membrane, un effet de résonance se produit et annule l'inertie effective de l'air à l'intérieur des trous. L'onde sonore est alors transmise, et elle le serait presque entièrement s'il n'y avait pas de dissipation d'énergie.

Les expériences réalisées par S. Lee et ses collègues le démontrent. Par exemple, avec une plaque en acrylique épaisse de cinq millimètres et percée de quatre trous de 8,5 millimètres de rayon, ce qui représente trois pour cent de la superficie de la plaque, l'intensité sonore transmise est égale à environ 80 pour cent de l'intensité incidente, pour une onde de fréquence 1,2 kilohertz. De plus, ce pouvoir de transmission est indépendant de l'angle d'incidence de l'onde – ou de l'inclinaison de la plaque.

→ Maurice Mashaal

J. Park et al., *Physical Review Letters*, vol. 110, 244302, 2013



Ethologie

L'évolution, affaire de détails

L'évolution est en partie régie par des détails. C'est ce que suggère une étude menée par Manuel Massot, du CNRS, et Pedro Aragón, du Muséum de sciences naturelles de Madrid. Sur des lézards *Zootoca vivipara*, ils ont montré que les modalités d'un seul repas (le premier de leur vie) influent notablement sur le cours de l'existence de ces animaux.

Le lézard étudié se nourrit seul dès la naissance. Deux groupes de nouveau-nés ont été lâchés dans la nature. L'un avait reçu un premier repas, l'autre non. Les lézards nourris ont été plus nombreux à survivre, se sont moins dispersés et, de façon plus surprenante, se sont moins reproduits – et ce pendant plusieurs années. Les chercheurs qualifient de résonance phénotypique ces réponses importantes à de légères variations. Quand ces dernières sont environnementales, elles pourraient même influencer sur l'évolution des populations.

→ G. J.

M. Massot et al., *Current Biology*, en ligne le 3 juillet 2013.



In lézard *Zootoca vivipara*

Archéologie

L'Iran, un berceau agricole ?

L'agriculture serait née dans le Croissant fertile, au Moyen-Orient, il y a plus de 11 000 ans. Mais où exactement ? L'idée dominante était celle d'un développement quasi simultané sur plusieurs sites du centre et de l'Ouest de la région.

Simone Riehl, de l'Université de Tübingen, et ses collègues ont étendu cette zone d'apparition vers le Sud-Est, jusqu'à l'Iran.

Les archéologues ont étudié le site iranien de Chogha Golan, à l'Est du fleuve Tigre. L'analyse de fossiles de plantes couvrant une période de 2 000 ans a révélé une évolution de souches sauvages vers des souches proches des espèces domestiques actuelles (blé, orge...). Les habitants auraient commencé à cultiver ces plantes il y a 11 300 ans, soit à peine deux siècles après les plus anciennes traces d'agriculture, retrouvées en Jordanie et en Syrie.

→ G. J.

S. Riehl et al., *Science*, en ligne le 4 juillet 2013.

Informatique

Un algorithme quantique à l'épreuve de l'expérience

La construction d'un ordinateur quantique est un défi technique, voire une utopie, mais des questions sur les méthodes de calcul se posent aussi. Comment profiter des propriétés quantiques pour optimiser un calcul et réduire le temps nécessaire pour résoudre un problème ? En 2009, trois chercheurs avaient conçu un algorithme quantique capable en principe de résoudre un système d'équations linéaires par exemple trouver les valeurs de x et y vérifiant les deux équations $4x + 3y = 6$ et $3x + 2y = 3$ plus rapidement qu'un algorithme classique. Des physiciens de l'Université de Hefei, en Chine, viennent de le réaliser dans un cas simple.

Le premier obstacle des ordinateurs quantiques est technique : les dispositifs actuels sont limités par le nombre de bits quantiques, ou qubits, qu'ils sont capables de traiter. L'information, codée en bits (des « 0 » et des « 1 »), est portée par des systèmes quantiques tels que des photons ou des ions. Contrairement aux bits classiques, un tel qubit peut être dans une superposition de l'état « 0 » et de l'état « 1 ». De plus, il est possible d'intriquer les qubits, c'est-à-dire de créer des liens particuliers et forts entre leurs états quantiques. Cela permet en théorie de faire des calculs, mais les qubits doivent être parfaitement isolés de

l'environnement ; sinon les états de superposition quantique sont détruits, processus nommé décohérence. Or plus les qubits sont nombreux, plus la décohérence est difficile à éviter.

Outre ce défi physique, la question des algorithmes se pose. Les algorithmes quantiques ne sont pas toujours plus rapides que les algorithmes classiques. En 2009, Aram Harrow, Avinahan Hassidim et Seth Lloyd, trois mathématiciens de l'Université de Bristol (Royaume-Uni) et du MIT, ont développé un algorithme quantique de résolution des systèmes d'équations linéaires qui est beaucoup plus rapide que les meilleurs algorithmes classiques. S'il y a peu de différence quand le système ne comporte que quelques équations et inconnues, l'avantage devient de plus en plus important à mesure que le nombre d'inconnues et d'équations augmente. Il restait cependant à mettre en œuvre un dispositif expérimental réalisant concrètement cet algorithme.

Xin-Dong Cai et ses collègues ont réussi à le faire dans le cas le plus simple, celui d'un système de deux équations à deux inconnues. Leur dispositif utilise quatre qubits constitués de deux paires de photons intriqués, qui passent à travers des portes logiques.

→ S. B.

X.-D. Cai et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, 230501, 2013.



L'ordinateur quantique est encore loin, mais un dispositif quantique a permis de résoudre un système de deux équations à deux inconnues.

Géochimie

Les gaz rares retournent à la terre

Existe-t-il un cycle des gaz rares (hélium, néon, etc.) entre l'atmosphère et le manteau terrestre ?

Diverses observations le suggèrent. Les expériences de Colin Jackson, de l'Université Brown aux États-Unis, et ses collègues confortent cette hypothèse.

Les gaz rares seraient émis dans l'atmosphère par les volcans des dorsales, puis retourneraient dans le manteau avec la subduction de roches avant absorbé ces gaz.

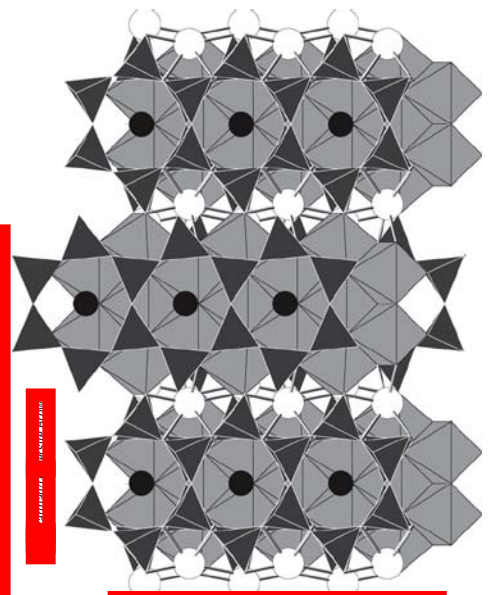
Le type de cycle est connu pour le dioxyde de carbone, l'eau et d'autres gaz, mais les géochimistes pensaient que la pression et la température dans les zones de subduction libéraient les gaz rares des roches et empêchaient ainsi leur pénétration dans le manteau.

Or C. Jackson et ses collègues ont montré que l'hélium et le néon étaient absorbés par des roches présentes en grande quantité dans la croûte océanique, les amphiboles.

Des échantillons de ces roches, de la famille des silicates hydratés, mis en présence de gaz rares soumis à des pressions et températures relativement élevées (1,7 kilobar et 375 °C) ont révélé un contenu en gaz rares supérieur à celui d'autres minéraux testés, telle l'olivine (une autre famille de silicates). Le recyclage des gaz rares dans le manteau pourrait donc s'effectuer par cette voie.

→ S. B.

Nature Geoscience, vol. 6, pp. 562-565, 2013.



Les atomes de gaz rares se placent dans des sites vides de la structure cristalline de l'amphibole.

735 000 ans : c'est l'âge du plus ancien génome étudié. Il appartient à un ancêtre du cheval préservé dans le pergélisol du Yukon, au Canada

Biohistoire

L'épaule-catapulte des humains



Cette côte de mastodonte contient encore l'armature de pierre équipant la pointe que les chasseurs nord-américains ont propulsée et profondément fichée dans le flanc de l'animal, il y a environ 14 000 ans.

L'équipe de Neil Roach, de l'Université Harvard, a étudié les prouesses uniques des lanceurs humains. Il n'existe pas, en effet, d'animaux capables de lancer des objets plus vite, plus loin, plus fort et mieux que l'homme. Un lanceur de base-ball professionnel, par exemple, propulse couramment sa balle à près de 160 kilomètres par heure...

Comment s'y prend-il ? Pour le savoir, les chercheurs ont numérisé en 3D les mouvements de lanceurs. Puis, à l'aide d'un logiciel dit de « dynamique inverse », ils ont décomposé le mouvement complexe du jet en la somme des mouvements de chacune des articulations en jeu.

Il en ressort que les lanceurs communiquent des vitesses étonnantes à leurs projectiles grâce à l'énergie élastique qu'ils stockent dans leur épaule.

Pour ce faire, ils commencent par effectuer un grand pas vers l'arrière et étendent leur bras vers l'arrière. Ce mouvement déclenche la rotation du torse vers l'avant (et la cible), de sorte que les tendons, les ligaments et les muscles sont étirés au maximum. L'énergie ainsi stockée dans le système musculo-squelettique de l'épaule est ensuite libérée en une fraction de seconde : la rotation du bras, suivie du dépliement de l'avant-bras puis du poignet, créent une vitesse angulaire pouvant atteindre 2500 degrés par seconde au départ du projectile.

Selon les chercheurs, trois évolutions anatomiques absentes chez le chimpanzé ont été cruciales : la mise en rotation du thorax après un découplage d'avec les hanches ; le dépliement du bras vers l'arrière, qui augmente

la possibilité d'opposer les rotations du torse et du bras afin de stocker de l'énergie ; finalement, l'articulation de l'épaule disposée de façon plus latérale que chez le chimpanzé, ce qui aligne la masse en rotation du torse et celle du bras. Le stockage d'énergie dans le muscle grand pectoral est ainsi facilité, tandis que tout se passe comme si le bras était prolongé à l'intérieur du corps jusqu'au centre de rotation du torse, ce qui augmente la vitesse de la main.

D'après le registre fossile, ces évolutions se sont enclenchées il y a un million d'années, quand l'homme, collecteur opportuniste souvent nécrophage, s'est peu à peu transformé en un chasseur courant et jetant sans cesse des traits sur des proies vivantes.

→ F. S.

Nature vol. 498, pp. 483-486, 2013.

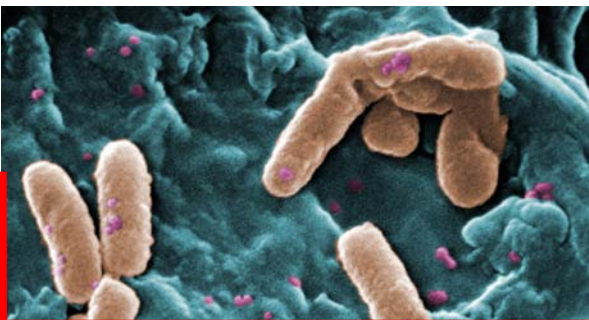
Microbiologie

Antibiotiques et argent

Les propriétés antimicrobiennes de l'argent sont connues depuis longtemps: Hippocrate décrivait déjà, environ 400 ans avant notre ère, son utilisation pour faciliter la guérison des blessures. Son mécanisme d'action demeurait cependant inconnu. L'équipe de James Collins, de l'Université de Boston, aux États-Unis, vient de résoudre l'énigme. *In vitro*, elle a montré que les ions d'argent perturbent plusieurs processus bactériens, notamment la régulation du fer et le métabolisme. Ces dérèglements entraînent une augmentation de la perméabilité de la membrane bactérienne et de la production de dérivés réactifs de l'oxygène néfastes pour la bactérie. De plus, dans des modèles murins d'infections, ces effets augmentent l'efficacité d'antibiotiques et rendent vulnérables à une classe d'antibiotiques des bactéries qui leur résistaient. Une nouvelle piste pour contrer la résistance des bactéries ?

→ M.-N. C.

R. Morones-Ramirez et al., *Sci. Transl. Med.*, vol. 5, 190ra81, 2013



L'argent pourrait-il affaiblir les bactéries *Pseudomonas aeruginosa* (en brun sur cette micrographie), responsables d'infections nosocomiales et très résistantes aux antibiotiques ?

Géophysique

Une subduction portugaise ?

L'océan Atlantique ne présente que deux zones de subduction d'une plaque tectonique sous une autre: l'arc volcanique des Petites Antilles et l'arc volcanique de la Scotia, près de l'Antarctique. Comment une zone de subduction se forme-t-elle ? João Duarte, de l'Université Monash à Melbourne, en Australie, et ses collègues ont identifié des conditions susceptibles de créer un phénomène de subduction. Ils ont remarqué que les deux zones de subduction présentes dans l'océan Atlantique se propagent le long de failles reliant chaque arc à la dorsale médio-atlantique et que ces failles sont proches d'autres sites actifs susceptibles les déstabiliser. Or la région au large du Portugal présente une configuration similaire. Ainsi, le site, aujourd'hui inactif, pourrait devenir une zone de subduction dans... 20 millions d'années.

→ S. B.

C. Duarte et al., *Geology*, en ligne le 6 juin 2013

Physiologie

L'ongle, régénérateur du doigt

La salamandre est le seul vertébré connu dont les pattes repoussent après amputation. Chez les mammifères, en revanche, la capacité de régénération se limite... au bout des doigts. Et encore, tant qu'il leur reste assez d'ongle! Les biologistes le savaient depuis 40 ans, sans toutefois comprendre le rôle de l'ongle. Makoto Takeo, de l'Université de New York, et ses collègues expliquent aujourd'hui sa fonction: chez la souris, ils ont identifié, sous la base de l'ongle, une population de cellules souches qui orchestrent la restauration du bout du doigt, selon un mécanisme présentant des similitudes avec celui de l'œuvre chez la salamandre.

Chez cet amphibien amputé d'une patte, des cellules de l'épiderme migrent et ferment la blessure, suivies de cellules musculaires et d'autres assurant la cohésion (des fibroblastes). Les cellules de l'épiderme forment un chapeau qui produit des signaux déclenchant la croissance des autres cellules. Les nerfs se prolongent vers le chapeau et émettent à leur tour des signaux. Les autres cellules se différencient alors – elles retournent à un état moins spécialisé – et prolifèrent, constituant un bourgeon innervé, le blastème. À mesure qu'il grandit, le blastème forme

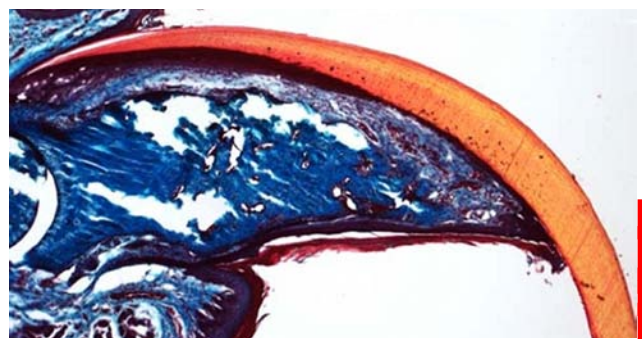
le contour du nouveau membre tandis que les cellules se différencient à nouveau en os, muscle, fibroblastes ou tendons.

Les biologistes ont montré que chez la souris, une population de cellules souches sous la base de l'ongle permet à ce dernier de se régénérer. Ces cellules se différencient continuellement en un tissu, l'épithélium, lequel se kératinise en ongle. Cette différenciation est activée par une voie de signalisation connue pour son rôle dans le développement embryonnaire, la cascade Wnt. Et cette même cascade active aussi la formation du blastème en attirant les nerfs vers l'extrémité du doigt, comme elle le fait dans l'épiderme de l'embryon. L'innervation active une autre voie, la cascade FGF, qui déclenche la prolifération de cellules souches du blastème, les cellules mésenchymateuses, et leur différenciation en os.

Sans activation par les cascades Wnt et FGF, le doigt ne se régénère pas. Or ces voies sont aussi en jeu dans la régénération chez la salamandre. Les cellules souches de l'ongle des mammifères seraient-elles les vestiges d'un mécanisme commun de régénération ? C'est en tout cas une piste de recherche pour la régénération des membres amputés.

→ M.-N. C.

Nature, en ligne le 12 juin 2013



Le bout de doigt d'une souris, régénéré cinq semaines après amputation. La régénération n'a pas lieu si la voie de signalisation Wnt est bloquée.

Géochimie

L'eau ne lubrifie pas le manteau terrestre

Les géophysiciens pensaient depuis longtemps que la capacité singulière des roches constituant le manteau supérieur de la Terre (sous la croûte terrestre) à se déformer était due à leur hydratation. L'équipe de Tomoo Katsura, de l'Université de Bayreuth en Allemagne, vient de mettre en évidence un indice qui contredit cette idée.

Les chercheurs ont décidé d'estimer l'influence de l'eau sur la viscosité du matériau mantellique en étudiant la diffusion du silicium. En effet, les roches peuvent se déformer soit par rassemblement des dislocations (ruptures locales de la structure cristalline), soit par déplacement d'atomes dans la structure cristalline, mais ce sont les atomes qui diffusent le plus lentement – les atomes de silicium – qui contrôlent l'ensemble du processus. Les géochimistes ont donc entrepris de mesurer la diffusion du silicium dans le matériau en fonction de sa teneur en eau.

Pour ce faire, T. Katsura et ses collègues ont choisi une roche mantellique modèle, de la forstérite, qu'ils ont dopée à l'eau sous 80 000 atmosphères dans une presse à enclumes de diamant et à 1 600-1 800 kelvins, soit les conditions de pression et de température régnant à 200 kilomètres de profondeur. Après avoir ainsi préparé des échantillons contenant de 0,1 à 1 000 parties d'eau par million, ils les ont couverts de silicium et replacés dans la presse. La spectrométrie de masse a ensuite livré l'enrichissement du cristal en silicium.

À partir de ces données, un modèle permet de déterminer la viscosité du matériau. Il en ressort que l'eau n'a qu'une influence marginale sur cette viscosité. Ainsi, l'idée que l'eau est le lubrifiant de la tectonique, c'est-à-dire qu'elle expliquerait elle seule la faible viscosité du manteau supérieur, qui rend possible le mouvement des plaques tectoniques, semble fautive. Pour les géochimistes, c'est une vieille explication fourre-tout qui risque de disparaître. À vérifier par d'autres expériences...

→ F. S.

Nature, vol. 498, pp. 213-215, 2013.

Planétologie

Plongée dans les orages de Saturne

Juniper a sa Grande Tache rouge, Saturne a aussi ses tempêtes impressionnantes avec ses Grandes Taches blanches. Ces orages se forment une fois tous les 28 ans environ. La première a été vue en 1876, et ce n'est que la sixième qui a été observée par la sonde Cassini en 2010. Ces phénomènes rares sont mal connus. Avec les données de Cassini, Enrique García-Melendo, de l'Institut des sciences spatiales près de Barcelone, en Espagne, et ses collègues ont étudié le mécanisme qui produit ces orages.

L'orage de 2010 était constitué d'une tête d'environ 7 000 kilomètres de diamètre et d'une longue traînée faisant presque le tour de la planète à la latitude de 32° Nord. Accompagné d'impor-

antes décharges électrostatiques, l'orage a duré plus de sept mois.

Les chercheurs ont montré que cet orage se serait formé à partir de l'ascension d'air humide due à une source de chaleur située 800 kilomètres sous le sommet des nuages de Saturne. En s'élevant, la vapeur s'est refroidie et condensée pour former des cumulus qui s'étendaient jusqu'à 44 kilomètres au-dessus du plafond nuageux. Les vents atmosphériques, avec des vitesses atteignant 500 kilomètres par heure, ont déformé l'amas de nuages, qui s'étiré en une longue queue. Il reste à comprendre pourquoi ces orages sont si rares et comment ils persistent aussi longtemps.

→ S. B.

E. García-Melendo et al., Nature Geoscience, vol. 6, pp. 525-529, 2013.

En 2010, un orage s'est formé dans l'hémisphère Nord de Saturne. Il a duré près de sept mois.



J. KASSEL

DERNIÈRE minute...

OS ET VITAMINE D

La carence en vitamine D est associée à une absorption insuffisante de calcium par l'organisme, ce qui nuit à la santé des os et peut entraîner de l'ostéoporose. L'équipe de Björn Busse, du Centre médical universitaire de Hambourg, en Allemagne, a établi par des expériences et des mesures détaillées qu'une carence en vitamine D ne fait pas que diminuer la masse osseuse : elle est associée à un vieillissement du tissu osseux.

Lequel accumule les microfissures et est, de ce fait, fragilisé. Cela explique les risques accrus de fractures en cas de carence.

DES CŒURS EN CHŒUR

Le rythme cardiaque de tous les membres d'une chorale augmente et diminue aux mêmes moments. C'est ce qu'ont montré Björn Wijkhoff, de l'Université de Göteborg, en Suède, et ses collègues sur un groupe de 15 personnes âgées de 18 ans, qui devaient effectuer divers

exercices de chant pendant qu'on mesurait leur rythme cardiaque. Les chercheurs expliquent cette synchronisation par le contrôle de la respiration nécessité par le chant, le rythme cardiaque augmentant lors de l'expiration et diminuant pendant l'inspiration.

Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur www.pourlascience.fr

LE DÉRÈGLEMENT DU CLIMAT N'EST PAS UNE FATALITÉ !



Venez assister aux conférences
des spécialistes lors de la

**6^e Université d'été
à Aix-en-Provence**

Jeudi 12 septembre 2013 à 20h30

Entrée libre

« **Sauvons le Climat** » est un collectif d'associations dont l'objectif est de comprendre et de diffuser les connaissances acquises sur le problème du réchauffement climatique, et sur les actions qui permettront d'en limiter l'ampleur.

Ses travaux s'appuient sur un conseil scientifique regroupant des personnalités dont des membres des Académies des Sciences, des Technologies et de Médecine

Thème de la conférence du jeudi 12 septembre :
« **Conséquences sanitaires prévisibles du réchauffement climatique** » par **Bernard SWYNGHEDAUW**
directeur de recherches émérite à l'INSERM)

Université d'été
12-14 septembre 2013
Aix-en-Provence
Centre de la Baume
1770 Chemin de la Blaque

Découvrez notre site et venez adhérer à notre association :
www.sauvonsleclimat.org/

Comment diminuer les gaz à effet de serre ?
Voir notre scénario de transition écologique : Négatep

Vidéos à visionner :
« Un autre monde est possible », « Doit-on craindre la Science ? »

Retrouvez-nous aussi sur Facebook :
<https://www.facebook.com/groups/sauvonsleclimat>

et suivez-nous sur Twitter : @sauvonsleclimat

sauvonsleclimat.org
idées pour le futur, actions au présent

POINT DE VUE

Loi Fioraso : quel dommage !

La loi relative à l'enseignement supérieur et à la recherche adoptée en juin dernier au Sénat est loin de répondre aux attentes de la communauté scientifique.

William ROSTÈNE

L'Assemblée nationale, puis le Sénat, ont adopté, par une faible majorité, le projet de loi relatif à l'enseignement supérieur et à la recherche, présenté par la ministre Geneviève Fioraso. L'histoire montre qu'un pays qui souhaite garder une place dominante dans le concert des grandes nations doit maintenir un potentiel de recherche et de développement lié à l'innovation, ainsi qu'un enseignement supérieur de qualité. Ces principes ont été, à juste titre, rappelés par la ministre en préambule du projet de loi, loi tant attendue par la communauté universitaire et les chercheurs après les égarements des gouvernements précédents.

Hélas, ni le gouvernement ni la classe politique ne semblent avoir pris conscience de l'ampleur des défis présents et futurs. Si le projet de loi a été légèrement amélioré par les amendements de quelques sénateurs, force est de constater que le texte ne marque pas de rupture franche avec les années passées, malgré une forte contestation de la communauté scientifique.

Formulé à l'issue des Assises de l'enseignement supérieur et de la recherche (de juillet à décembre 2012), le projet de loi avait pour principal objectif la réussite des étudiants, la simplification du système et le rayonnement de la recherche française. La recherche se révèle pourtant le parent pauvre de cette loi. Le texte de loi ne tient guère compte des propositions pragmatiques émises par divers comités, ni des nombreuses contributions apportées pendant les Assises. Il réaffirme les grands principes de la loi sur l'autonomie des universités, modifie la compo-

sition des conseils, rappelle ce que représente l'enseignement supérieur pour notre pays, sans pour autant évaluer les besoins et les moyens qui pourraient offrir à nos universités une meilleure compétitivité. Seule une modification apportée par un amendement obligera le ministère à élaborer pour cinq ans un livre blanc de programmation pluriannuelle des moyens, sans préciser s'ils seront en hausse ou en baisse.

La loi sur l'autonomie des universités continue à servir de prétexte au désengagement financier de l'État. Les universités avant

SI LA LOI FAIT UNE LARGE PART DE L'ORGANISATION INTERNE DES UNIVERSITÉS ET À L'ENSEIGNEMENT, ELLE LAISSE UNE FAIBLE PLACE À LA RECHERCHE.

accepté cette loi sont dans une situation financière plus que tendue. Une vingtaine ont enregistré un déficit pour la deuxième année consécutive sur la période 2010-2011, précise un rapport déposé au Sénat le 24 avril dernier. Selon le rapport de la Cour des comptes sur le financement public de la recherche publié en juin dernier, la part des financements de l'État destinée aux projets de recherche a certes augmenté entre 2006 et 2011, mais les subventions pour charges n'ont pas suivi, entraînant une baisse récurrente du financement global.

Si la loi fait une large part à l'organisation interne des universités et à l'enseignement, elle laisse une faible place à la recherche. Quel gâchis ! Le gouvernement avait une occasion unique de réaffirmer les qualités de la recherche française, de présenter de

grands projets, mais il a préféré confier la définition de ces grandes lignes à un conseil stratégique de la recherche et aux cinq « alliances thématiques », reculant d'autant des prises de décision stratégiques urgentes pour donner aux chercheurs et aux jeunes diplômés les moyens d'être présents sur la scène internationale.

La loi Sauvadet adoptée en mars 2012, par exemple, doit être adaptée. Visant à améliorer les conditions d'emploi des agents contractuels, elle est incompatible avec le métier de chercheur (qui nécessite des années de pratique pour devenir compétitif) et risque d'accroître la fuite des cerveaux. De même, les contrats de site regroupant plusieurs partenaires régionaux, créés pour une plus grande visibilité internationale, semblent inutiles : déjà réalité dans les régions qui financent depuis longtemps la recherche, ce type d'agglomérat (pôles de compétitivité, etc.) n'a pas vraiment apporté de plus-value.

En ce qui concerne le fonctionnement de la recherche, la communauté scientifique avait souhaité la disparition de l'Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (AERES), mise en place en 2007 pour évaluer les équipes d'enseignement et de recherche. Très critiquée pour ses évaluations inégales et coûteuses, elle est inutile puisqu'il existe déjà des instances d'évaluation compétentes dans les grands organismes de recherche (CNRS, INSERM, INRIA, INRA, IRD...). Grande innovation : l'AERES est remplacée par un Haut Conseil (HCERES) aux attributions floues. Il eût été préférable de lui confier l'évaluation de ce qui n'est pas traité dans les comités de chercheurs : les grandes orientations, la

formation et la gestion administrative des universités et des organismes de recherche.

L'évaluation des projets des entreprises pour l'obtention du crédit-impôt-recherche, jusqu'à présent inexistante, aurait pu aussi être confiée à ce Haut Conseil. Il n'est d'ailleurs pas précisé si l'attribution d'un tel crédit, touchant à l'innovation, à la recherche et au développement, est liée à l'embauche d'un doctorant ou d'un postdoctorant sur le projet, comme cela avait été demandé.

L'Agence nationale de la recherche, qui finance les projets de recherche depuis 2005, avait elle aussi fait l'objet de nombreuses critiques pour ses appels à projets plus consommateurs de temps que productifs. Elle n'est pas plus modifiée, malgré un amendement qui pointait ses effets néfastes, soulignés par la Cour des comptes en juin dernier.

Entre la baisse de dotation de l'agence et le nombre croissant de soumissions, le taux de succès moyen aux appels à projets est passé de 26 pour cent en 2005 à 20 pour cent en 2012. Sur 49 000 projets soumis entre 2005 et 2012, seuls 11 000 ont été financés... Une perte de temps considérable.

Cette loi manque d'ambition. Elle montre que les élus n'ont pas mesuré l'enjeu d'une telle réforme. Dommage qu'elle ne reste qu'une loi d'orientation et que députés et sénateurs méconnaissent le milieu de la recherche et ce qu'il peut apporter. Un rêve a été brisé. Heureusement, la loi comporte quelques avancées : une clarification des filières universitaires, une évaluation biennale des mesures prises par chaque établissement en faveur de la qualité de vie des étudiants, de leur réussite et de leur insertion profession-

nelle, un bilan annuel des actions entreprises pour résorber la précarité du personnel. Elle rappelle aussi l'importance du numérique et de la culture scientifique, technologique et industrielle, aujourd'hui si nécessaire pour se faire une opinion sur les grands problèmes posés par l'augmentation des connaissances scientifiques, la compétence en revenant aux régions. Gardons quelque espoir que des orientations et des moyens seront donnés afin que notre pays conserve une place primordiale dans l'enseignement, l'innovation et la recherche.

William RUSTENE est président de la Société de biologie.



26

www.motulscience.com

DEVELOPPEMENT DURABLE

Fuites d'eau dans les réseaux : une mine d'économies potentielles

D'énormes quantités d'eau s'échappent des réseaux de distribution. Diverses techniques permettent de limiter ces pertes, mais il reste à les appliquer partout.

Lamine DIAKHATE, Didier SINAPAH et David DUCCINI

De moins en moins d'eau potable pour une population de plus en plus nombreuse : telle est la difficile équation que nous devons résoudre. Le réchauffement climatique appauvrit les nappes phréatiques en accroissant l'évaporation, tandis que les pollutions d'origine urbaine, industrielle ou agricole augmentent – aujourd'hui, environ deux millions de tonnes de déchets sont déversés chaque jour dans les lacs et les cours d'eau du monde. En conséquence, la quantité d'eau disponible par habitant diminue. En 1950, chacun pouvait consommer 16 800 mètres cubes d'eau par an sans risque



pour les réserves. Ce chiffre n'était plus que de 7 300 mètres cubes en 2000 et tombera à 4 800 mètres cubes en 2025, quand la planète comptera huit milliards d'habitants. Même si ces valeurs restent très supérieures à la consommation réelle, elles illustrent la rareté des ressources en eau. Celle-ci manque déjà en certains endroits, telles les zones arides d'Afrique subsaharienne et les zones surpeuplées d'Asie.

Dès lors, des économies sont nécessaires. La limitation des pertes dans les réseaux de distribution en représente une mine potentielle. On estime ces pertes à plusieurs centaines de millions de mètres



→ www.pourlascience.fr/emploi

Connectez-vous au service
offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA
SCIENCE

en partenariat avec
naturejobs



■ Chaque semaine, plus
de **8000 offres d'emploi**
dans le secteur des sciences.

■ En un clic la **sélection**
des postes à pourvoir
en France et dans les pays
francophones ou voisins.

■ Une équipe Naturejobs
spécialisée, **au service des**
recruteurs francophones.
Contact : Muriel Lestringuez
E-mail : m.lestringuez@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA
SCIENCE
le site de référence
de l'actualité scientifique

tubes d'eau par an dans le monde, surtout via des fuites (plus marginalement par des ruptures de canalisations ou des débordements dans les réservoirs). Les conduites métalliques sont corrodées par l'eau et par divers éléments chimiques du sol, et usées par maintes contraintes mécaniques : variations de pression, dilatation différentielle (due à la différence de température entre le sol et l'eau), etc.

Pour diminuer les pertes, on cherche à optimiser la conception, l'exploitation et l'entretien des réseaux. Des modèles de vieillissement des matériaux prédisent les canalisations et les branchements où le risque de fuite est le plus grand, ce qui permet de les renouveler en priorité lors de plans annuels d'entretien. Grâce à des modèles hydrauliques, on simule le fonctionnement des réseaux en fonction des aménagements possibles. On optimise ainsi leur dimensionnement, afin notamment de minimiser la pression dans les conduites – et donc le débit des fuites.

Un autre grand facteur de progrès est la mise en place progressive des *smart networks* (réseaux intelligents), des réseaux de distribution d'eau surveillés et pilotés en temps réel. Des capteurs y détectent instantanément les anomalies de fonctionnement en mesurant le débit, la pression ou le bruit, et transmettent leurs données à des outils de gestion centralisés. Ainsi, une augmentation locale du débit et du bruit pour une consommation constante des clients est probablement associée à une fuite. En outre, on adapte en permanence la pression d'eau dans les conduites, afin de la maintenir à la valeur minimale nécessaire à la satisfaction des besoins. En plein essor, cette technique est conseillée par l'IWA (*International Water Association*). Outre la minimisation du débit des fuites, elle permet de limiter les ruptures de canalisations.

La dernière méthode de lutte contre les fuites – la seule utilisée autrefois – consiste à mener des campagnes d'inspection sur le terrain. Plusieurs techniques existent. On se sert par exemple de capteurs acoustiques mobiles : un opérateur marche le long de la

conduite, afin de détecter depuis la surface les bruits anormaux associés aux fuites. Dans les années 1990, on a développé des techniques d'injection d'hydrogène ou d'hélium dans le réseau ; là encore, un opérateur suit la conduite avec un détecteur, une concentration anormale de gaz étant le signe d'une fuite.

Les distributeurs disposent donc de nombreux moyens pour réduire les pertes en eau. Cependant, leur application est assez inégale, comme la qualité de conception des réseaux : il existe de grandes disparités entre

DES RÉSEAUX SURVEILLÉS ET PILOTÉS

en temps réel sont mis en place
pour réduire les pertes d'eau.

les régions et les pays. En France, les pertes varient entre 10 et 25 pour cent de l'eau entrante. Ailleurs, comme dans certaines villes d'Inde, elles peuvent atteindre 50 pour cent.

Il faut donc davantage diffuser les techniques de lutte contre les fuites. Il faut en outre les choisir en fonction des caractéristiques de chaque système d'approvisionnement en eau. Certains réseaux mal dimensionnés, par exemple, risqueraient d'être dégradés par de fortes et fréquentes variations de pression. La connaissance du système par le distributeur, son savoir-faire et son expérience sont alors cruciaux pour l'élaboration d'un plan d'action adapté.

Outre la limitation des fuites, un autre levier d'économie associé aux réseaux serait de diminuer les pertes dites commerciales : il s'agit des volumes d'eau distribués aux clients, mais non payés. Elles résultent surtout de fraudes ou d'erreurs de facturation liées à des compteurs défectueux. On les estime à 30 millions de mètres cubes par jour dans les pays en développement. Or en améliorant le paiement, on découragerait davantage le gaspillage. On aurait une meilleure équité sociale, et les distributeurs pourraient profiter de ces revenus pour mieux entretenir leur réseau.

Lamine DIAKHATE, Didier SINAPAH et David DUCCINI sont respectivement ingénieur, coordinateur technique et directeur technique adjoint de l'entreprise Suez Environnement.

SciLogs

La nouvelle communauté de
blogueurs scientifiques francophones

Grâce à **SciLogs.fr**, dialoguez avec des chercheurs et acteurs du monde des sciences aux points de vue riches et variés. De blog en blog, explorez la science avec ceux qui la font, la décryptent, l'analysent : résultats de recherche, applications pratiques, perspectives insolites, débats éthiques et politiques... Pour vivre la science au quotidien !

Signal sur bruit

Richard Tailler
Astrophysicien,
professeur
chercheur
au LAPTh

PsychoInfo

Véronique Palazzoli
Médecin psychiatre, à Nice
et à l'Université Internationale
Benjamin Franklin à Alexandrie
Égypte

Cerveau aux hormones

William Rostène
et **Jacques Epelbaum**
Neuroscientifiques
Directeurs de recherche
Ministère

Complexité

Jean-Paul Delahaye
Mathématicien, informaticien,
philosophe et journaliste
Logique et calcul
dans Pour la Science

Réflexions stochastiques

Jean-Jacques Kupiec
Docteur en biologie,
ingénieur de recherche
INSERM au Centre
d'Immunologie
de Marseille

Prospective spatiale

Christophe Bonnal
Expert en astrophysique,
président des commissions
« ÉTATS SPATIAUX »
« ÉTATS SPATIAUX »
« ÉTATS SPATIAUX »

Best of Bestioles

Loïc Manin
Rédacteur en chef
Télérama
Journal de la Science

Retrouvez
aussi les autres
communautés
« SciLoas » : déjà
plus de 140 blogueurs
scientifiques
à l'international !



Connectez-vous
maintenant
pour découvrir
www.SciLogs.fr



Suivez les dernières actualités
des blogueurs également
sur les réseaux sociaux

Proposé par

POUR LA
SCIENCE

ENTRETIEN

Internet au bord du précipice

Pour empêcher la Toile de s'effondrer sous le poids des données, le réseau doit radicalement changer la manière dont il traite l'information, déclare le directeur des Laboratoires Bell.

Entretien avec Markus Hofmann

Le nombre de téléphones intelligents, tablettes et autres gadgets connectés au réseau Internet dépassera celui des êtres humains avant la fin de l'année. Peut-être plus significatif encore, les appareils portables plus rapides et puissants qui arrivent sur le marché produisent et consomment du contenu à un rythme sans précédent. Les données globales des appareils portables ont bondi de 70 pour cent en 2012, d'après un récent rapport de Cisco, qui fabrique une bonne partie du

matériel faisant fonctionner Internet. Mais la capacité de l'infrastructure du réseau mondial étant limitée, beaucoup de spécialistes se demandent quand cette limite supérieure sera atteinte et ce que nous aurons quand cela arrivera.

Il est bien sûr possible d'augmenter la capacité du réseau, de rajouter dans les câbles des fibres optiques pour transporter plus de données ou de décharger le trafic sur des réseaux satellites plus petits, mais ces mesures ne font que repousser l'inévitable. La solution serait de

rendre plus intelligent l'ensemble de la structure. Cela demanderait deux ingrédients principaux : des ordinateurs et autres appareils capables de traiter au préalable et éventuellement filtrer ou agréger leur contenu avant de le déverser sur le réseau, ainsi qu'un réseau qui comprend mieux ce qu'il doit faire de ce contenu, plutôt que de n'y voir qu'un flux infini et indifférencié de bits et d'octets.

Pour apprendre comment ces avancées majeures pourraient être accomplies, nous nous sommes entretenus avec

Markus Hofmann, directeur des Laboratoires Bell de recherche à Murray Hill, dans le New Jersey (États-Unis) – laboratoires constituant depuis 2009 la branche de recherche et développement d'Alcatel-Lucent et qui, depuis leur création en 1925, ont activé le développement du transistor, du laser, des CCD et bien d'autres technologies pionnières du XX^e siècle. M. Hofmann et son équipe voient le salut dans les « réseaux d'information », une approche qui promet d'augmenter la capacité d'Internet en augmentant son « intelligence ».

POUR LA SCIENCE

Markus Hofmann, comment savons-nous que les limites de l'infrastructure actuelle des télécommunications s'approchent ?

→ **MARKUS HOFMANN** : Les signes sont subtils, mais ils sont là. Un exemple personnel : quand j'utilise Skype pour envoyer à mes parents en Allemagne des vidéos en direct de mes enfants jouant au hockey, la vidéo se fige parfois aux moments les plus palpitants. En général, cela n'a pas lieu très souvent, mais c'est de plus en plus fréquent, signe que les réseaux commencent à être débordés par le volume de données qu'on leur fait transporter.

Nous savons que Dame Nature nous pose certaines limites : vous ne pouvez pas transporter

plus d'une certaine quantité d'information par un canal de communication donné. Ce phénomène est ce qu'on nomme la limite non linéaire de Shannon (du nom de l'ancien mathématicien Claude Shannon, des Bell Telephone Laboratories), et elle nous dit jusqu'où nous pouvons pousser les technologies d'aujourd'hui. Nous sommes déjà très proches de cette limite, à un facteur deux environ.

Autrement dit, quand le trafic sur le réseau aura doublé par rapport à aujourd'hui (ce qui pourrait avoir lieu d'ici quatre à cinq ans), nous aurons dépassé la limite de Shannon. Cela nous indique que nous allons nous heurter à un obstacle fondamental. Il ne nous est pas possible de dépasser cette limite, pas plus qu'on ne peut augmenter la vitesse de la lumière. Il nous faut

donc travailler avec ces limites et trouver des stratégies pour maintenir le niveau de croissance dont nous avons besoin.

P.S.

Comment empêcher Internet d'atteindre « la limite » ?

→ **MARKUS HOFMANN** : La façon la plus évidente est d'augmenter la bande passante en posant plus de fibres. Au lieu de se contenter d'un unique câble transatlantique à fibres optiques, par exemple, vous en installez deux, cinq ou dix. C'est l'approche par la force brute, qui est très coûteuse : il faut creuser le sol et poser la fibre, il faut de multiples amplificateurs, émetteurs et récepteurs optiques, et ainsi de suite. Pour



Markus Hofmann

que cela soit économiquement viable, nous devons non seulement intégrer de multiples canaux dans une unique fibre optique, mais également combiner de multiples émetteurs et récepteurs à l'aide de nouvelles technologies telles que l'intégration photonique. Cette approche constitue le « multiplexage spatial ».

Toutefois, se contenter de renforcer l'infrastructure existante ne suffira pas pour répondre aux besoins croissants des communications. Ce dont nous avons besoin, c'est d'une infrastructure qui ne voie plus simplement dans les données brutes des bits et des octets, mais plutôt des morceaux d'information ayant une pertinence pour l'utilisateur d'un ordinateur ou d'un téléphone. En consultant la météo, est-ce que vous voulez connaître la température. La

vitesse du vent et la pression atmosphérique, ou est-ce que vous voulez simplement savoir comment vous habiller ? Telle est l'idée des réseaux d'information.

PLS

En quoi les « réseaux d'information » diffèrent-ils de l'Internet d'aujourd'hui ?

→ **MARKUS HOFMANN :** De nombreuses personnes, à propos d'Internet, parlent de réseau « stupide », mais je n'aime pas ce terme. Ce qui a été au départ le moteur d'Internet, c'était l'échange asynchrone (pas en temps réel) de documents et de données. La plus forte exigence vis-à-vis du système était celle de la résilience : il devait être capable de continuer

à fonctionner même si un ou plusieurs nœuds (ordinateurs, serveurs, etc.) s'arrêtaient de fonctionner. Et le réseau était conçu pour considérer les données comme du simple trafic numérique, et non pour interpréter la signification de ces données.

Aujourd'hui, nous faisons d'Internet un usage qui nécessite des performances en temps réel, qu'il s'agisse de regarder des vidéos diffusées en flux (*streaming*) ou de téléphoner. En même temps, nous engendrons beaucoup plus de données. Le réseau doit devenir plus informé sur le contenu qu'il véhicule afin de mieux établir les priorités dans les acheminements et de fonctionner plus efficacement.

Par exemple, si je fais une conférence vidéo dans mon bureau et que je détourne la tête de l'écran pour bavarder avec quelqu'un qui vient d'entrer dans la pièce, le dispositif devrait être capable d'interrompre la transmission vidéo jusqu'à ce que mon attention revienne vers l'écran. Le système reconnaîtrait que mon attention est engagée ailleurs et ne gaspillerait pas la bande passante pendant que je parle avec la personne dans mon bureau.

PLS

Comment rendre un réseau plus informé du contenu qu'il transporte ?

→ **MARKUS HOFMANN :** Il y a différentes approches. Si vous voulez en savoir davantage sur les données qui traversent un réseau (par exemple pour envoyer au serveur Web le plus proche une requête d'utilisateur pour une page Web), alors vous utilisez un logiciel pour jeter un coup d'œil dans le paquet de données, ce qu'on appelle DPI (*Deep Packet Inspection*, inspection des paquets en profondeur).

Imaginez une lettre physique que vous envoyez par la poste dans une enveloppe portant l'adresse du destinataire. Le service postal se moque de ce que dit la lettre ; seule l'adresse le concerne. C'est ainsi que fonctionne Internet aujourd'hui par rapport aux données. Avec le DPI, un logiciel dit au réseau d'ouvrir l'enveloppe des données et de lire au moins une partie de ce qui est dedans. Mais vous ne pouvez obtenir qu'une quantité limitée d'information de cette manière, et cela nécessite une importante puissance de calcul. De plus, si les données à l'intérieur du paquet sont cryptées, le DPI ne fonctionnera pas.

Une meilleure option serait d'étiqueter les données et de donner au réseau des instructions sur la façon de manipuler différents types de données. Il y aurait une règle qui dicterait qu'un flux vidéo a priorité sur un courriel, sans avoir besoin de révéler exactement ce qu'il y a à l'intérieur du flux vidéo ou du courriel. Le réseau prendrait simplement en compte ces étiquettes de données au moment de prendre les décisions d'acheminement.

PLS

Les données qui circulent sur Internet ont déjà des étiquettes d'identification – pourquoi ne pas utiliser celles-là ?

→ **MARKUS HOFMANN :** Tout dépend du niveau auquel ces étiquettes sont utilisées. Par exemple, les paquets de données qui utilisent le protocole Internet ont un en-tête qui inclut la source et l'adresse de destination. On pourrait les considérer comme des « étiquettes », mais ils apportent une information très limitée. Ils n'indiquent pas quel site Web l'utilisateur fait une requête. Ils ne disent pas si les données appartiennent à un flux vidéo (en temps réel) ou si elles peuvent être traitées par lots. Je parle d'étiquettes plus riches, de niveau supérieur, ou de métadonnées qui peuvent en partie être liées à ces étiquettes de plus bas niveau.

PLS

Avec la hiérarchisation du trafic sur la base du contenu en information, le réseau risquerait-il de favoriser certains types de trafic aux dépens d'autres types ?

→ **MARKUS HOFMANN :** Cela ne devrait pas être différent de ce qu'on observe déjà, par exemple, sur les routes et dans les rues. Quand nous entendons un véhicule de secours avec ses sirènes hurlantes, nous sommes tous censés nous ranger sur le côté et dégager la voie afin de laisser ce véhicule passer aussi facilement et rapidement que possible, ce qui permet parfois de sauver des vies. Dans ce cas, l'étiquette est la sirène – dès lors que nous reconnaissons qu'il y a une urgence, nous n'avons pas besoin de savoir qui est dans le véhicule ni la nature de son problème, et nous nous comportons en conséquence. Devrions-nous également donner à certains paquets circulant sur Internet la

BIOGRAPHIE

Markus HOFMANN, informaticien, dirige *Bell Labs Research*, l'organisme de recherche de la Société *Alcatel-Lucent* situé dans le New Jersey, aux États-Unis. Il a rejoint les *Laboratoires Bell* en 1998, après avoir travaillé à l'Université de Karlsruhe, en Allemagne.

BIBLIOGRAPHIE

M. Hofmann et L. Beaumont, *Content Networking*, Morgan Kaufmann Publishers, 2005.

priorité en cas d'urgence ? Tout est affaire de transparence et de comportements concertés – sur la route comme sur Internet.

PLS

Même si un réseau plus intelligent peut aiguiller les données plus rationnellement, le contenu croît exponentiellement. Comment réduire la quantité de trafic qu'un réseau doit gérer ?

→ **MARKUS HOFMANN :** Nos téléphones, ordinateurs et autres gadgets engendrent une bonne quantité de données brutes que nous envoyons alors à des centres de données pour les traiter et les stocker. Dans l'avenir, nous ne pourrions plus recalibrer l'envoi de toutes ces données autour du globe pour qu'elles soient traitées dans un centre. Nous devrions plutôt nous tourner vers un modèle où les décisions sur le sort des données sont prises avant que ces dernières ne soient mises sur le réseau.

Par exemple, si vous avez une caméra de sécurité à l'aéroport, vous programmez la caméra, ou le petit serveur contrôlant de multiples caméras, pour faire localement de la reconnaissance faciale, en utilisant une base de données stockée dans la caméra ou le serveur, avant d'envoyer de l'information sur le réseau.

PLS

Comment les réseaux d'information répondent-ils aux exigences de respect de la vie privée ?

→ **MARKUS HOFMANN :** Pour l'instant, le respect de la vie privée est binaire : soit vous préservez votre vie privée, soit vous y renoncez presque complètement pour obtenir certains services personnalisés, comme des suggestions musicales ou des bons de réduction en ligne. Il faudrait trouver un juste milieu, qui permettrait aux utilisateurs de contrôler leur information.

Le principal problème est qu'il faut que cela soit simple pour l'utilisateur. Voyez comme il est compliqué de gérer votre vie privée sur les réseaux sociaux. Par exemple, vous retrouvez vos photographies dans la galerie de photos de personnes que vous ne connaissez même pas. Il devrait y avoir l'équivalent numérique d'un bouton de réglage qui vous permette

Je trouve un compromis entre vie privée et personnalisation. Plus je révèle de choses sur moi-même, plus je reçois des services personnalisés. Mais je peux aussi faire fonctionner cela dans l'autre sens : si je souhaite fournir des renseignements moins détaillés, je peux quand même recevoir des offres personnalisées, quoique moins ciblées...

PLS

Les cyberattaques tendent à profiter du caractère ouvert d'Internet, si bien que la sécurité est largement laissée à la charge des ordinateurs et autres appareils qui se connectent au réseau. Quel impact les réseaux d'information auraient-ils sur la sécurité d'Internet ?

➔ **MARKUS HOFMANN** : L'approche des réseaux d'information apporte à l'infrastructure globale

l'avantage de connaissance sur le trafic du réseau, ce qui pourrait être utile pour identifier et atténuer certains types d'attaques dirigées contre Internet.

D'autres facteurs pourraient compliquer cela. Je suppose (et j'espère) que le trafic de données sera de plus en plus crypté afin de contribuer à apporter véritablement de la sécurité et une protection de la vie privée. Bien sûr, une fois que les données sont cryptées, il devient difficile d'en extraire de l'information. C'est un défi pour la recherche : il faudra inventer de nouvelles méthodes cryptographiques, lesquelles préserveraient le secret tout en permettant de réaliser certaines manipulations mathématiques sur l'information chiffrée.

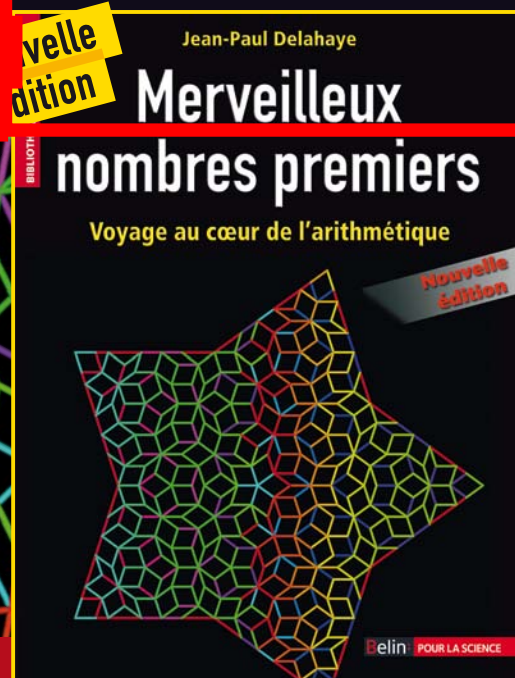
Imaginez par exemple que le revenu de chaque foyer d'une certaine région soit crypté et stocké sur un serveur du nuage (du cloud), de telle sorte que personne, à l'exception du

propriétaire autorisé, ne puisse lire les montants. Il serait utile que ces montants soient cryptés de telle façon qu'un logiciel tournant sur le nuage puisse calculer le revenu moyen par ménage de la région, sans identifier les foyers précis, uniquement par des opérations portant sur les montants cryptés.

Une autre approche serait de développer des moyens astucieux de gérer des clefs de cryptage afin qu'elles puissent être partagées sans que ce partage compromette la sécurité. Probablement fait, rien de tout cela ne devrait être une charge supplémentaire pour l'utilisateur. Cet aspect est à la fois la clef et le défi. Combien d'utilisateurs cryptent leurs courriels aujourd'hui ? Presque personne, parce que c'est du travail en plus.

Propos recueillis par Larry Greenemeier, journaliste à Scientific American.

Merveilleux nombres premiers



Voyage au cœur de l'arithmétique

Jean-Paul Delahaye

Les nombres premiers fascinent. Connus dès les débuts de l'arithmétique, ils ont excité la curiosité de milliers de mathématiciens. Ils sont au cœur de la science des nombres, car tout entier se décompose de façon unique en un produit de facteurs premiers. Dans cet ouvrage, l'auteur mêle éclaircissements théoriques et anecdotes piquantes.

Éditions Belin/Pour la Science 2013
196 pages — 28 euros — ISBN 978-2-8424-5117-2

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr

VRAI OU FAUX

Faut-il s'étirer après le sport ?

Ce n'est pas prouvé. Cela ne diminue presque pas les courbatures et risque de nuire aux muscles. En revanche, des étirements plus réguliers peuvent être bénéfiques.

Guillaume Millet



On préconise souvent de s'étirer après le sport. Certains pensent que cela favorise la récupération, en augmentant le débit sanguin : des métabolites (petites molécules produites par les cellules) qui s'accumulent dans les muscles pendant l'effort et qui perturbent leur contraction seraient ainsi évacués. Cependant, aucune étude scientifique ne l'a confirmé. Une seconde vertu communément attribuée aux étirements est l'atténuation des raideurs musculo-tendineuses (les courbatures) qui surviennent après les efforts soutenus. Est-ce vraiment le cas ?

En 2011, Robert Herbert, de l'Institut George pour la santé mondiale, à Sydney, en Australie, a publié une synthèse portant sur 12 études de la question. Lors de ces études, les participants étaient interrogés sur l'intensité de leurs courbatures au lendemain d'une séance de sport, suivie ou non d'étirements. R. Herbert a conclu que les étirements consécutifs au sport ont des effets très faibles : en moyenne, les douleurs perçues un jour après l'effort diminuent de moins de un pour cent.

Notons toutefois que l'une des 12 études estimait cette diminution à quatre pour cent, ce qui commence à représenter un soulagement perceptible. Sa crédibilité est renforcée par le nombre élevé de participants (plus de 1 200, contre 10 à 30 habituellement pour ce genre d'études), mais ses conclusions sont à nuancer : il était demandé aux participants de s'étirer avant et après le sport, de sorte qu'on ne peut isoler les effets

des étirements postérieurs à la séance de ceux qui lui sont antérieurs.

Quoi qu'il en soit, cela suggère que les étirements peuvent avoir des effets positifs. Et en effet, certaines études indiquent que, pratiqués régulièrement, ils renforcent les muscles. Les dommages musculaires associés au sport et leurs conséquences (inflammations, gonflements des fibres musculaires) seront alors moins importants. Ces dommages sont, par exemple, des allongements excessifs des sarcomères, des enchevêtrements de protéines internes aux cellules musculaires ; dans ces dernières, des enchaînements de sarcomères se contractent par glissement des protéines les unes le long des autres.

Moins de dommages musculaires

En 2011, Huo-Cheng Chen, de l'Université Chiayi, à Taïwan, et ses collègues ont demandé à des participants d'effectuer des étirements réguliers pendant deux mois. Ils les ont ensuite soumis à un type d'efforts connus pour causer de grands dommages musculaires – et donc d'intenses courbatures. Ils ont ensuite analysé divers paramètres physiologiques et conclu à des dommages moins importants par rapport à un groupe contrôle qui n'avait pas effectué d'étirements.

Comment ces derniers renforcent-ils les muscles ? Des étirements assez réguliers pourraient augmenter le nombre de sarcomères en série dans les fibres musculaires ; dès lors, chaque sarcomère serait moins sollicité. De même, la longueur et la

souplesse des tendons s'accroîtraient. Les caractéristiques des muscles et des tendons (et donc la propension aux courbatures) étant variables, les bénéfices des étirements seraient plus ou moins importants selon les personnes. Si vous vous sentez souvent raide après un effort, n'hésitez donc pas !

En résumé, il semble que les étirements ne diminuent pas notablement les courbatures s'ils sont faits uniquement après l'activité sportive. Pire : étirer un muscle trop fatigué et fragilisé risque de l'endommager encore plus. Après une compétition ou une séance épuisante, mieux vaut donc s'abstenir. D'autant plus s'il fait froid, car, après un exercice physique, le système immunitaire est temporairement affaibli, et il est ainsi préférable de vite se changer et se mettre au chaud.

En revanche, des étirements réguliers et progressifs, en dehors de toute séance sportive ou après une séance légère, seraient bénéfiques. On peut les effectuer soit en commençant par un petit échauffement (dix minutes de vélo d'appartement, un peu de corde à sauter, etc.), soit à froid ; dans ce dernier cas, on veillera à s'étirer encore plus progressivement que d'habitude. Les effets restent à confirmer, notamment par des études de plus longue durée : celles évoquées ici ne s'étendent que sur trois mois au maximum, de sorte qu'on ignore les conséquences d'étirements réguliers à plus long terme.

Guillaume MILLET est professeur de physiologie de l'exercice à l'Université de Saint-Étienne.

COLLECTION SCIENCE POUR LA SCIENCE LES PETITS THEMATIQUES

Des feuilletables numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique

Accédez facilement à **l'essentiel** sur un **thème marquant** de l'actualité scientifique grâce à :

- **une sélection d'articles de référence**

parus dans *Pour la Science* et *Cerveau & Psycho*

- **compilée dans un feuilletable numérique** de 35 pages environ

- **téléchargeable en format**

PDF au prix de 3,99€ (compatible avec ordinateur et tablette).



Des dizaines de sujets à découvrir sur

www.pourlascience.fr/petitsthemes

Durant près de 3 000 ans, l'Égypte pharaonique a commercé ou guerroyé avec les Libyens, Nubiens, Perses, Grecs, Romains... La civilisation égyptienne était à la croisée des mondes qu'elle irriqua de sa splendeur.

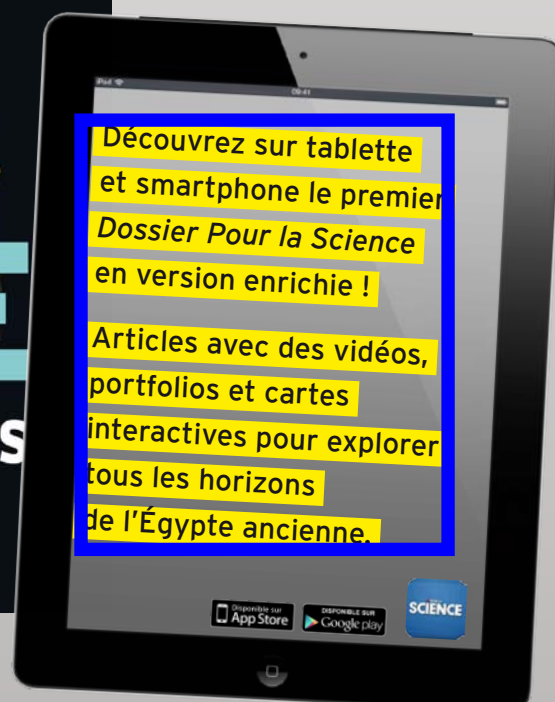
Actuellement
en kiosque



1 VOYAGE À GAGNER

Participez au grand
QUIZ PHOTOS
TRÉSORS D'ÉGYPTÉ

[www.pourlascience.fr/
quizphotos-tresordenvoy](http://www.pourlascience.fr/quizphotos-tresordenvoy)



Feuilletez les premières pages sur www.pourlascience.fr



Mars insolite

Des paysages à couper le souffle

26 - **Valles Marineris, mémoire géologique** de Mars, par Jessi et Thaut, *Asci*
34 - **Mars, in remodelage permanent**, par Alfre et McEwer, *12 - Mars et nages, par Jessi et Thaut et l'erre Thomas*

Dossier

Dans sa trilogie sur Mars, l'auteur américain Kim Stanley Robinson raconte comment l'homme arrive sur la planète rouge et la transforme pour la rendre habitable. Le premier opus, *Mars la Rouge*, ouvre sur ces quelques lignes : « Mars était vide avant notre arrivée. Ce qui ne veut pas dire qu'il ne s'y était jamais rien passé. » En fait, il s'y est passé – et s'y passe encore – de nombreux événements géologiques. La surface de la planète a été façonnée par le volcanisme, la tectonique, l'eau et le vent. Cela a conduit, par exemple, à la formation de la montagne la plus haute du Système solaire, Mons Olympus qui culmine à 21 229 mètres, et d'un canyon gigantesque, Valles Marineris (voir page 26), dix fois plus étendu que le Grand Canyón aux États-Unis.

Ces paysages racontent l'histoire de la planète et les nombreux instruments qui y ont été envoyés depuis les années 1960 nous en ont transmis des bribes.

Récemment, tout s'est accéléré. Les images envoyées par les sondes en orbite, elles *Mars Express* et *Mars Reconnaissance Orbiter*, et les robots mobiles, *Opportunity*, *Spirit*, *Phoenix* et *Curiosity*, nous ont fait découvrir des paysages... à couper le souffle (voir page 42). Mars est tout à la fois la Lune, la Terre et... Mars. Paysages grandioses et surprenants.

Les traces de la présence d'eau – douce, mais aussi salée – s'accumulent (voir page 34). On connaissait *Mars la Rouge*, *Mars la Bleue* se dévoile. Et si l'homme, un jour, s'y installe, la planète deviendra-t-elle *Mars la Verte*, comme l'envisageait K. S. Robinson dans la suite de sa saga ?

Jean Baillu

Les récentes observations à très haute résolution de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter ont révélé de nouveaux paysages au fond du canyon de Valles Marineris. L'histoire géologique de la région se précise.

■ Un des aspects les plus frappants de la surface martienne est sans aucun doute la présence du canyon Valles Marineris. Il tient son nom de la sonde Mariner 9 qui l'a photographié pour la première fois en 1971. Avec 3500 kilomètres de longueur et 300 kilomètres de largeur, ce système tectonique complexe recouvre un quart de l'équateur martien. Il est ainsi près de dix fois plus étendu que le Grand Canyon du Colorado, aux États-Unis. Outre ses dimensions spectaculaires, Valles Marineris présente un intérêt géologique inestimable, car ses parois, parfois hautes de dix kilomètres, mettent au jour des roches et des structures qui retracent l'histoire du canyon, de sa région et de la planète Mars.

Les premières images, en 1965, ont offert une vision quasi lunaire de la planète rouge : désertique et constellée de cratères. Mais, depuis, les différentes sondes et les robots au sol ont montré que l'histoire géologique de Mars était très riche.

Valles Marineris en est l'un des exemples les plus saisissants. Nous en examinerons les paysages ainsi que les divers phénomènes qui les ont façonnés : le volcanisme, la tectonique – les mouvements de la croûte martienne qui n'a pas de dynamique de plaques comme la Terre – ou encore le vent et l'eau. À partir de ces observations, il est possible de retracer l'histoire géologique du canyon et celle de la planète.

Les planétologues ont aussi étudié les roches du canyon. On y trouve de la croûte primitive, vestige de la formation de la planète, de la roche volcanique, mais aussi des minéraux hydratés, tels des sulfates et

Valles Marineris

mémoire géologique de Mars

Jessica Flahaut, Pascal Allemand et Cathu Quantin-Nata



L'ESSENTIEL

Valles Marineris est

un canyon de 3 500 kilomètres de long. Ses parois ont enregistré l'histoire géologique de la région.

Le poids du dôme

de Tharsis, à l'Ouest, a exercé des contraintes sur la croûte martienne, provoquant sa rupture et l'ouverture du canyon.

Le volcanisme, l'eau et

la tectonique ont façonné les paysages variés de Valles Marineris.

De nombreuses traces

d'érosion, d'écoulements et de dépôts sédimentaires montrent que de l'eau liquide a coulé en abondance dans la région.

des argiles, signes de la présence ancienne d'eau liquide dans cette région. La mission *Mars Express*, arrivée en orbite en 2004, a effectué des observations dans le canyon de Valles Marineris et a apporté de précieuses informations sur la présence d'eau liquide sur Mars. Ainsi, grâce au spectromètre OMEGA, elle a détecté une importante présence de dépôts contenant des sulfates, des minéraux hydratés riches en soufre. Ceux-ci datent de l'ère de l'Hespérien (il y a entre 3,7 et 3,2 milliards d'années).

Par ailleurs, *Mars Express* a aussi observé des argiles à la surface de la planète, en dehors du canyon. Ces découvertes ont permis d'attester la présence d'eau liquide à la surface de la planète il y a plus de 3,7 milliards d'années, pendant l'ère géologique martienne la plus ancienne, le Noachien (il y a entre 4,1 et 3,7 milliards d'années). Le climat était alors vraisemblablement chaud et humide.

Comprendre l'histoire du canyon

Une nouvelle sonde était nécessaire pour répondre aux questions que se posaient les planétologues : Quelles sont les étapes de la formation de Valles Marineris ? Quels phénomènes ont façonné ses paysages ? Que peut-on en déduire sur l'histoire de la planète rouge ? Il fallut attendre 2006 et l'arrivée en orbite de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter*. Les objectifs de la mission visaient à décrire le climat et la géologie de la planète. L'équipement embarqué proposait des résolutions qui permettaient d'analyser le canyon en détail. En particulier, la caméra HiRISE (*High Resolution Imaging Science Experiment* pour Expérience d'imagerie scientifique à haute résolution) prenait des images des structures du canyon. Le spectromètre CRISM (*Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars* pour Spectromètre compact d'imagerie de reconnaissance pour Mars) analysait la composition des roches.

Que nous ont révélé les images de HiRISE et les analyses de CRISM ? Elles ont permis une analyse fine de la composition des roches qui constituent les diverses structures de Valles Marineris. Le canyon principal s'accompagne d'un système de failles orientées Est-Ouest, le long desquelles

1. A LA SURFACE DE LA PLANÈTE ROUGE, Valles Marineris ressemble à une cicatrice sombre de 3 500 kilomètres de long.

ils sont formés de nombreux fossés d'effondrement et des dépressions. L'ensemble crée une série de paysages linéaires uniques sur Mars. Au fond du canyon, on trouve de nombreuses dépressions interconnectées : les chasmata. Le sol de ces chasmata est souvent recouvert d'épais dépôts stratifiés, de glissements de terrain ou encore d'ensembles de buttes nommés chaos.

Les parois de dix kilomètres de hauteur

Les premiers éléments pour comprendre comment le canyon s'est formé sont ses parois. Celles-ci sont une source inestimable d'informations. En effet, elles exposent une coupe géologique sur plus de dix kilomètres de hauteur. Abruptes, les parois ont une morphologie dite en « éperons et ravines » (voir la figure 2a). Il s'agit de falaises où, localement, sur les éperons, des roches affleurent. L'érosion et les mouve-

LES AUTEURS



Jessica FLAHAUT est postdoctorante à la Faculté des sciences de la Terre et du vivant de

l'Université libre d'Amsterdam. Elle a été lauréate du Prix Le Monde de la recherche universitaire 2012.



Pascal ALLEMAND est professeur au Laboratoire de géologie de Lyon, Université Lyon 1



Cathy JUANLIN-NATAF est maître de conférences au Laboratoire de géologie

de Lyon, Université Lyon 1

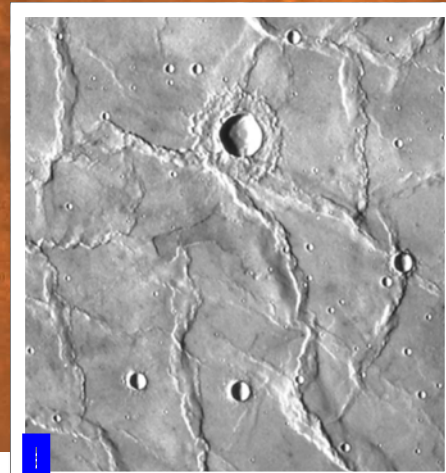
ments tectoniques propres à Mars sont à l'origine de ces structures. Mais comment les parois sont-elles apparues ?

Pour répondre à cette question, regardons à l'Ouest de Valles Marineris. On y trouve le dôme de Tharsis avec Olympus Mons – le plus haut relief du Système solaire, culminant à 21 229 mètres – et les trois volcans alignés de Tharsis Montes, Ascraeus Mons (18 225 mètres), Pavonis Mons (14 058 mètres) et Arsia Mons (17 761 mètres).

Cet ensemble volcanique s'est formé à la fin du Noachien. Sous le poids du dôme de Tharsis, la lithosphère (la croûte et la partie supérieure du manteau martien) a fléchi, s'est soulevée par endroits et a craqué, donnant naissance à Valles Marineris. Ce



2. LES PAYSAGES DE VALLES MARINERIS sont très variés et témoignent du fait que le volcanisme, l'activité tectonique et l'eau ont contribué à façonner les paysages. À l'Ouest, Noctis Labyrinthus présente un réseau complexe de dépressions connectées. Le canyon et ses chasmata (ses vallées) s'étendent ensuite sur environ 3 500 kilomètres vers l'Est. Les parois (a) en « éperons et ravines » sont parfois le lieu de glissements de terrain (d). D'autres activités tectoniques sont visibles sur les plateaux avec un quadrillage de rides et de failles (e). Le volcanisme apparaît dans les strates des parois qui contiennent de la roche volcanique, mais aussi des infiltrations de roches riches en olivine (b). L'eau a aussi joué un rôle important dans les paysages de la région : les cônes alluviaux (c) en sont un exemple.



Le dernier est un graben, c'est-à-dire un fossé d'effondrement bordé de failles qui apparaissent sous l'influence de forces d'extension horizontales appliquées à la lithosphère. Le bloc central s'est affaissé et constitue le fond du canyon. Les blocs voisins forment des plateaux surplombant le canyon. La naissance de Valles Marineris date d'il y a environ 3,5 milliards d'années.

Les parois du canyon permettent de faire de la stratigraphie en étudiant les couches géologiques qui affleurent. En l'absence de bouleversements structuraux, les couches les plus profondes sont les plus anciennes. Ainsi, les roches les plus anciennes sont à la base des versants du canyon, alors que les plus récentes affleurent au sommet des plateaux. En outre, Valles Marineris présente les roches les plus anciennes exposées à la surface de la planète.

L'érosion et la tectonique rendent difficile l'étude de la stratigraphie. Les couches ne sont pas toujours visibles. Souvent, les parois sont le siège d'impressionnants glissements

de terrain (voir la figure 2d). Ces éboulements forment de vastes lobes de débris qui se sont écoulés sur le fond plat du canyon, jusqu'à 100 kilomètres de leur source. Leur forme ne dépend que de la géométrie du canyon, aussi bien pour les glissements de terrain les plus anciens (3,5 milliards d'années) que pour les plus récents (50 millions d'années). Ainsi, les phénomènes qui les ont provoqués sont probablement de même nature. Les volumes déposés s'étendent de 10 kilomètres cubes jusqu'à plus de 5000 kilomètres cubes, et sont donc en moyenne dix fois plus importants que les glissements terrestres. Cela s'explique surtout par une gravité martienne plus faible. Les glissements de terrain se terminent par un bourrelet caractéristique des écoulements de débris rapides, qui se mettent en place à des vitesses de plusieurs dizaines de kilomètres par heure. Cela implique des coefficients de frottement faibles, qui écartent les processus dominés par l'eau.

En certains endroits, l'analyse des strates reste possible et montre une différence

prononcée entre la partie Ouest et la partie Est de Valles Marineris. À l'Ouest, les murs du canyon sont constitués d'un empilement de couches horizontales et parallèles, d'aspect sombre et friable. Ces couches ont été interprétées comme une accumulation de laves et de cendres volcaniques sur plus d'une dizaine de kilomètres de hauteur. Ces laves proviendraient de l'activité des gigantesques volcans du dôme de Tharsis.

Le rôle des volcans

À l'Est, l'empilement de couches volcaniques est limité à la partie supérieure des parois. À la base des versants, on trouve des roches peu communes sur Mars. D'après une étude spectrale qui analyse la lumière réfléchie par les matériaux, ces roches claires et fracturées sont riches en orthopyroxènes. Elles sont similaires à la météorite martienne ALH84001 qui est âgée de plus de 4,1 milliards d'années. Cette météorite et les roches du fond de Valles Marineris pourraient être des échantillons de la



croûte primitive martienne. Cette croûte, qui constitue l'enveloppe la plus externe de la planète, aurait été créée par cristallisation d'un océan de magma se refroidissant peu de temps après la formation de la planète.

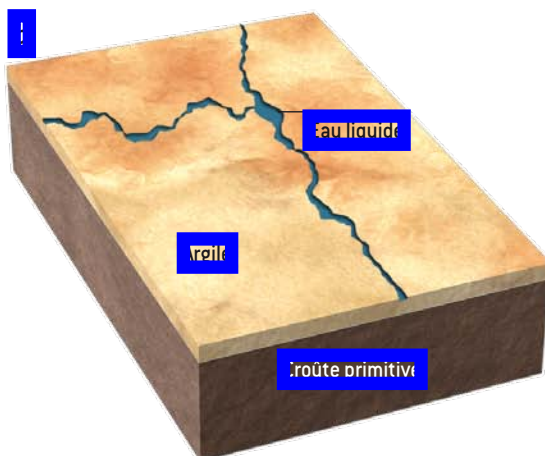
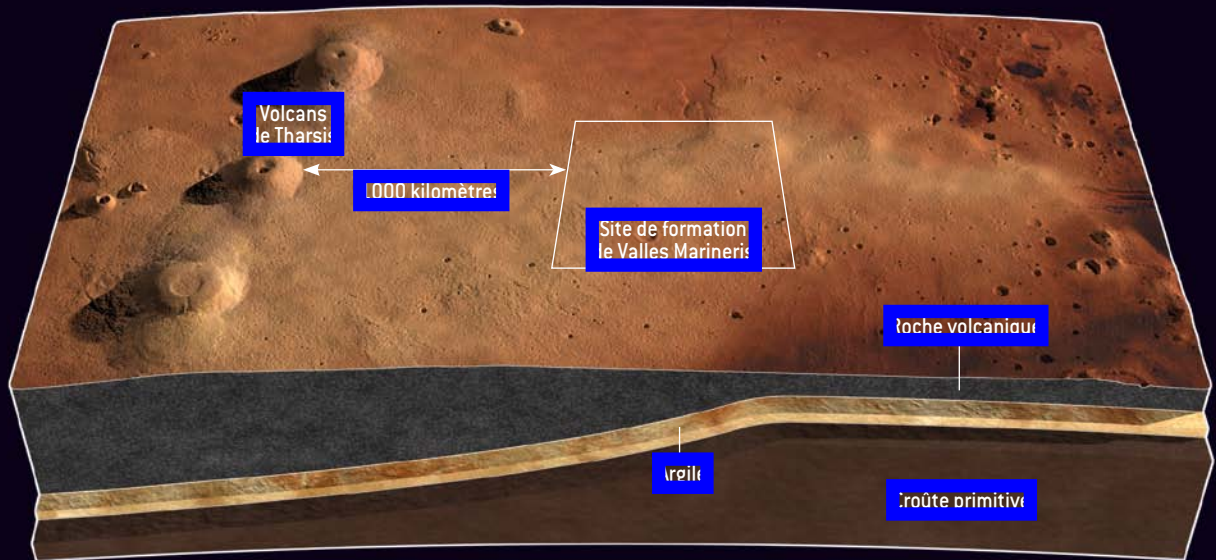
Ces roches pourraient ainsi représenter les premiers témoins de la différenciation ainsi que de la solidification de la planète, il y a plus de quatre milliards d'années! Elles se sont formées avant le canyon. De telles roches n'existent pas sur Terre.

Puisque la majeure partie de la croûte a été recyclée par la tectonique des plaques, un processus absent sur Mars. La plupart des roches présentes en surface sont très anciennes, mais elles ont souvent été modifiées, altérées et modifiées par les impacts de météorites et l'érosion.

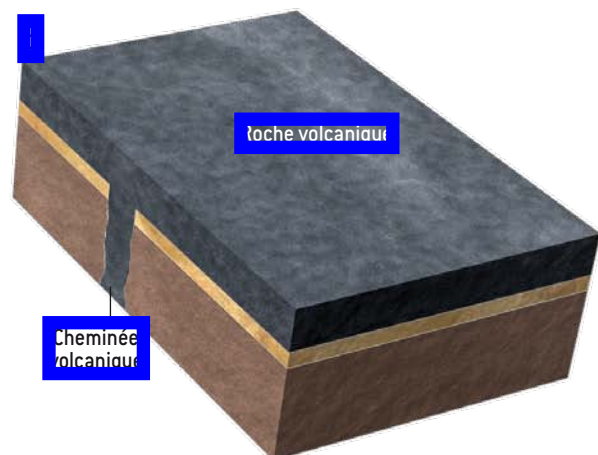
Les roches claires de la base des versants n'ont pas échappé à cette règle. Le bombardement météoritique, très intense au début de l'histoire de la pla-

néte rouge, peut être responsable de leur aspect fracturé.

Une autre altération est observée sur la partie supérieure de la croûte primitive. Une épaisse couche argileuse suggère que la croûte a subi une transformation en présence d'eau peu de temps après sa mise en place. Comme nous le verrons, cette couche permet de mettre en évidence des conditions environnementales différentes pendant le Noachien.



Il y a quatre milliards d'années, la croûte primitive martienne s'est formée. Puis, de l'eau liquide aurait coulé en surface ou en profondeur. Elle aurait altéré la croûte et a formé une couche argileuse que l'on observe aujourd'hui dans les parois du canyon.



Pendant l'ère du Noachien, les volcans de Tharsis sont entrés en activité, recouvrant toute la région de roche volcanique. Dans la partie Est du futur canyon, la couche est de deux kilomètres d'épaisseur environ. Du magma s'infiltre dans des failles, créées par l'activité tectonique du dôme de Tharsis. Les cheminées volcaniques, ou dikes, s'étirent dans la direction Est-Ouest.

D'autres observations mettent en évidence la différence de composition entre les structures des parois du canyon de l'Est et de l'Ouest, dont la ligne de démarcation passe par Coprates Chasma. Les cratères de météorites de huit à dix kilomètres de diamètre présentent un pic central qui se forme pendant le rebond consécutif à l'impact météoritique. Le pic contient les matériaux du sol provenant d'une profondeur comprise entre une et deux

fois le diamètre du cratère. A l'Ouest, les pics des cratères sont constitués de roches volcaniques, à l'Est de croûte primitive.

L'origine de cette séparation est encore discutée : elle pourrait représenter la limite d'un ancien mégacrater situé à l'Ouest, qui crée un bassin accumulant du matériel volcanique et s'enfonçant à mesure qu'il se remplit, ou bien une mégafaille qui déplace la croûte en profondeur à l'Ouest et la fait remonter en surface à l'Est.

Ainsi, les observations de la paroi permettent d'ébaucher l'histoire géologique de Mars et de Valles Marineris. Suite à la formation de la planète, le magma se serait différencié et aurait formé la croûte martienne il y a quatre milliards d'années. Puis le volcanisme, pendant le pré-Noachien et le Noachien, a recouvert la croûte primitive d'épais dépôts volcaniques. Cette couverture a été plus importante dans la partie Ouest de Valles Marineris.

L'EVOLUTION DE VALLES MARINERIS

Les informations collectées par la sonde MRO et celles qui l'ont précédée permettent de reconstituer les grandes lignes de l'histoire géologique de Valles Marineris. Le canyon s'est formé à l'Est du dôme de Tharsis (a) il y a 3,5 milliards d'années. Cet ensemble volcanique serait à l'origine des forces qui se sont exercées sur la lithosphère (la croûte martienne et la partie supérieure du manteau), dont le comportement est élastique à grande échelle : la lithosphère a dû fléchir sous le poids du dôme de Tharsis et craquer à distance.

L'étude des parois du canyon montre qu'avant la formation de celui-ci, la croûte primitive a subi les altérations dans sa partie supérieure avec la

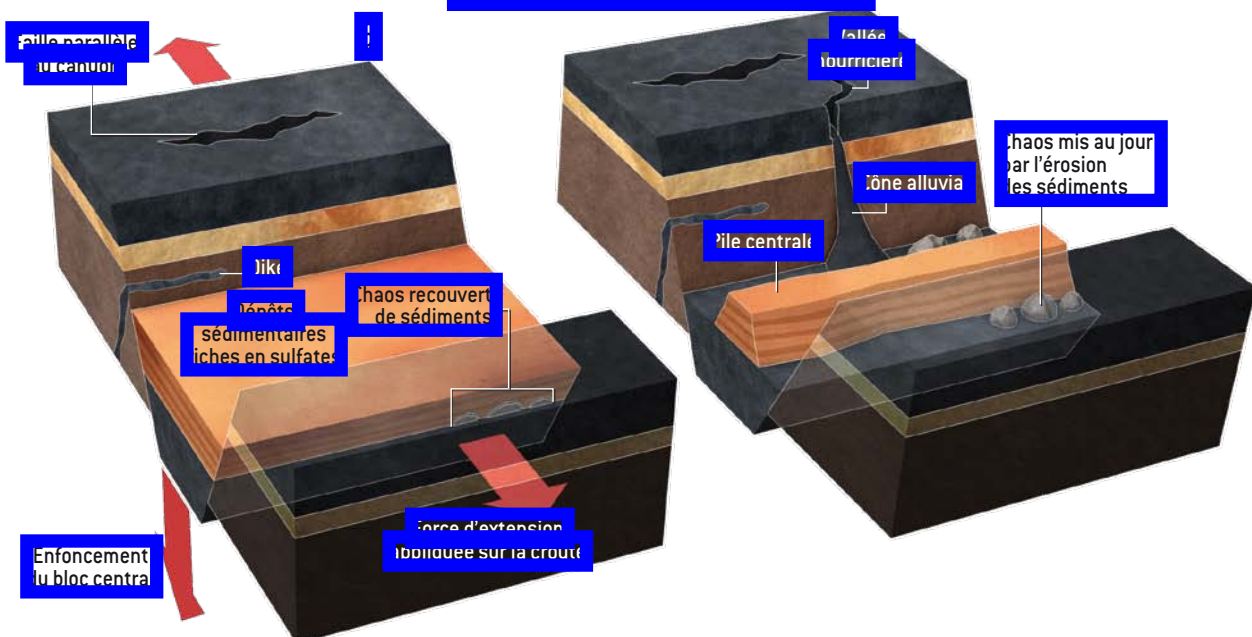
formation d'argile au contact de l'eau liquide (b). Puis à la fin du Noachien, il y a environ 3,7 milliards d'années, l'activité volcanique a recouvert l'ensemble de roche volcanique. La future région Ouest du canyon présente une épaisseur de matériau volcanique plus importante, sans doute parce qu'il existait dans cette zone un bassin qui s'est rempli de roche volcanique et qui s'est affaissé progressivement. La coupe (a) illustre une hypothèse sur la forme du bassin. À l'Est, l'épaisseur de roche volcanique est plus faible (c).

Les différentes forces qui se sont exercées sur la lithosphère ne sont pas encore bien comprises, mais elles ont conduit à un enfoncement

du bloc central, qui constitue aujourd'hui le fond du canyon (d).

Les observations de MRO révèlent de nombreux détails sur Valles Marineris liés à une activité tectonique ou volcanique. On observe, par exemple, des failles et des dikes – des cheminées volcaniques – parallèles au canyon.

Aujourd'hui, l'eau ne coule plus dans le canyon. Mais de nombreuses traces persistent (e) : les traces d'érosion ou encore des cônes de dépôts. L'analyse des dépôts stratifiés riches en sulfates montre, en particulier, que les conditions environnementales de la planète ont changé il y a 3,5 milliards d'années.



Il y a 3,5 milliards d'années, des forces d'extension ont conduit à l'effondrement du bloc central, découpant des parois inclinées, parfois hautes de dix kilomètres. Des failles parallèles au canyon se sont formées. Les parois révèlent les dikes et leur forme linéaire caractéristique. L'effondrement des sols riches en glace, à l'Est, a créé des chaos, recouverts plus tard par des dépôts stratifiés riches en sulfates.

Les murs du canyon et les dépôts stratifiés ont été façonnés par des écoulements d'eau provenant des éruptions de Tharsis, à l'Ouest, ou du sous-sol. L'eau a aussi déferlé des plateaux par des vallées nourricières, charriant des dépôts qui se sont accumulés au pied des falaises sous la forme de cônes alluviaux.

La formation du dôme de Tharsis a exercé des contraintes sur la lithosphère, jusqu'à la rupture et la formation du canyon.

Une autre manifestation volcanique est observable dans Valles Marineris. Il s'agit de filons verticaux, qui s'étirent dans la direction Est-Ouest, parallèles au canyon. Ces filons apparaissent dans la croûte primitive des parois du canyon sous la forme de bandes, longues de plusieurs kilomètres et larges d'environ 50 mètres (voir la figure 2b). Elles sont plus sombres et enrichies en olivine, un minéral silicaté. Ces filons correspondent très certainement à des cheminées volcaniques, nommées dikes, qui pénètrent dans la roche environnante. Le magma monte dans les cheminées puis refroidit ; il cristallise et forme de l'olivine. Ces dikes pourraient aussi expliquer l'empilement de laves observé au sommet des versants. Certaines cheminées ont pu émerger sur la partie supérieure des parois où de la lave s'est répandue.

De tels dikes sont fréquemment observés sur Terre, mais rarement sur de si grandes dimensions. Leur orientation parallèle au canyon suggère un lien avec la tectonique régionale, responsable de la formation d'une grande partie des paysages de Valles Marineris, et du canyon lui-même. La période de formation des dikes n'est pas connue, mais le magma aurait pu s'infiltrer dans les failles créées à la même période que le canyon. Selon Jeffrey Andrews-Hanna, de l'École des mines du Colorado, la dilatation du magma dans les dikes a permis de désolidariser les blocs de la lithosphère. Cela aurait favorisé l'effondrement du bloc central formant le fond du canyon. Les dikes renferment aussi des informations sur la composition primitive du manteau de la planète, où le magma prend sa source.

Manifestation de la tectonique

La tectonique, responsable en grande partie de l'ouverture du canyon, s'exprime aussi par la présence d'autres structures. Noctis Labyrinthus (voir la figure 2), la partie occidentale de Valles Marineris, est un ensemble complexe de dépressions fermées ou reliées par d'étroits couloirs parfois partiellement comblés de dépôts sédimentaires ou de matériau volcanique. Les bords de ces dépressions suivent soit la direction Est-Ouest des failles du graben de Valles Marineris, soit le sens d'un système de failles orien-

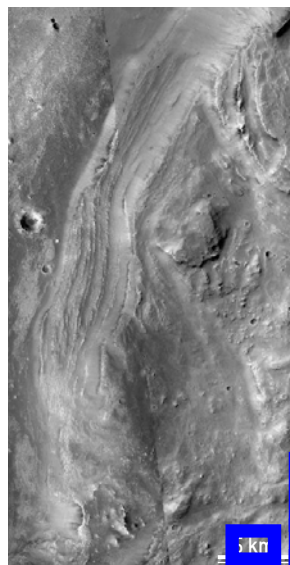
BIBLIOGRAPHIE

J. Flahaut *et al.*, Morphology and geology of the ILD in Capri/Eos Chasma (Mars) from visible and infrared data, *Carus*, vol. 207, pp. 175-185, 2013.

J. C. Andrews-Hanna, The formation of Valles Marineris : 3. Trough formation through super-isostasy, stress, sedimentation, and subsidence, *Journal of Geophysical Research Planets*, vol. 117, n° F6, 2012.

J. Flahaut, Minéralogie de Valles Marineris (Mars) par imagerie hyperspectrale : histoire magnétique et sédimentaire de la région, thèse de doctorat de Université de Lyon 1, 2011.

B. K. Lucchitta *et al.*, Topography of Valles Marineris : Implications of erosional and structural history, *Journal of Geophysical Research Planets*, vol. 99, n° E2, pp. 3783-3798, 1994.



3. LES PAROIS DE VALLES MARINERIS, à l'Est, ont été creusées par l'écoulement répété d'eau liquide. Elles ont formé des terrasses.

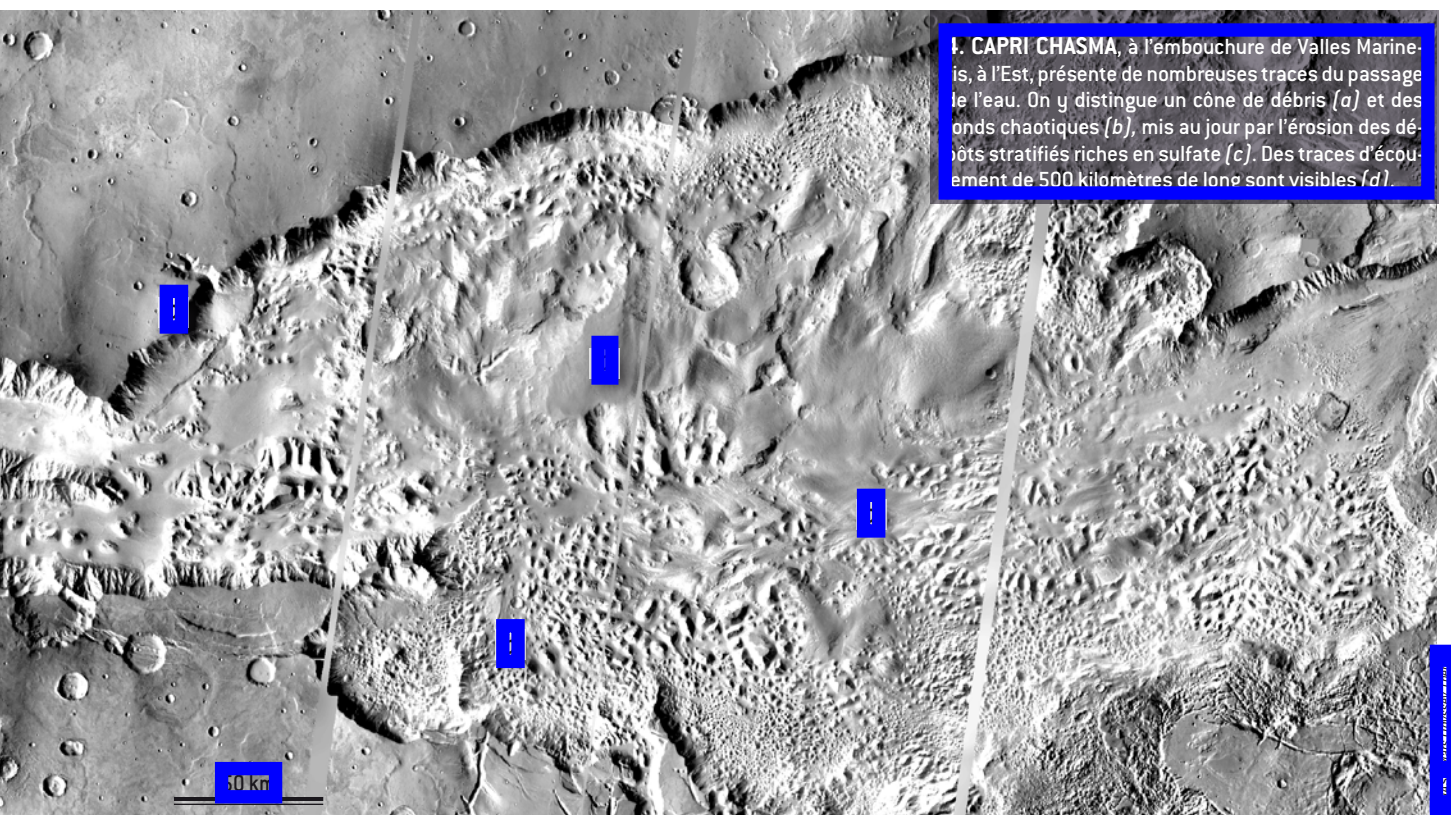
ées Nord-Sud visibles au Nord de Noctis Labyrinthus. L'origine de ces dépressions est encore débattue. Elle serait liée à des forces d'extension de la lithosphère et à un réchauffement de la croûte supérieure par du magma. Ce dernier phénomène aurait entraîné la fusion de glace contenue dans les premiers kilomètres de la croûte. L'eau aurait percolé en profondeur le long des failles d'extension en produisant un effondrement des roches au-dessus. On obtiendrait ainsi cette morphologie de dépressions fermées ou faiblement reliées.

Un sol façonné par l'eau

Mais ces témoignages confirment que le volcanisme et la tectonique ont largement participé à façonner Valles Marineris. Cependant, l'eau a aussi modelé ses paysages. Par exemple, les murs du canyon sont parfois recouverts de cônes alluviaux de forme triangulaire, qui prennent leur source dans des vallées nourricières en amont, sur les plateaux (voir la figure 2c). Cette physionomie les distingue des glissements de terrain. Les cônes sont formés d'un amas de matériaux transportés au pied des reliefs par l'eau.

À l'embouchure de Valles Marineris, à son extrémité Est, on observe des terrasses : des zones planes, étagées, ravinées au sein des murs par une activité fluviale soutenue (voir la figure 3).

Cependant, les parois du canyon ne sont pas les seuls témoins du passage de l'eau. L'eau a coulé, érodé, sculpté et redéposé des matériaux à de nombreuses reprises à l'intérieur du canyon. Le fond des chasmata situés à l'Est, tels Capri Chasma et Ganges Chasma, diffère des autres chasmata car il est recouvert d'un ensemble de buttes et de blocs anguleux, de quelques kilomètres d'envergure, formant une topographie rugueuse, ensemble nommé chaos ou fond chaotique (voir la figure 4). Les régions chaotiques sont fréquentes plus à l'Est de Valles Marineris, dans la région de Margarifer Terra, où elles sont observées en association avec des chenaux de débâcle, creusés par des déferlements d'eau. Ainsi, les buttes chaotiques recouvrant le fond de la partie Est du canyon ont été créées lors de brefs et intenses écoulements d'eau, sur et sous la surface, au moment de l'ouverture de Valles Marineris. Ces déferlements d'eau auraient été issus de la fonte de glace sous



1. CAPRI CHASMA, à l'embouchure de Valles Marineris, à l'Est, présente de nombreuses traces du passage de l'eau. On y distingue un cône de débris *[a]* et des fonds chaotiques *[b]*, mis au jour par l'érosion des dépôts stratifiés riches en sulfate *[c]*. Des traces d'écoulement de 500 kilomètres de long sont visibles *[d]*.

à surface, liée ou non à du volcanisme. Cela a pu déstabiliser le sous-sol, causant l'effondrement des terrains et formant les reliefs accidentés.

Le plus grand réservoir de sulfates de Mars

Les dépôts stratifiés sont les formations les plus énigmatiques de la région. Le sol de presque tous les chasmata, y compris le fond chaotique, est recouvert de ces dépôts stratifiés, épais de plusieurs kilomètres, à sommet plat et à fort albédo. Leur origine est inconnue, mais ces dépôts seraient liés à une sédimentation en milieu lacustre, à l'altération de restes de matériaux constituant les murs des canyons, à la formation d'édifices volcaniques sous-glaciaires, ou à l'accumulation de dépôts éoliens ou volcaniques. Le spectromètre OMEGA à bord de *Mars Express* a montré que ces matériaux sont riches en sulfates. Le volume gigantesque des dépôts fait de Valles Marineris le plus grand réservoir de sulfates à la surface de la planète. La présence de sulfates implique l'action de l'eau liquide au moment ou après la formation de ces sédiments.

L'âge de ces dépôts est mal défini, mais il a été montré que la formation des sulfates est postérieure à l'ouverture du canyon et à la mise en place des fonds chaotiques qui ont été recouverts par les sédiments dans un premier temps. L'activité hydrologique ne s'arrête pas là, puisque les dépôts stratifiés ont été érodés, formant des buttes qui mettent au jour les fonds chaotiques. Bien qu'une grande partie de cette érosion puisse être attribuée au vent, qui laisse des crêtes sur les reliefs et qui accumule les particules les plus fines dans les dépressions, souvent sous forme de dunes, certaines morphologies caractéristiques ne peuvent correspondre qu'à une érosion par l'eau. C'est le cas des gigantesques stries Est-Ouest de Capri Chasma (voir la figure 4d). Ces marques d'écoulement s'étendent sur environ 500 kilomètres de longueur et 40 kilomètres de largeur et se terminent près des terrasses creusées dans les murs à l'embouchure Est du canyon.

L'étude des dépôts montre que la planète a connu un changement de conditions environnementales il y a 3,5 milliards d'années, au moment de l'ouverture du canyon, qui se traduit par une évolution

des types de dépôts sédimentaires. La présence de sulfates au sein de dépôts stratifiés, au cours de l'Hespérien, traduit une altération à *pH* acide, alors que les argiles détectées dans les laves des terrains noachiens se forment à un *pH* neutre. Néanmoins, ce changement de chimie en surface ne semble pas lié à un changement climatique brutal, puisque l'eau liquide aurait été présente en abondance dans la région durant tout l'Hespérien. Peut-être une étude plus approfondie de Valles Marineris nous révélera-t-elle les causes de ces modifications environnementales.

La sonde MRO a permis de faire des observations plus détaillées de Valles Marineris et a précisé l'histoire géologique de la région, même si la chronologie des événements qui ont façonné les paysages du canyon n'est pas encore parfaitement établie.

Ainsi, pendant les premiers « âges » de la planète rouge, la croûte primitive se serait formée et la couche d'argile se serait constituée sous l'influence de l'eau. Puis seraient venus les temps des bouleversements géologiques avec les éruptions volcaniques et l'ouverture du canyon. Enfin, l'érosion de l'eau aurait sculpté les parois et le sol de Valles Marineris. ■

L. DES TRAINÉES SOMBRES

Sur les pentes escarpées
de l'intérieur du cratère Hale,
elles indiqueraient la présence
de réserves d'eau salée liquide.

Mars, un remodelage

L'ESSENTIEL

Des images en haute
résolution réalisées
en orbite sur plusieurs
années montrent
que la surface change
en permanence.

L'eau serait responsable
de certaines de ces
variations, mais pas de
la formation des ravines.
Ces dernières seraient
surtout façonnées par
le dioxyde de carbone
quand il se sublime.

Sur des pentes
chauffées par le Soleil,
les planétologues
auraient repéré des
écoulements d'eau salée
qui pourraient héberger
une vie martienne.



permanent

La surface de Mars change en permanence.
Des lignes sombres apparaissent sur certaines pentes.
S'agit-il de traces d'écoulements d'eau liquide ?

Alfred McEwen

VOYAGE : L'ESPACE - L'UNIVERS - L'ÉNERGIE - L'ENVIRONNEMENT - L'ÉCONOMIE - L'ÉDUCATION - L'ÉNERGIE - L'ENVIRONNEMENT - L'ÉCONOMIE - L'ÉDUCATION

La découverte de traces d'eau sur Mars semble si banale que c'est devenu une plaisanterie parmi les spécialistes de la planète rouge : « Félicitations ! Vous êtes la millième personne à découvrir de l'eau sur Mars ! »

La plupart de ces découvertes reposent soit sur des traces de l'écoulement d'eau disparue depuis longtemps, soit sur la présence actuelle de glace, de vapeur d'eau ou de minéraux hydratés. La découverte d'eau liquide, aujourd'hui, à la surface de Mars, pourrait changer le cours de l'exploration martienne : là où il y a de l'eau liquide sur Terre, il y a presque toujours de la vie. Confirmer l'existence d'eau liquide sur Mars relancerait l'espoir de trouver des formes de vie extraterrestre encore existantes.

En juin 2000, la NASA a dévoilé des informations qui n'avaient rien de banal : une caméra de la sonde *Mars Global Surveyor* avait identifié de nombreuses structures de surface qui ressemblaient aux ravines terrestres, qui sont sculptées par les écoulements d'eau. Un communiqué de presse de la NASA annonçait qu'avec la découverte des ravines, il « pourrait y avoir, aujourd'hui encore, des sources d'eau liquide à la surface de la planète rouge ou à faible profondeur ». Les ravines ont attiré l'attention de nombreux planétologues parce qu'on pensait qu'elles étaient creusées par des écoulements d'eau ou de coulées de débris humides.

Mais plusieurs questions se sont immédiatement posées. Des dizaines de milliers de ces ravines, mesurant parfois plusieurs kilomètres de longueur, sillonnent les pentes situées aux latitudes moyennes de Mars. Elles impliquaient des quantités importantes de liquide très difficiles à expliquer. En outre, la pression atmosphérique de la planète est si basse (moins de un pour cent de celle de la Terre) que toute l'eau pure de surface gèle inévitablement, s'évapore ou bout rapidement. En effet, les conditions de température et de pression sont très proches du point critique de l'eau pure.

Certains chercheurs ont supposé que ces ravines étaient des reliques du passé, quand la planète connaissait de plus grandes variations climatiques. Puis, en 2006, de nouvelles données de *Mars Global Surveyor* ont montré que du matériau de couleur claire s'était échappé des ravines au cours des années précédentes. Il fallut admettre que les ravines ne sont pas des structures du passé : elles continuent à évoluer.

L'AUTEUR



Alfred McEWEN est professeur de planétologie à l'Université de l'Arizona. Il est chef

de projet sur la mission HiRISE

BIBLIOGRAPHIE

J. Chevrier et E. Rivera-Valentin, Formation of recurring slope lineae by liquid brines on present-day Mars, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, n° 21, L21202, 2012

A. S. McEwen et al., Seasonal flows on warm Martian slopes, *Science*, vol. 333, pp. 740-743, 2011

J. Bell, Mars : un passé humide, *Pour la Science*, n° 352, février 2007

M. Malin et K. Edgett, Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars, *Science*, vol. 288, pp. 2330-2335, 2000

Alors que le mystère s'épaississait autour des ravines, une nouvelle sonde venait d'arriver en orbite autour de Mars : la *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO), avec à son bord HiRISE (*High-Resolution Imaging Science Experiment* pour l'expérience d'imagerie scientifique à haute résolution), dont je suis le chef de projet. HiRISE, la plus puissante caméra jamais embarquée sur une sonde interplanétaire, allait bientôt apporter des données cruciales.

Des zébrures à flanc de colline

Pendant que l'imagerie détaillée de MRO défilait les mystères des ravines, un étudiant de mon laboratoire a découvert une curieuse caractéristique de la surface de Mars qui n'avait encore jamais été observée : des zébrures superficielles, qui s'écoulent à flanc de colline, et qui croissent lentement et changent avec les saisons d'une façon qui suggère qu'il s'agit d'écoulements d'eau liquide. Ces zébrures sont désormais la preuve la plus convaincante de la présence d'eau liquide sur Mars. Elles nous ont apporté de nouvelles idées qui expliqueraient comment de l'eau liquide peut exister dans un environnement aussi défavorable, et la meilleure indication en date que Mars pourrait toujours abriter une niche près de la surface, où de la vie subsisterait.

Dès les prémices de la mission, nous avions conçu HiRISE en ayant à l'esprit les ravines et autres structures à petite échelle. La caméra nous a permis d'examiner ces caractéristiques avec plus de détails que tout ce qui se faisait jusque-là. HiRISE peut photographier n'importe quelle partie de la surface de Mars, en couleurs, avec une résolution inférieure au mètre (entre 0,25 et 0,32 mètre par pixel). La sonde est capable de pointer la caméra sur une zone intéressante lors de plusieurs passages en orbite afin de détecter d'éventuelles variations dans le paysage. En outre, elle peut cartographier le sol en stéréoscopie, pour livrer une vue tridimensionnelle.

Grâce à la combinaison de la haute résolution et de la couleur, ainsi que de prises de vue répétées sur plusieurs années, HiRISE a amélioré notre connaissance de la surface de Mars. Nous avons vu de nouveaux sites d'impact constellant la surface, des avalanches de roches, du givre et de la glace, ainsi que des tourbillons de poussière et de sable (voir la figure 2).

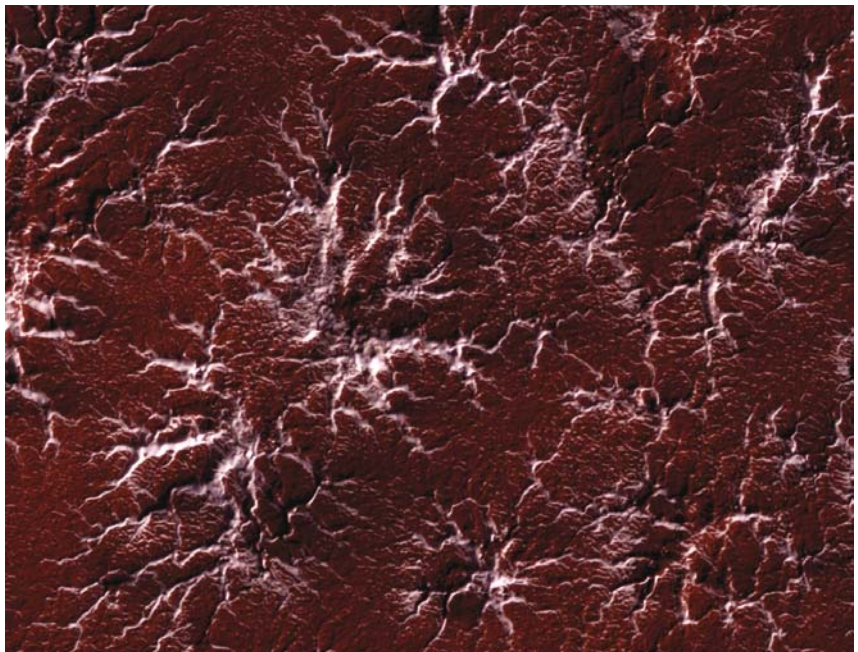
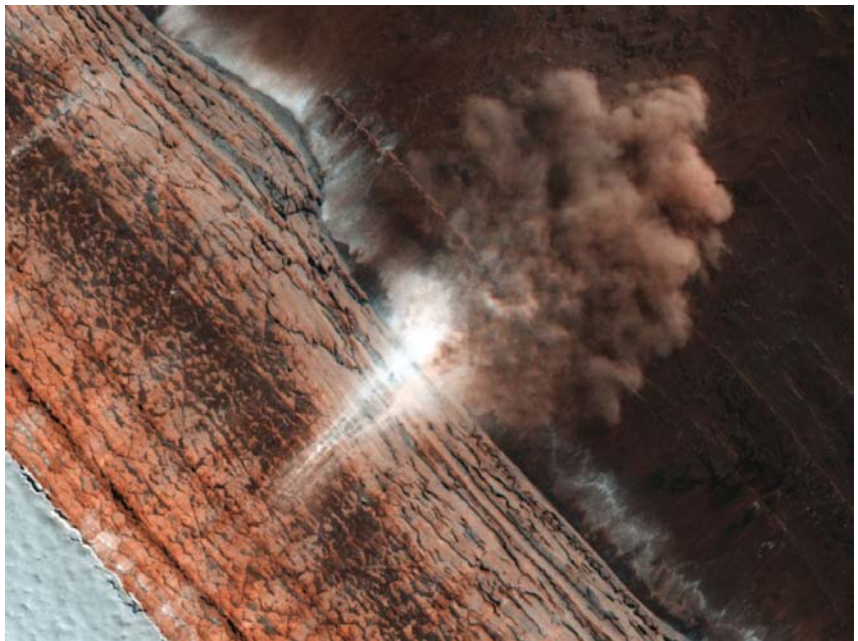
HiRISE a très vite commencé sa campagne de cartographie de la surface. Une fois les premières images, prise dans les latitudes moyennes de l'hémisphère Sud, montrait une pente avec les mystérieuses ravines découvertes par la mission *Mars Global Surveyor*. À cause de la saison d'hiver austral, une grande partie de ce versant exposé au Sud était dans l'ombre du cratère. Du givre, essentiellement du dioxyde de carbone gelé, couvrait presque toute la pente, sauf au fond de certaines ravines. L'absence de givre suggérait que quelque chose se passait dans la ravine elle-même.

La glace carbonique creuse les ravines

Il a fallu deux années martiennes (presque quatre années terrestres) pour surprendre de nombreuses ravines en train de changer, mais les données ont fini par révéler que les ravines se transformaient quand du givre de dioxyde de carbone couvrait le sol : de nouvelles alcôves se développaient, ainsi que des chenaux et des cônes de débris. Nous avons déjà vu à l'œuvre du dioxyde de carbone gelé (aussi nommé glace carbonique ou « glace sèche »). D'une part, dans les régions polaires de Mars, la sublimation saisonnière du dioxyde de carbone (son passage direct de l'état solide à l'état gazeux) produit d'étranges jets froids, semblables aux éruptions de geysers. D'autre part, sur les dépôts en couches de glace et de poussière près du pôle Sud de Mars, la sublimation du dioxyde de carbone crée des « araignées », des réseaux en étoiles de chenaux résultant de l'écoulement du gaz piégé sous la glace sèche et de l'érosion qu'elle provoque. On n'observe pas de telles structures sur Terre.

Les ravines de Mars ressemblent tellement aux ravines ou aux grands ravins sur Terre que de nombreux chercheurs supposaient qu'elles avaient été façonnées par des processus identiques. Cependant, nous avons fini par montrer qu'elles pouvaient aussi se former par un processus totalement inconnu sur Terre. Avec mes collègues, nous avons fini par conclure que le dioxyde de carbone déclenche la formation de ravines par un processus sans eau, tel que la sublimation de glace sèche, qui, comme un liquide, arrache des débris de roche et de sol.

Supposer que la glace carbonique creuse les ravines nous a permis de répondre à



2. DE NOMBREUX PHENOMENES TRANSFORMENT LA SURFACE MARTIENNE, tels [de haut en bas] des avalanches de poussière, des « araignées » de givre de dioxyde de carbone, qui creusent des ravines au fil des hivers, et des tourbillons de poussière [ici hauts de 800 mètres].

plusieurs questions, par exemple : pourquoi les ravines se forment-elles de préférence sur les versants orientés vers les pôles, entre 30 et 40 degrés de latitude Sud, et sur toutes les pentes escarpées entre 40 degrés de latitude Sud et le pôle ? Ce sont les pentes les moins ensoleillées, et cette configuration correspond à la distribution saisonnière de la glace de dioxyde de carbone. Ou encore : pourquoi les ravines sont-elles beaucoup plus actives dans l'hémisphère Sud que dans l'hémisphère Nord ? Étant donné la position actuelle de Mars dans le cycle de précession orbitale, les hivers austraux sont plus longs que les hivers boréaux, si bien qu'il s'accumule davantage de givre dans le Sud (voir l'encadré page 39).

Quand de la glace sèche recouvre le sol, les températures de la surface et de l'atmosphère sont égales à celle du point de solidification du dioxyde de carbone, c'est-à-dire environ -125°C (pour la pression atmosphérique martienne). L'eau pure gélant à 0°C , la saison du givre de glace carbonique est le moment de l'année où la présence d'eau liquide est la moins probable.

Je commençais à me dire que l'érosion actuelle de la surface martienne était essentiellement le fait du givre de dioxyde de carbone et que l'idée de la présence d'eau liquide aujourd'hui sur Mars était en train de tomber... à l'eau. À toutes les latitudes sur Mars, nous avons observé que des mécanismes ne mettant pas en œuvre l'eau, par exemple le vent, modifient la surface de la planète. Mais nous avons aussi montré que, dans certaines régions, la couverture saisonnière de dioxyde de carbone joue le même rôle.

En 2010, j'en étais à ce stade de mes réflexions quand un étudiant, Lujendra Ojha, travaillant sur les données de HiRISE, a découvert quelque chose de très intéressant. Il voulait créer des modèles numériques du terrain à partir de paires d'images stéréoscopiques de HiRISE. Je lui avais suggéré d'utiliser une paire d'images d'une ravine où nous avions repéré des chenaux. La première image avait été acquise deux mois avant la seconde, et nous voulions voir si quelque chose avait changé durant ce court laps de temps. Il a comparé les images, et ce qu'il a trouvé était pour le moins curieux. Sur l'image la plus récente, de nombreuses lignes sombres et étroites descendaient des zones rocheuses escarpées, et ces stries étaient absentes sur la première image.

Je ne savais pas quoi penser de ces lignes anormales. Nous avons réuni davantage d'informations. Tout d'abord, nous avons examiné toutes les paires stéréo acquises sur des pentes abruptes. Nous avons déjà enregistré des centaines d'images pour étudier des ravines, des cratères d'impact bien préservés et des affleurements du substrat rocheux. Parmi ces photographies, nous avons trouvé d'autres exemples de ces curieuses caractéristiques de surface. À chaque fois, nous voyions la même chose : des lignes sombres sur des pentes raides près du substrat rocheux. Toutes ces lignes étaient situées aux latitudes moyennes australes sur des pentes faisant face à l'équateur, pendant l'été : la période la plus ensoleillée, qui est aussi la saison opposée à celle où le dioxyde de carbone est actif. Des lignes sombres qui dévalaient les pentes nous ont aussitôt fait penser de l'eau ou à des sols humides, mais mes collègues et moi-même voulions rester prudents.

Nous avons pensé que ces étranges écoulements sur des pentes chaudes pourraient bien, en réalité, être le fait d'eau salée

Avant de pouvoir déterminer ce qui était à l'origine de ces pentes striées, nous devions recueillir davantage de renseignements sur leurs conditions d'apparition. Nous pensions que ces écoulements estivaux augmentaient lentement durant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, puis s'estompaient ou disparaissaient pendant les saisons froides, avant de se reformer l'été suivant.

Comme nous n'avions pas identifié les écoulements de saison chaude avant le deuxième été austral martien de *Mars Reconnaissance Orbiter*, nous avons dû attendre le troisième été austral, au début de 2011, pour tester nos hypothèses. Nous avons sélectionné six sites pour suivre de près les changements et en avons observé ponctuellement quelques autres. Ces observations ont confirmé ce que nous pressentions, et nous avons publié nos résultats dans la revue *Science*, en août 2011. L. Ojha a été submergé de coups de téléphone de son pays natal, le Népal.

Dans notre article, nous désignons les caractéristiques d'écoulement par l'expression *recurring slope lineae* (lignes

de pente récurrentes), un nom qui décrit le phénomène sans rien présumer de son origine. Si nous avions parlé de « traces d'écoulement d'eau », nous aurions donné, à tort, l'impression que nous étions sûrs de la façon dont elles s'étaient formées.

27 °C l'après-midi

Mais, lors de la publication de cet article, nous étions de plus en plus convaincus que l'eau jouait un rôle dans ce phénomène. Après tout, les lignes de pente récurrentes étaient présentes dans des environnements inhabituels : les latitudes moyennes, sur les pentes de l'hémisphère Sud, où les étés sont plus chauds qu'au Nord. Un instrument à bord de la sonde *Mars Odyssey* a mesuré, dans ces régions, des températures de surface allant jusqu'à 27°C l'après-midi ! Des températures positives semblent parfaitement adaptées à la présence d'eau liquide, mais c'est oublier que la pression atmosphérique sur Mars est faible, de sorte que l'eau pure s'évapore ou bout rapidement. Il y a donc peu de chances que les lignes de pente récurrentes contiennent de l'eau pure.

Et s'il s'agissait d'eau salée ? C'est une substance bien différente. La surface de Mars est très salée, d'après les enseignements fournis par les atterrisseurs et rovers, par les spectromètres en orbite, et par l'analyse chimique des météorites martiennes. Toute eau coulant à la surface de Mars ou sous la surface devrait aussi avoir une teneur élevée en sels.

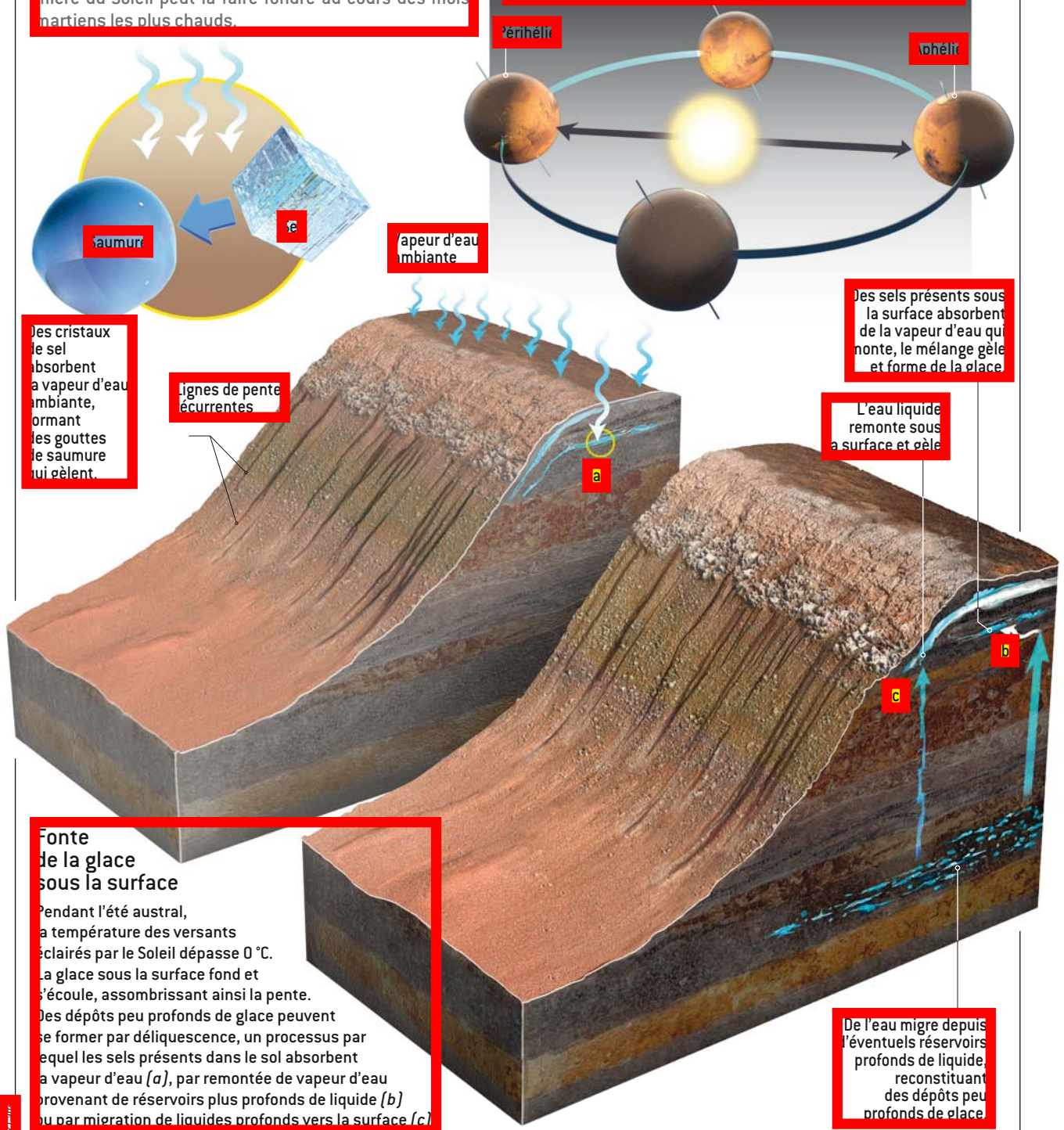
Quand de l'eau salée refroidit, soit elle se transforme en partie en glace, soit une partie de ses sels précipite, soit les deux à la fois. Le liquide restant se trouve dans la composition « eutectique », c'est-à-dire présentant une concentration en sels lui permettant de rester liquide à des températures très inférieures à 0°C . Le terme de sel est à prendre dans le sens général d'un cristal associant un ion métallique et un ion non métallique. Une saumure de sulfate de fer ou de perchlorate de calcium (deux sels répandus sur Mars) dans sa composition eutectique peut rester liquide jusqu'aux alentours de -68°C . En outre, ces liquides eutectiques persistent bien mieux que l'eau pure : ils s'évaporent dix fois moins vite. Les propriétés inhabituelles des saumures eutectiques leur permettraient d'être beaucoup plus stables sur Mars que l'eau pure.

DE L'EAU LIQUIDE SUR MARS ?

Les planétologues débattent encore de l'origine des lignes sombres qui apparaissent chaque année sur les pentes australes martiennes. Toutefois, il est vraisemblable que la fonte saisonnière de dépôts peu profonds de glace d'eau salée en soit responsable. Les coupes de la pente illustrent divers mécanismes possibles qui apporteraient de la glace d'eau sous la surface, où la lumière du Soleil peut la faire fondre au cours des mois martiens les plus chauds.

L'été austral : le grand dégel

Mars décrit une orbite elliptique qui amène la planète rouge bien plus près du Soleil au périhélie qu'à l'aphélie. L'inclinaison de Mars varie (par « précession ») à des échelles de plusieurs dizaines de milliers d'années ; actuellement, la planète atteint le périhélie à peu près au moment de l'été austral, produisant des étés plus chauds dans cet hémisphère. Les lignes sombres apparaissant sur les versants Sud pendant les mois chauds pourraient correspondre à de la glace fondue.



Fonte de la glace sous la surface

Pendant l'été austral, la température des versants éclairés par le Soleil dépasse 0 °C. La glace sous la surface fond et s'écoule, assombrissant ainsi la pente. Des dépôts peu profonds de glace peuvent se former par déliquescence, un processus par lequel les sels présents dans le sol absorbent la vapeur d'eau (a), par remontée de vapeur d'eau provenant de réservoirs plus profonds de liquide (b) ou par migration de liquides profonds vers la surface (c).

De l'eau migre depuis l'éventuels réservoirs profonds de liquide, reconstituant des dépôts peu profonds de glace.

et nous avons commencé à penser que ces étranges écoulements sur des pentes chaudes pourraient bien, en réalité, être de l'eau salée.

Nous avons envisagé d'autres hypothèses. Un phénomène sec, ou presque sec, pourrait-il expliquer ces observations? Aucun processus purement sec, tel que des chutes de pierres ou des glissements de terrain, n'est en mesure d'expliquer le caractère saisonnier, la croissance progressive et la sensibilité à la température, et nous n'avions jamais observé quoi que ce soit d'approchant sur la Lune, un astre desséché.

Nous avons ensuite envisagé que des composés volatils tels que de la vapeur d'eau puissent jouer un rôle, même mineur. Si des substances volatiles agglomèrent des particules du sol, l'élévation de la température permettrait à cette colle de se sublimer, faisant échapper des grains qui, libérés, dévaleraient les pentes. Mais cette hypothèse ne pouvait pas expliquer pourquoi les lignes de pente récurrentes disparaissent. En revanche, nous avons supposé que de l'eau coule quand il fait chaud, puis gèle la nuit. C'est effectivement ce qui semblait le mieux expliquer les observations.

Des écoulements d'eau salée

Une telle activité de surface existe aussi sur Terre. En Antarctique, des traces d'eau d'aspect semblable sont formées par le ruissellement à faible profondeur de saumures; or les chercheurs ont trouvé des microbes vivant dans ces traces d'eau de l'Antarctique. Mais les ravines nous ont appris que les apparences peuvent être trompeuses. En outre, les comparaisons avec ce que l'on observe sur Terre ont une pertinence limitée: il fait beaucoup plus froid la nuit sur Mars qu'en Antarctique, et la couche active de sol non gelé y est beaucoup plus mince.

Nous n'étions pas la première équipe, ni même la deuxième à suggérer la présence d'eau liquide sur Mars. Des clichés de la mission *Phoenix* ont montré ce qui ressemblait à des gouttelettes d'eau sur les pieds de l'atterrisseur robotique. Cette idée me semblait assez folle, jusqu'à ce que j'entende parler du processus de déliquescence, par lequel des sels absorbent la vapeur d'eau atmosphérique quand la température et l'humidité relative de l'air sont élevées en même temps. Si les

rétrofusées de *Phoenix* avaient soulevé des sels de perchlorate au moment de l'atterrissage, les conditions auraient pu être réunies pour que ces sels absorbent de l'eau et fassent apparaître des gouttelettes.

Peut-on expliquer les lignes de pente récurrentes par la déliquescence? C'est tentant, mais c'est un processus qui, à partir d'un air martien raréfié, ne peut produire que de minuscules quantités d'eau, certainement pas assez pour que les torrents coulent le long des pentes, à moins qu'un mécanisme ne permette une accumulation progressive au fil du temps.

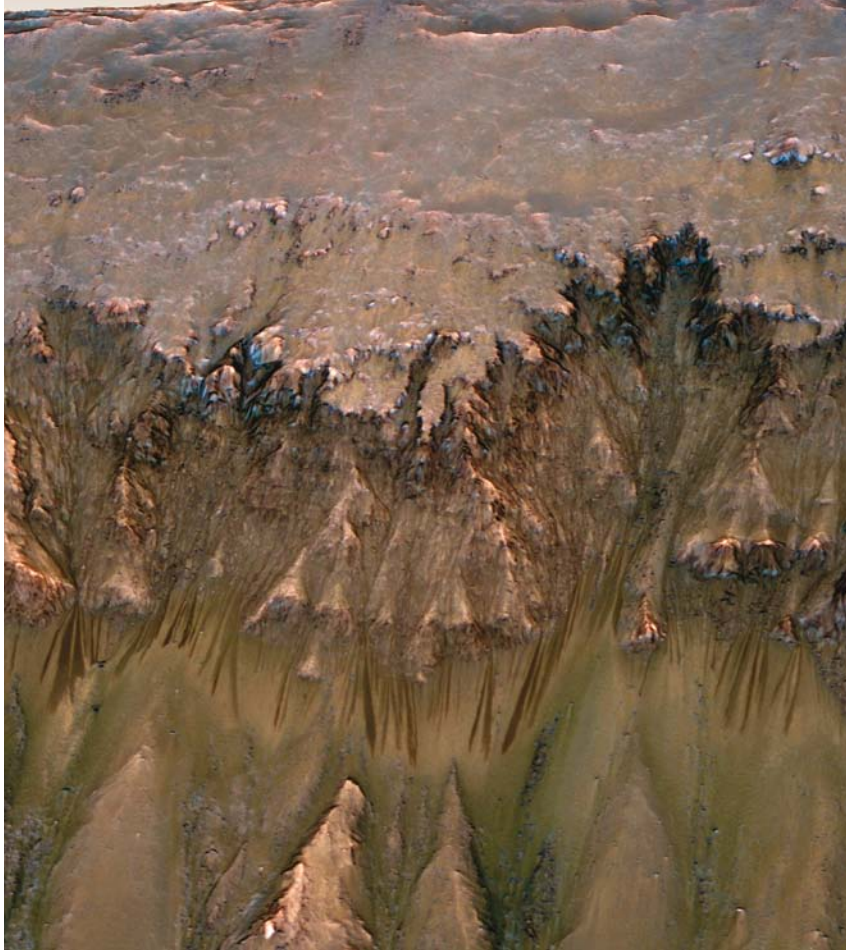
Peut-être les lignes de pente récurrentes sont-elles dues à de la glace fondant sous la surface? Nous savons, d'après la télédétection de neutrons, que les latitudes moyennes et élevées recèlent des étendues de glace peu profondes. Dans certains cratères d'impact récents, que nous avons découverts avec

HiRISE, de la glace a été mise à nu à des latitudes aussi basses que 40 degrés dans l'hémisphère Nord, un peu plus près de l'équateur que nous ne l'attendions.

A quoi ressemblent ces dépôts de glace? La glace présente sous la surface jonchée de roches est remarquablement propre, contenant peu de poussière de sol. Cela signifie que cette glace ne résulte pas de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, un processus qui remplirait les vides entre les fines particules du sol. Elle ne semble pas non plus provenir d'un vestige de chutes de neige, qui ne subsistent pas longtemps à la surface et disparaissent en se sublimant. On imagine plutôt que de l'eau salée diffuse depuis les profondeurs et regèle en formant une couche de glace propre sous la surface.

Ce mécanisme évite diverses difficultés liées à la sublimation. Parce que la glace





3. DES EPISODES RECENTS D'EROSION OU DE DEPOT dans les ravines martiennes (*page ci-contre*) apparaissent en bleu sur cette image en fausses couleurs. Le givre de glace carbonique est probablement à l'œuvre plutôt que l'eau. En revanche, ce sont peut-être bien des écoulements d'eau qui produisent les lignes de pente récurrentes qui strient les parois de certains cratères (*ci-dessus*).

l'eau pure se sublime beaucoup plus vite que la glace d'eau salée, presque toute la glace qui s'est formée à faible profondeur sous la surface, à une époque passée où régnait un climat différent, aurait disparu. Seule resterait la glace la plus salée. En revanche, les pentes escarpées exposées au Soleil pourraient absorber assez de chaleur durant l'été pour que fonde la glace d'eau salée qui s'y trouve.

Nous disposons d'observations qui vont dans ce sens. Le maximum d'activité des lignes de pente récurrentes correspond non pas au moment où la surface est réchauffée au maximum, mais au pic des températures enregistrées à faible profondeur sous la surface, qui se produit quelques mois plus tard. Reste une difficulté : si les températures estivales sont assez élevées pour faire fondre la glace saumâtre, alors la réserve de glace devrait disparaître petit à petit. Disparaît-elle effectivement ? Les lignes de pente récurrentes ne sont-elles actives que pendant quelques années ou quelques décennies en un endroit donné ? Les réserves se reconstituent-elles d'une façon ou d'une autre, qu'il nous reste à découvrir ?

Malgré toutes ces preuves indirectes, il n'y a pas eu, jusqu'à présent, d'identification directe d'eau sur les sites des lignes de pente récurrentes. Le spectromètre de MRO pourrait y parvenir, mais il lui manquera peut-être la résolution spatiale suffisante pour discerner des stries aussi fines à la surface. En outre, l'orbite de MRO est telle que la sonde observe en permanence l'après-midi sur Mars, quand l'eau n'est probablement pas abondante ni même présente à la surface. Grâce aux études réalisées en laboratoire, nous savons aujourd'hui que l'eau salée peut être stable à la surface de Mars, mais soit en début de journée, soit en début de nuit.

L'humidité relative de l'atmosphère décroît quand l'air se réchauffe le matin, et augmente quand l'air se refroidit le soir. La température et l'humidité relative sont alors toutes deux assez élevées pour que certains types de sels absorbent de l'eau par déliquescence et la retiennent. Le soir, ce processus peut avoir lieu après le coucher du Soleil, mais il est alors difficile de faire des observations ciblées. Le matin, la déliquescence se produit après le lever du Soleil.

De futurs projets de sonde spatiale en orbite autour de Mars munie d'un spectromètre à haute résolution et utilisable à différentes heures de la journée sont à l'étude. Ils pourraient, à terme, confirmer la présence d'eau liquide (ou l'infirmier !).

Des environnements favorables à des extrémophiles ?

Si les lignes de pente récurrentes reflètent bien la présence d'eau liquide, la question qui viendra ensuite sera celle de l'environnement habitable pour des microbes adaptés à une salinité élevée. Nous avons fait beaucoup de progrès dans la connaissance des organismes extrémophiles sur Terre (ces espèces qui peuvent survivre à des températures très basses ou très élevées, à une sécheresse ou une salinité extrêmes, à une forte exposition aux rayonnements, etc.). Nous savons que de tels organismes ne se contentent pas de survivre, mais peuvent aussi se reproduire à des températures inférieures à -20°C dans certains liquides.

Certaines solutions eutectiques ne sont pas habitables (à notre connaissance), et il n'est donc pas toujours vrai que là où il y a de l'eau liquide sur Terre, il y a de la vie. Mais dans beaucoup de sites de lignes de pente récurrentes, il fait vraisemblablement plus de -20°C jusqu'à une profondeur de quelques centimètres pendant certaines parties des journées d'été. Et les extrémophiles de la planète rouge, s'ils existent, pourraient être plus tolérants aux extrêmes martiens que les microbes terrestres.

Tout cela reste de la spéculation. Pour l'instant, nous travaillons à mieux comprendre la nature des lignes de pente récurrentes. Nous avons désormais identifié beaucoup plus de sites présentant de tels sillons actifs que dans notre travail initial. D'autres chercheurs ont réalisé des études en laboratoire et des études de terrain en Antarctique pour essayer d'observer et de reproduire sur Terre ce que HiRISE voit depuis son orbite autour de Mars. Nous espérons que nous réussirons à expliquer ce phénomène et à confirmer que l'eau liquide est vraiment responsable des lignes de pente récurrentes. Peut-être que parmi la multitude de découvertes d'eau sur Mars, la 1001^e sera la bonne ! ■

MARS

en images

Jessica Flahaut et Pierre Thomas

Mars n'est pas la planète déserte qu'on a pu imaginer. Elle se révèle d'une grande richesse. Les images prises depuis l'espace ou au sol en témoignent.

En 1965, une sonde, *Mariner 4*, a survolé Mars pour la première fois. Les images transmises étaient décevantes : par un malencontreux hasard, les caméras ratèrent les endroits intéressants et ne montrèrent que des images de surface désolée et ressemblant à la Lune. Depuis, neuf sondes ont été mises en orbite autour de Mars ; trois atterrisseurs fixes et quatre robots mobiles s'y sont posés. Toutes ces missions spatiales ont collecté des millions de données analytiques (composition des roches, données météorologiques...). Mais surtout, elles ont pris des milliers d'images du haut d'une orbite ou au sol. Toutes montrent que Mars ressemble à la Lune, à la Terre et... à Mars. Elle a ses caractéristiques propres, par exemple une atmosphère qui se transforme en neige carbonique chaque hiver aux pôles et redevient gazeuse avec l'été.

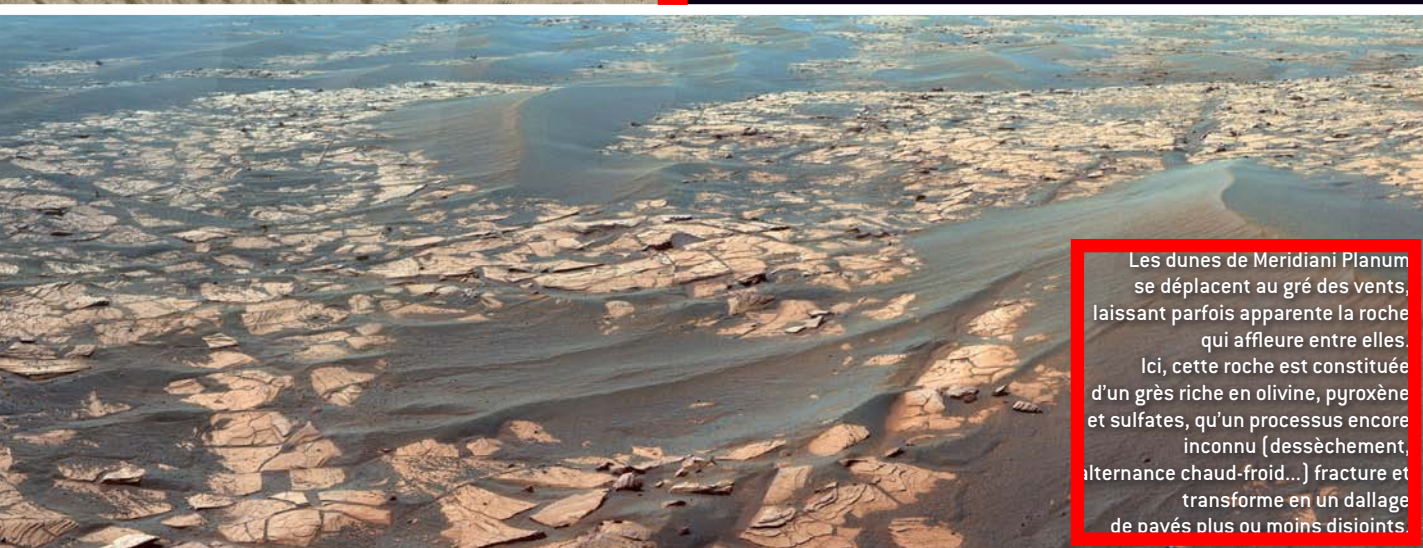
Ces images, s'ajoutant aux données analytiques, permettent de reconstituer en partie l'histoire de Mars. De surcroît, elles sont magnifiques. Grâce à des jeux de filtres, la NASA a reconstitué ce que verrait un homme se promenant sur Mars, ou ce que verrait un œil humain si ces paysages étaient transportés sur Terre et éclairés avec une « lumière terrestre ». Ce portfolio vous révélera les beautés et l'étrangeté de cette planète et, surtout, vous fera rêver...

La mégadune du cratère Russell [1] est le siège de coulées sombres qui correspondent à des avalanches de poussière et de sable, déclenchées par la sublimation printanière de la glace de dioxyde de carbone qui recouvre la dune en hiver.





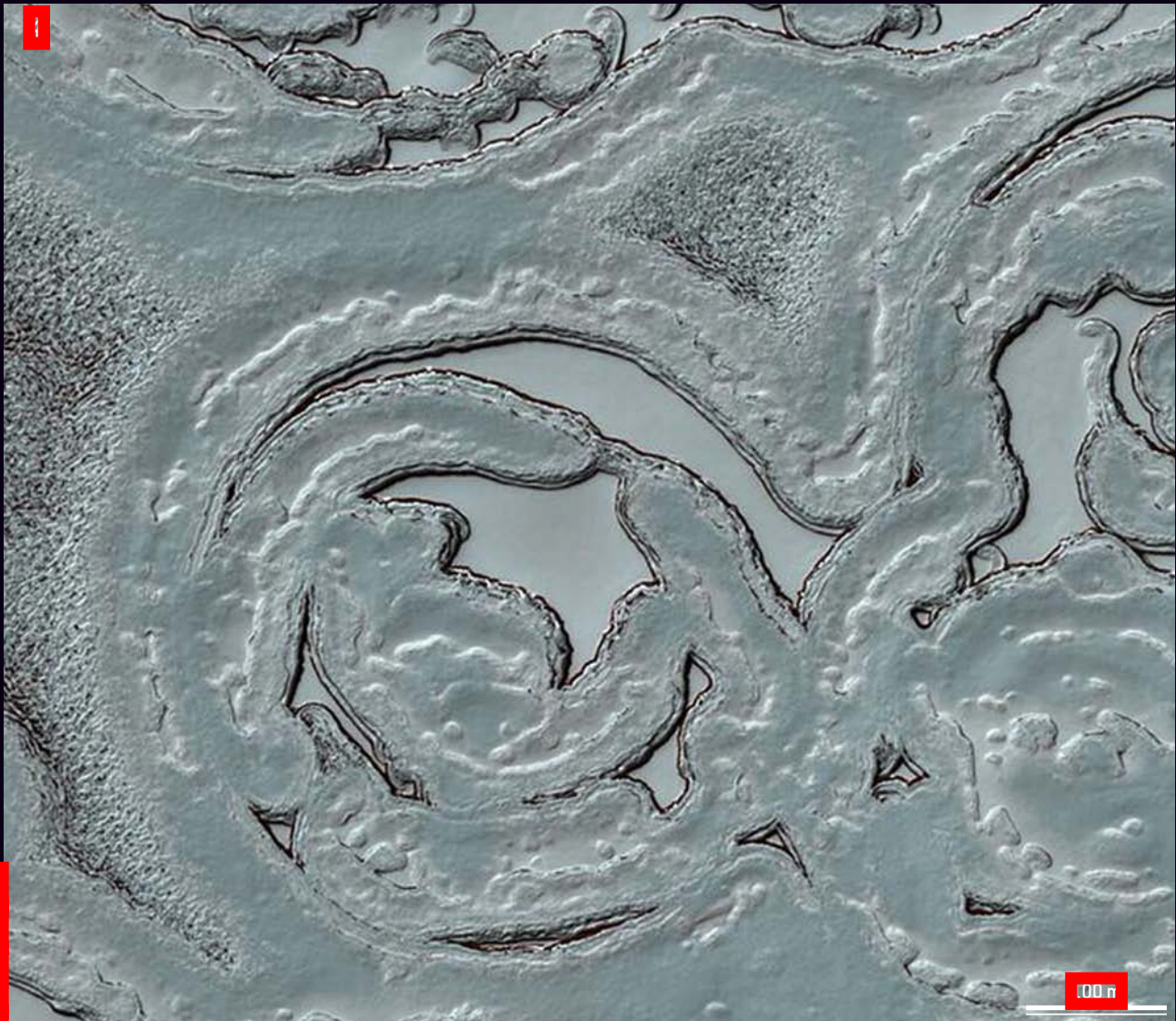
La majorité des paysages photographiés par les robots depuis le sol de Mars correspond à des « champs de cailloux » ou des dunes. Le robot *Spirit* a photographié les flancs des collines de Columbia et la plaine occupant le fond du cratère Gusev (2). *Opportunity* a laissé ses traces dans un vaste champ de dunes recouvrant Meridiani Planum (3).



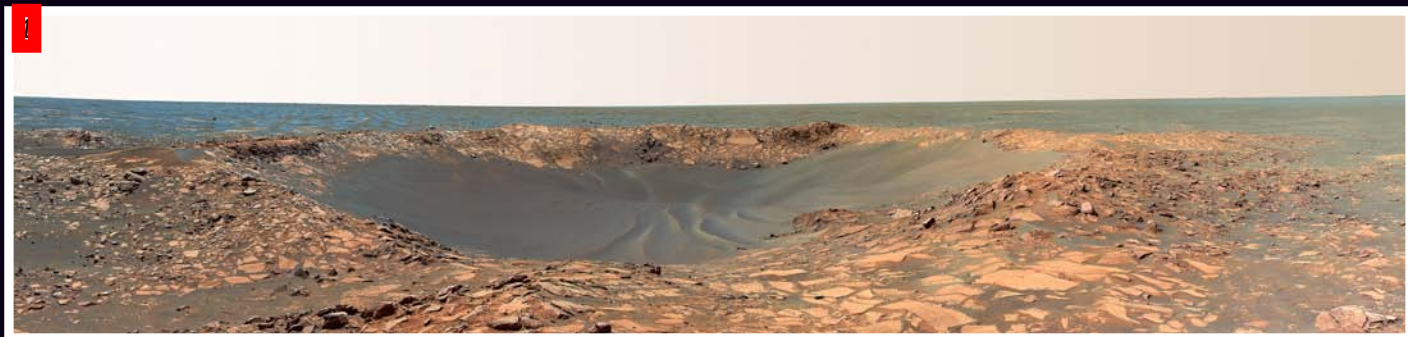
Les dunes de Meridiani Planum se déplacent au gré des vents, laissant parfois apparente la roche qui affleure entre elles. Ici, cette roche est constituée d'un grès riche en olivine, pyroxène et sulfates, qu'un processus encore inconnu (dessèchement, alternance chaud-froid...) fracture et transforme en un dallage de pavés plus ou moins disjoints.



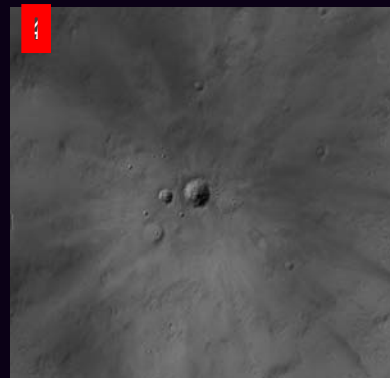
Différents phénomènes sculptent la surface de Mars. L'érosion des empilements sédimentaires d'Arabia Terra (1) montrent qu'ils forment les «millefeuilles sédimentaires». Les alvéoles (2) sont des dunes polygonales, accumulées sur le fond d'un cratère. Des vents provenant de plusieurs directions ont formé ces polygones de quelques centaines de mètres de « diamètre ». La coulée de lave (3) provient du volcan Arsia Mons et recouvre les plaines de Daedalia Planum situées à quelque 500 kilomètres au Sud-Est du volcan.



Les « gruyères » martiens (4), nommés « swiss cheese » par la NASA, sont visibles en été, lorsque la glace de dioxyde de carbone qui recouvre la calotte polaire Sud commence à se sublimer. Des dépressions se creusent jusqu'à atteindre une couche plus résistante située dix mètres plus bas et qui contient de la glace d'eau. Cette couche crée un fond plat. Le phénomène de sublimation se propage alors latéralement, creusant des chenaux, ici photographiés par la caméra HiRISE. Les réseaux de rides (image de la caméra CTX sur la sonde MRO, 5) à la surface des terrains sédimentaires de Terra Meridiani ont, quant à eux, été formés par l'action de l'eau liquide. Ils pourraient correspondre à des paysages « karstiques », témoins d'un réseau hydrologique plus ou moins superficiel ou souterrain (maintenant effondré) développé dans des roches solubles contenant des sulfates.

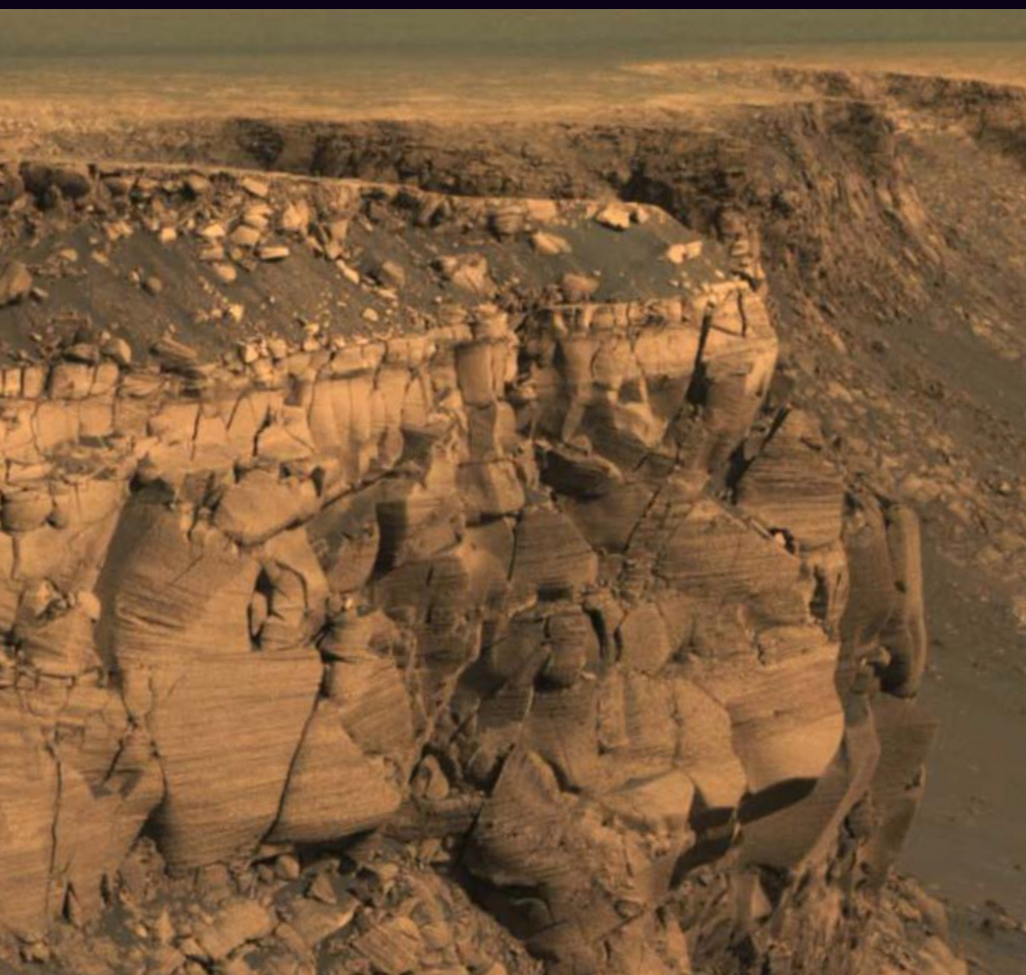
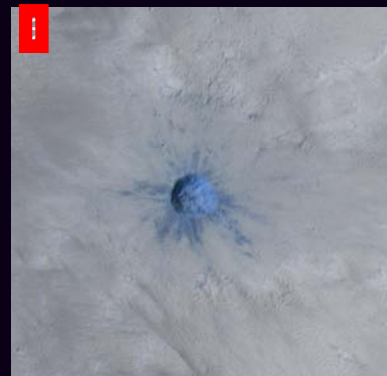
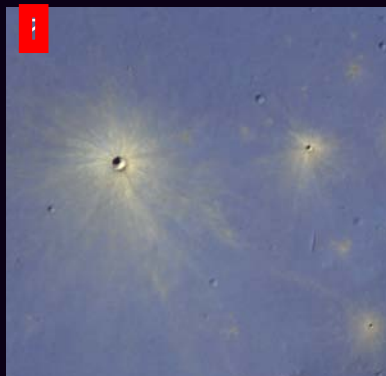
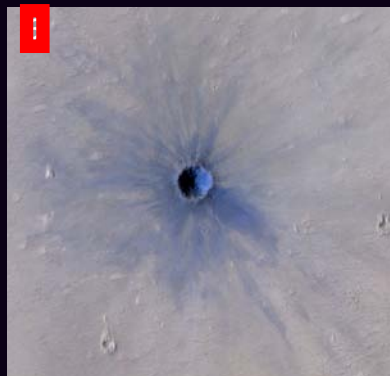


Les cratères Beagle (1) et Santa Maria (2) ont seulement quelques dizaines de millions d'années et sont peu dégradés par l'érosion. Les images d'*Opportunity* montrent qu'ils sont remplis de dunes et de sable transporté par le vent. Les cratères (3 à 8) photographiés en 2011 sont encore plus jeunes. La sonde MRO montre que leurs éjectas n'ont pas encore été recouverts de sable. Ces cratères, entre 10 et 50 mètres de diamètre, ont moins de six ans. Ils n'existaient pas en 2005 lorsque la sonde a survolé ces secteurs une première fois.



Les cratères d'impact qui percent Meridiani Planum constituent des « fenêtres » ouvertes dans le sous-sol de Mars. Les bords de ces cratères (Endurance, 9, et Victoria, 10) mettent au jour les roches. Ils nous racontent l'histoire géologique ancienne de Meridiani Planum : une succession de couches sédimentaires, parfois déposées par les vents (en bas des falaises), parfois déposées dans des mares peu profondes (en haut des falaises). Il y a 3,5 milliards d'années, Meridiani Planum était un vaste champ de dunes qui a été recouvert d'eau.





LES AUTEURS



Jessica FLAHAUT est postdoctorante à la Faculté des sciences de la Terre et du vivant de l'Université libre d'Amsterdam.

Pierre THOMAS est géologue au Laboratoire de géologie de Lyon (LGL-TPE) et professeur à l'École normale supérieure de Lyon. Il est le responsable scientifique d'un site traitant de l'actualité scientifique et géologique sur Mars.

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/ressources/fossiers-thematiques/nouvelles-mars>

Par-delà l'horizon

À ses débuts, la théorie quantique a semblé imposer des limites à la science et aux techniques.

L'exemple du calcul quantique montre qu'au contraire, de nouveaux horizons s'ouvrent.

Au XIX^e siècle, quelqu'un, probablement Camille Flammarion, a représenté la quête de la connaissance par une gravure. Agouillé dans un paysage torrestre stylisé, un voyageur passe la tête à travers le firmament, là où ciel et terre se rencontrent, et contemple l'inconnu (voir la figure page 53). Un temps réputée issue de la Renaissance, la « gravure sur bois de Flammarion » invite à deux interprétations diamétralement opposées de ce qu'est la connaissance.

Selon la première, elle n'est limitée que par une barrière imaginaire que l'activité scientifique finit toujours par franchir ; selon la seconde, la connaissance est limitée par une barrière véritable que l'on ne peut franchir que par l'imagination. Dans cette dernière vision, nous serions donc enfermés à l'intérieur de la bulle finie de ce qui nous est familier. Nous ne pouvons

donc espérer comprendre que le monde de notre expérience directe, tandis que ce qui se trouve à l'extérieur de la barrière reste inaccessible à la compréhension et à l'explication. L'activité scientifique ne fait-elle que nous dévoiler l'impossibilité de dépasser notre horizon habituel, ou transcende-t-elle la bulle du familier pour révéler des horizons nouveaux ? Nous allons voir que, dans le domaine du calcul, elle nous a amenés à franchir la barrière infranchissable que semblait constituer l'horizon quantique derrière lequel se trouve le monde microscopique.

Pour beaucoup, la théorie quantique montrerait clairement que c'est la seconde vision – la vision pessimiste de la connaissance – qui s'impose. Les théoriciens ont très tôt enseigné à son propos une irrationalité délibérée : « Si vous pensez que vous comprenez la théorie quantique, c'est que vous

ne la comprenez pas. » « Vous n'avez pas le droit de poser cette question. » « La théorie est insondable, et donc le monde aussi. » « Les choses sont comme cela, sans raison ni explication. » Voilà le genre de phrases qu'on lisait dans les manuels de physique quantique et les textes de vulgarisation...

Pour autant, les avancées des dernières décennies contredisent ces allégations. Depuis que la théorie quantique existe, les physiciens ont souvent pensé que des obstacles en découlent, qui empêchent d'exploiter la nature quantique aussi facilement que la physique classique (non quantique) nous a habitués à le faire. Toutefois, aucun de ces obstacles ne s'est jamais concrétisé. Au contraire, la théorie quantique s'est révélée libératrice. Loin d'être limitantes, les propriétés fondamentalement quantiques telles que la superposition des états, leur intrication, la quantification et l'aléatoire se sont montrées d'une grande fécondité. Grâce à elles, toutes sortes de dispositifs aux effets presque miraculeux, tels les lasers, les circuits intégrés, les horloges atomiques, etc., ont été mis au point.

Et ce n'est que le début. Nous allons exploiter de plus en plus les phénomènes quantiques au sein de systèmes de communications et de calcul d'une puissance

quantique

David Deutsch et Artur Eker

usque-là inconcevable. Nous sommes en train de découvrir de nouvelles façons d'exploiter la nature et de produire du savoir.

En 1965, Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel, prédisait que le nombre de transistors par microprocesseur doublerait tous les deux ans environ. Cette « loi de Moore » reste vérifiée depuis plus d'un demi-siècle... Pour autant, il était déjà clair en 1965 qu'elle trouverait une limite physique lorsqu'on s'approcherait de l'échelle atomique. Et après ? Après, les ingénieurs entreraient dans le domaine de l'inconnu.

Par-delà l'incertitude

De même, dans la vision usuelle de la théorie quantique, le principe d'incertitude de Heisenberg est censé représenter un horizon de l'inconnaissable, même avec toute la technique du monde. Il édicte en effet que plus notre connaissance d'une certaine propriété d'un système est précise, plus notre connaissance de certaines autres propriétés du même système sera imprécise. La détermination précise de la position d'une particule, par exemple, implique que celle de sa vitesse devient imprécise. Ce qui ne peut être connu ne pouvant être maîtrisé, les tentatives de

L'ESSENTIEL

Le caractère quantique des phénomènes microscopiques était censé limiter la précision des observations qui y sont possibles.

Enracinée dans certaines visions philosophiques, cette idée est erronée.

Certains traits des phénomènes quantiques peuvent être observés avec une précision absolue, par exemple afin de créer des bits et exécuter des calculs binaires.

Les phénomènes quantiques peuvent aussi être exploités pour de nouveaux types de calculs, voire de raisonnements.

manipulation d'objets microscopiques semblent donc se heurter à un aléa sous-jacent, à des corrélations (des rapports entre phénomènes) inexplicables en physique classique et à d'autres remises en question de la hiérarchie temporelle entre causes et effets. Dès lors, une conclusion incontournable semble s'imposer : la fin du progrès des techniques de l'information ne saurait qu'être proche.

Aujourd'hui pourtant, des physiciens contrôlent de façon routinière divers phénomènes quantiques et ils ne se heurtent pas à de telles barrières. Ils codent de l'information à l'aide d'atomes ou de particules élémentaires, puis, en dépit du principe d'incertitude, la traitent avec une extrême précision. Ils créent ainsi des fonctionnalités qui ne pourraient être réalisées autrement. De quoi s'agit-il ?

Examinons d'abord le bit classique, c'est-à-dire la brique de base de l'information telle qu'on la conçoit classiquement. Pour un physicien, un bit est un système physique qui peut être placé dans l'un de deux états, représentant deux valeurs logiques, oui ou non, vrai ou faux, et que l'on note 1 ou 0. Dans les ordinateurs dits classiques, un bit peut correspondre à la présence ou à l'absence d'une charge dans

un condensateur. Un bit quantique peut par exemple être obtenu à partir d'un atome, en utilisant deux états d'énergie d'un électron atomique : l'état de plus basse énergie, que l'on nomme l'état fondamental, peut jouer le rôle du 0, tandis que celui du 1 peut être joué par un état d'énergie supérieure.

Pour manipuler cette information, les physiciens envoient sur l'atome des impulsions lumineuses π , c'est-à-dire des impulsions ayant la fréquence, la durée et l'amplitude adéquates pour faire passer l'atome de 0 à l'état 1 et *vice-versa*. Les physiciens peuvent aussi ajuster la fréquence pour manipuler deux atomes qui interagissent, afin qu'un atome contrôle ce qui arrive à l'autre. Nous avons ainsi tous les ingrédients nécessaires à la construction des composants élémentaires des ordinateurs classiques que sont les portes logiques à un et à deux bits, et cela sans que le principe d'incertitude ne soit une entrave.

Précisons ce que le principe d'incertitude dit exactement et ce qu'il ne dit pas. Parmi les propriétés mesurables d'un atome ou d'un autre système physique, que l'on appelle « observables », certaines peuvent être déterminées, à un instant donné, de façon précise. Le principe d'incertitude n'exclut donc pas qu'une observable puisse être mesurée avec précision. Il affirme juste que toutes les observables d'un système physique ne sauraient être mesurées avec précision en même temps.

Dans le cas d'un électron atomique, l'observable mesurée précisément est son énergie et, de fait, dans l'état 0 comme dans l'état 1, la particule électrique a une énergie parfaitement définie. Cela implique que l'autres observables, telles la position et la vitesse, ne peuvent être déterminées avec précision. On dit que l'électron est délocalisé (il n'a pas de position bien définie) et, de même, sa vitesse prend simultanément toute une plage de valeurs. Si nous essayions de stocker de l'information au moyen de la position et de la vitesse de particules, nous nous heurterions effectivement à une limite quantique. La solution consiste donc à choisir judicieusement les observables qui vont servir de bits quantiques pour le codage de l'information.

Cette situation rappelle le numéro comique où un patient dit à son docteur : « Ça me fait mal quand je fais ceci. », ce à quoi le docteur répond : « Alors ne le faites pas. » Si telle ou telle propriété physique d'une particule se révèle difficile à déterminer de

façon précise, le mieux est de contourner le problème en se servant d'autres observables pour stocker de l'information.

Si notre seul but est de construire des ordinateurs classiques en employant des atomes plutôt que des transistors, alors tout ce dont nous avons besoin, ce sont des observables que l'on peut mesurer précisément. Toutefois, la physique quantique offre bien plus, puisqu'elle nous donne aussi la possibilité d'exploiter des observables qui, dans certaines situations, ne peuvent être mesurées que de façon imprécise : les observables « floues ». Le fait que les observables puissent prendre simultanément de multiples valeurs augmente beaucoup leur intérêt pratique.

Une racine carrée de NON

L'énergie, par exemple, est souvent d'une valeur précise, mais un système physique peut être dans plusieurs états d'énergie à la fois. Par exemple, en plus d'être dans l'état fondamental 0 ou dans l'état excité 1, un électron atomique peut aussi être dans une superposition des deux états, c'est-à-dire à la fois dans l'état 0 et dans l'état 1.

Tout système physique est susceptible de se trouver dans un état superposé. Quand on sait préparer un tel état, le mesurer et le manipuler de façon fiable, il peut servir de bit quantique. Dans le cas d'un bit quantique atomique, l'usage d'impulsions lumineuses adéquates permettra de commuter l'énergie d'un électron d'une valeur précise à une autre, ou encore d'une valeur précise à une valeur indéterminée (état superposé), et *vice-versa*. Ainsi, une impulsion π échange les états 0 et 1, tandis qu'une impulsion $\pi/2$ (de même fréquence mais de durée ou d'amplitude moitié) place l'électron dans une superposition des états 0 et 1.

Si nous mesurons l'énergie de l'électron dans une telle superposition, nous trouverions soit l'énergie de l'état fondamental 0, soit l'énergie de l'état excité 1, les mesures donnant l'un ou l'autre résultat avec des probabilités égales (50 pour cent). Les prophètes de malheur en concluent que nous sommes limités par l'aléa quantique.

En fait, il n'en est rien, car on peut facilement contourner cet obstacle apparent et, ce faisant, créer une fonction nouvelle. Au lieu de mesurer l'électron, laissons-le dans cet état de superposition. Considérons par exemple un électron dans l'état 0, et appliquons-lui une première impul-

LES AUTEURS



David DEUTSCH est professeur de physique à l'Université d'Oxford, en Grande-Bretagne. Artur EKERT dirige le Centre des technologies quantiques de Singapour ; il est aussi professeur à l'Institut de mathématiques d'Oxford.

ion $\pi/2$, puis une seconde. Quand nous mesurons alors l'état de cet électron, on trouve qu'il est dans l'état 1, et cela dans 100 pour cent des mesures (voir l'encadré page 52). Au lieu d'être « floue », l'observable a été rendue précise.

Pour comprendre l'importance d'une telle manipulation, envisageons la porte logique la plus élémentaire d'un ordinateur, la porte NON. Avec cet élément de base des circuits logiques, le signal d'entrée, 0 ou 1, est transformé en son contraire, c'est-à-dire en 1 ou 0. Supposons maintenant que l'on se pose le problème suivant : construire la « racine carrée » de NON, c'est-à-dire une porte logique qui, agissant deux fois de suite sur une entrée, produit sa négation. À partir des portes logiques classiques, ce problème est sans solution, alors qu'une impulsion $\pi/2$ résout le problème pour un bit quantique atomique, puisque la succession de deux impulsions $\pi/2$ inverse 0 en 1, ou 1 en 0. Des expérimentateurs ont obtenu les portes « racines carrées » et d'autres portes logiques impossibles en contexte classique à l'aide de bits quantiques constitués de photons, d'ions piégés, d'atomes ou encore de spins. Tous ces composants nouveaux constituent les éléments de base d'un ordinateur quantique.

Des algorithmes bien plus puissants

Lancé dans une tâche, un ordinateur, classique ou quantique, accomplit une séquence précise d'instructions – un algorithme. Or, on quantifie l'efficacité d'un algorithme en évaluant l'augmentation de son temps d'exécution quand l'importance (en quantité, en taille, ...) des entrées augmente. Le temps nécessaire à la multiplication de deux nombres à N chiffres par l'algorithme habituel (celui que nous avons appris à l'école) augmente par exemple comme N^2 . En revanche, le temps de calcul nécessaire pour accomplir, par la méthode la plus rapide que nous connaissons, l'opération inverse, c'est-à-dire la factorisation d'un nombre en ses facteurs premiers, augmente plus vite que toute puissance de N . L'algorithme de factorisation est donc considéré comme inefficace.

Toutefois, en permettant de construire de nouvelles portes logiques, la mécanique quantique rend de nouveaux algorithmes possibles. L'un des exemples les plus frappants est la factorisation d'un nombre. En 1994, Peter Shor, aux Laboratoires Bell,

COMMENT DEPASSER LES LIMITES DU CALCUL QUANTIQUE

Le monde microscopique est régi par des lois quantiques, et cela passe pour un obstacle infranchissable pour la miniaturisation en électronique. Toutefois, les physiciens ont appris à contourner les obstacles qui les inquiétaient tant. Et l'on peut s'attendre à ce que les ordinateurs atteignent leur plein potentiel au niveau quantique. Ils dépasseront alors de loin les machines actuelles.

Principe d'incertitude de Heisenberg

PROBLÈME : Ce principe quantique fondamental limite la précision de certaines mesures. Ainsi, si l'on détermine exactement la position d'une particule, elle aura tout un éventail de vitesses simultanées ; si, au contraire, c'est sa vitesse que l'on mesure exactement, sa position s'étalera de manière inéluctable. C'est pourquoi l'utilisation de la position et de la vitesse est inappropriée au stockage et au traitement de l'information.

Position déterminée
avec précision

Vitesse floue,
imprécisément
définie



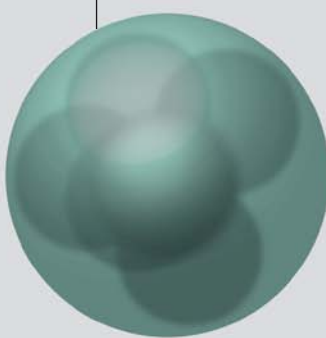
Position floue,
imprécise

Vitesse déterminée
avec précision



SOLUTION : Dans des situations où la vitesse et la position ne peuvent qu'être incertaines, d'autres grandeurs observables peuvent au contraire être bien définies. C'est souvent le cas de l'énergie, mais dans les situations où l'énergie est incertaine, d'autres grandeurs observables conviennent.

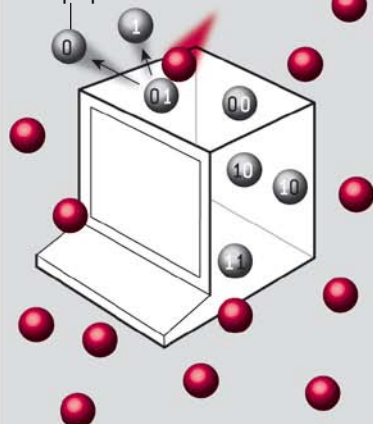
L'orbitale de la particule est
l'énergie parfaitement définie



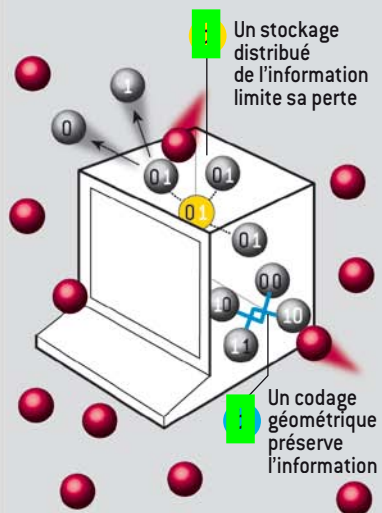
La décohérence des états de superposition

PROBLÈME : Les particules dont est formé un ordinateur interagissent avec leur environnement, ce qui fait perdre l'information stockée et fausse les calculs quantiques.

Les interactions détruisent les superpositions d'états 0 et 1



SOLUTION : Des techniques de correction d'erreurs peuvent compenser les effets de la décohérence assez longtemps pour que le calcul quantique s'achève. On peut par exemple répartir l'information quantique sur de multiples particules (a) ou la coder sous une forme géométrique, qui sera résistante par nature aux perturbations (b).



mis au point un algorithme quantique accomplissant la factorisation de nombres à N chiffres en une série d'étapes augmentant non pas exponentiellement, mais comme N^2 . Dans le cas d'autres types de problèmes, elle la recherche au sein d'une longue liste, les ordinateurs quantiques offrent des avantages moins marquants, mais ils seront tout de même notablement plus avantageux que les ordinateurs classiques. Certes, tous les algorithmes quantiques ne sont pas aussi efficaces que l'algorithme de

Shor, et nombre d'entre eux ne sont pas plus rapides que leurs équivalents classiques.

Pour toutes ces raisons, les premières applications pratiques des ordinateurs quantiques ne seront sans doute pas la factorisation, mais la simulation d'autres systèmes quantiques, tâche dont la durée dans les ordinateurs classiques augmente exponentiellement avec la taille des données. De telles simulations pourraient avoir un énorme impact en pharmacie ou dans le développement de nouveaux matériaux.

Pour autant, les ordinateurs quantiques n'existent pas encore. Ceux qui ne croient pas à la possibilité d'en réaliser mettent en avant le problème de l'enchaînement d'opérations logiques successives. En effet, outre les difficultés techniques liées à la manipulation d'atomes ou de photons uniques, il faut empêcher – et c'est le principal problème – que le calcul quantique ne soit perturbé par les interactions du système quantique, qui stocke et traite l'information, avec son environnement. Ce processus, que l'on nomme la décohérence, est souvent présenté comme une limite fondamentale au calcul quantique.

En fait, ce n'est pas le cas. La théorie quantique fournit des moyens de corriger les erreurs dues à la décohérence. En effet, si les sources d'erreurs satisfont certaines conditions – par exemple si les erreurs aléatoires se produisent indépendamment sur chacun des bits quantiques et si les portes logiques fonctionnent de façon assez précise –, alors il est possible de faire fonctionner les calculateurs quantiques de façon stable et aussi longtemps que l'on voudra.

Repousser les limites des mathématiques

Le cas des nouvelles fonctions logiques illustre le fait que les progrès de la connaissance du monde physique entraînent aussi les progrès en logique et en calcul. Bien que les vérités mathématiques soient indépendantes de la physique, nous en acquérons souvent la connaissance en exploitant des phénomènes physiques. Une démonstration mathématique est une suite d'opérations logiques. Donc, ce qui est démontrable ou non dépend des fonctions logiques (telle la fonction NON) que les lois physiques permettent de réaliser.

Ces fonctions doivent être assez simples sur le plan physique pour que nous ne puissions douter de leur fonctionnement, et notre confiance sur ce point est enracinée dans notre connaissance du monde physique. Puisqu'elle ajoute au répertoire des opérateurs logiques disponibles de nouvelles fonctions, telles que la « racine carrée » de NON, la physique quantique permettra aux mathématiciens de franchir les barrières que l'on supposait exister dans le monde des abstractions pures.

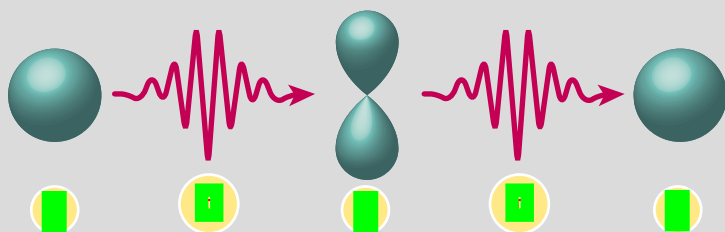
Supposons par exemple que la résolution d'un problème mathématique dépende de

IMPOSSIBLE? MAIS NON

Les ordinateurs quantiques seront non seulement capables de faire tout ce que font aujourd'hui les ordinateurs classiques, mais ils pourront aussi accomplir de nouvelles fonctions logiques. Dans l'exemple ci-dessous, deux états électroniques d'un atome représentent les deux valeurs possibles d'un bit. Dans un état ou l'autre d'un tel bit atomique, l'électron n'a ni position ni vitesse définies : il s'étale sur des régions sphériques ou ovales nommées orbitales (en vert), et sa vitesse a toute une plage de valeurs différentes simultanées. Néanmoins, les deux états ont une énergie bien définie, qui détermine la valeur du bit.

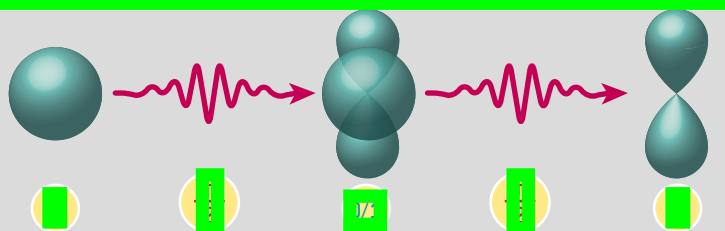
La fonction logique NON ordinaire

Pour effectuer l'opération logique la plus élémentaire, celle que l'on nomme NON et qui consiste à inverser la valeur d'un bit, on procède en envoyant des impulsions lumineuses de fréquence, durée et intensité adéquates (on les nomme des impulsions π). Si l'électron est initialement dans l'état 0, il se retrouve alors dans l'état 1, et vice-versa.



La racine carrée de NON

Cette procédure peut être modifiée afin de créer une opération qui n'existe pas en électronique conventionnelle : la « racine carrée de NON ». Pour ce faire, une impulsion dite $\pi/2$, d'amplitude plus faible et de durée plus courte que l'impulsion π , transforme l'état électronique 0 ou 1 en une superposition de ces deux états ; une seconde impulsion $\pi/2$ fait alors passer l'électron soit dans l'état 1 (s'il était au départ dans l'état 0), soit dans l'état 0 (s'il était au départ dans l'état 1). De telles nouvelles fonctions logiques confèrent aux ordinateurs quantiques une puissance énorme.



la détermination des facteurs premiers d'un nombre entier N . Supposons que N soit si énorme que, même si toute la matière de l'Univers avait été utilisée pour construire un ordinateur classique qui calculerait depuis que l'Univers existe, cette machine ne serait toujours pas capable de factoriser N . Or un ordinateur quantique pourra fournir les facteurs premiers rapidement, clef sans laquelle le problème mathématique resterait sans solution. Autrement dit, la physique quantique permettrait aux mathématiques de repousser leurs limites.

Puisque de nouveaux types de calculs sont possibles grâce aux phénomènes quantiques, pourquoi les physiciens ont-ils craint que la théorie quantique limite le progrès scientifique ? La réponse remonte à l'époque où cette théorie est née sous le nom de mécanique quantique. Erwin Schrödinger (1887-1961), l'un de ses pères, puisqu'il est l'auteur de son équation fondamentale, prévint un jour son auditoire qu'il allait dire quelque chose qui pouvait être considéré comme insensé : il déclara alors que son équation décrit toutes les évolutions possibles d'une particule, lesquelles ne sont « pas des alternatives, mais se produisent vraiment toutes simultanément ». Ce lauréat du prix Nobel de physique de 1933 ne faisait en fait qu'affirmer que son équation décrit la réalité ! Pour autant, Schrödinger éprouvait par avance le besoin de se défendre du risque qu'on le prenne pour un fou.

Une philosophie qui s'est égarée

Pourquoi en était-il ainsi ? Parce qu'au début du XX^e siècle, la plupart des physiciens étaient sous l'influence de doctrines philosophiques entravant l'acquisition de nouveaux savoirs. La physique fondamentale est en fait si intimement liée à la philosophie qu'au début du XX^e siècle, l'influence de cette dernière a pu avoir des effets nocifs sur des parties entières de la physique. Ces doctrines problématiques sont l'empirisme logique (« Si ce n'est pas vérifiable par l'expérience, cela n'a pas de sens. »), l'instrumentalisme (« L'essentiel est que les prédictions marchent, inutile de se préoccuper de ce qui les amène. ») et le relativisme philosophique (« Les affirmations ne sont pas objectivement vraies ou fausses, elles ne sont que légitimes ou illégitimes dans une culture particulière. »).

Tous ces courants ont en commun de s'opposer au réalisme philosophique, à savoir à l'idée pleine de bon sens que le monde physique existe et que la méthode scientifique permet d'accumuler des connaissances sur lui.

C'est dans cette atmosphère philosophique que le physicien Niels Bohr a développé son influente interprétation de la théorie quantique, qui nie la possibilité de parler de phénomènes comme s'ils existaient objectivement. On n'y est pas autorisé à se demander quelles valeurs prennent les grandeurs physiques tant qu'on ne les mesure pas. Les physiciens, qui, par vocation, ne peuvent s'empêcher de se poser de telles questions, ont essayé de ne plus le faire, et la plupart d'entre eux ont formé leurs étudiants à ne pas le faire. La théorie à la pointe du domaine scientifique le plus fondamental semblait contredire l'existence même d'une réalité physique connaissable objectivement.

Certains philosophes, tels Bertrand Russell et Karl Popper, n'ont pas abandonné le réalisme. Tous les physiciens non plus : Einstein (1879-1955) et David Bohm (1917-1992) se sont opposés au courant dominant, puis Hugh Everett (1930-1982) a proposé que les quantités physiques prennent réellement plus d'une valeur à la fois (ce qui est notre vision des choses). Toutefois, dans l'ensemble, les philosophes ne se sont pas intéressés vraiment à la réalité, et même si les physiciens ont continué à se servir de la théorie quantique dans un grand nombre de leurs domaines, la recherche sur la nature exacte des phénomènes physiques s'est égarée.

La situation s'améliore depuis deux ou trois décennies, et l'on peut dire que c'est la physique qui a remis la philosophie sur des rails. Les gens veulent de toute façon comprendre la réalité, et nous dépassons enfin les limites assignées par des points de vue philosophiques néfastes.

Et si la théorie quantique finit par être réfutée, de sorte que des barrières plus fondamentales empêchent la construction d'ordinateurs quantiques ? Ce serait stimulant, car cela nous permettra non seulement de faire évoluer la physique fondamentale, mais aussi sans doute d'envisager des techniques de calcul encore plus fascinantes. La théorie de « ce qui met la théorie quantique en défaut » ne peut qu'être prometteuse, de sorte que, d'une façon ou d'une autre, il n'y aura pas de limite au savoir et au progrès. ■



LA GRAVURE DE FLAMMARION, qui date du XIX^e siècle, soulève la question des limites à la connaissance et de la possibilité de les franchir.

BIBLIOGRAPHIE

D. Deutsch, *The Beginning of Infinity : Explanations that Transform the World*, Penguin. 2011.

Le monde quantique, *Dossier Pour la Science* n° 68, juillet-septembre 2010

J. Monroe et D. Wineland, *Calcul quantique avec des ions*, *Pour la Science*, n° 374, décembre 2008.

S. Aaronson, *Les limites du calcul quantique*, *Pour la Science*, n° 367, mai 2008.

J. Horgan, *L'ordinateur en mathématiques*, *Pour la Science*, n° 194, décembre 1993.

Des animaux

L'ESSENTIEL

Récemment encore,

les spécialistes
du comportement animal
refusaient d'attribuer
aux animaux
des émotions humaines,
tel le chagrin.

Un nombre croissant

d'indices suggèrent que
des animaux aussi variés
que les dauphins
ou les canards sont
affectés par la mort
de congénères proches.

Ces observations

soulèvent la question
du deuil chez l'animal.

en deuil ?

Barbara King

Selon un nombre croissant de témoignages, le comportement de multiples animaux, sauvages ou domestiques, est perturbé par la mort d'un proche. Ces animaux éprouveraient-ils du chagrin ?

Au large du golfe d'Arta, en Grèce, à bord d'un navire de recherche, Joan Gonzalvo observe un grand dauphin femelle à l'évidence en détresse. Instantanément, à contre-courant, elle pousse de son rostre et de ses nageoires pectorales un nouveau-né, sans doute le sien. Le petit est mort. Flottant en plein soleil, il ne tarde pas à se décomposer. De temps à autre, la mère ôte des lambeaux de chair et de peau du corps sans vie. Le deuxième jour, la femelle n'a pas abandonné son petit. Son comportement commence à inquiéter J. Gonzalvo et ses collègues. Non seulement elle s'agite toujours autour du cadavre, mais elle ne s'alimente pas normalement, ce qui est risqué pour sa santé, car les dauphins ont un métabolisme élevé. Parmi les 150 dauphins du golfe d'Arta, trois de ses congénères s'approchent, mais aucun ne vient perturber la mère, ni ne la suit.

On est en 2007. Biologiste marin à l'Institut de recherche Tethys, à Milan en Italie, J. Gonzalvo décide de ne pas récupérer le corps du petit pour effectuer une autopsie, comme il l'aurait fait en temps ordinaire dans le cadre de ses recherches. « Je ne suis pas intervenu par respect », m'a-t-il raconté. « Nous avons été les témoins privilégiés de

ce lien évident qui unit les mères et leurs petits chez les grands dauphins. Je les étudie depuis plus de dix ans et il était beaucoup plus intéressant pour moi d'observer ce comportement naturel que de l'interrompre en interférant de façon abrupte et en troublant cette mère visiblement plongée dans un grand désarroi. Selon moi, elle était en train de faire le deuil de son enfant. »

Définir le deuil

La mère ressentait-elle vraiment de la douleur face à la mort de son petit ? Ou était-elle seulement perturbée par le fait de ne plus le voir bouger ? Nombre d'histoires de ce type, rapportées ces dernières années sur des animaux variés – cétacés, grands singes, éléphants et quantités d'autres espèces allant des animaux d'élevage à ceux de compagnie –, témoignent de comportements altérés en réaction à la mort d'un proche et soulèvent la question du deuil chez les animaux. Toutefois, le sujet est délicat. Il est aisé de projeter sur des animaux des émotions humaines, tel le chagrin, et de laisser ces interprétations anthropomorphiques et sentimentales prendre le pas sur la démarche scientifique.

Depuis deux siècles, les scientifiques débattent avec vigueur de l'aptitude des animaux à exprimer des émotions autres que celles associées au soin parental, à la survie ou à la reproduction. Dans ses ouvrages *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle* (1871) et *L'expression des émotions chez l'homme et chez les animaux* (1872), Charles Darwin soutient que les animaux « supérieurs » tels que les primates éprouvent et expriment des émotions semblables à celles des hommes, à des degrés différents. Pour lui, ces similitudes s'éclairent quand on considère que ces espèces et les hommes ont un ancêtre commun. Darwin pense, par exemple, que les singes éprouvent des sentiments tels que la peine, la jalousie, le plaisir ou la contrariété. Or attribuer de telles émotions aux animaux va à l'encontre des raisonnements scientifiques de l'époque. Au début du XX^e siècle, l'approche comportementaliste prévaut : on ne peut étudier avec rigueur que les comportements observables chez les animaux et non leur vie intérieure.

Peu à peu, l'intérêt scientifique pour les émotions animales a grandi, en partie grâce à des anecdotes récoltées sur le terrain lors d'études à long terme sur des mammifères dotés d'un gros cerveau. En Tanzanie, Jane



1. UN DAUPHIN FEMELLE transporte le corps sans vie de son petit sur sa nageoire dorsale, au large de Dana Point, en Californie.

Goodall raconte la lente agonie du jeune chimpanzé Flint, mort de tristesse quelques semaines après le décès de Flo, sa mère. Au Kenya, Cynthia Moss décrit comment les éléphants entourent leurs compagnons sur le point de mourir et palpent leur dépouille. C'est ainsi que les biologistes de terrain et les anthropologues ont commencé à s'interroger sur l'existence du deuil chez les animaux - d'un chagrin lié à la mort d'un proche.

Pour étudier ce phénomène, les scientifiques ont besoin d'une définition qui le différencie des autres émotions. Considérer le deuil comme une réaction animale face à la mort n'est pas assez restrictif : cette formule englobe tout comportement lié à la disparition d'un compagnon. Des conditions supplémentaires sont nécessaires. D'une part, deux animaux (ou plus) doivent avoir choisi d'être ensemble pour d'autres raisons que celles liées à leur survie (se nourrir et se reproduire). D'autre part, lorsque l'un meurt, le comportement routinier du survivant doit s'en trouver altéré : il passera peut-être moins de temps à manger, à dormir, adoptera une posture ou des expressions faciales indiquant qu'il est déprimé ou perturbé. Ou tout simplement, il aura l'air en mauvaise santé. De plus, il s'agit de différencier chagrin et tristesse : un animal ayant du chagrin doit être bouleversé plus profondément et sans doute aussi plus longtemps.

Cette approche bipartite du deuil animal est cependant imparfaite. Comment évaluer de façon rigoureuse ce que signifie être « bouleversé plus profondément » ? En outre, le critère d'évaluation du chagrin varie-t-il d'une espèce à l'autre ? Et si, chez certaines espèces, la douleur prenait des formes que

L'AUTEUR



Barbara KING est professeur d'anthropologie au College of William and Mary.

en Virginie, aux États-Unis

BIBLIOGRAPHIE

M. Bekoff, *Les émotions des animaux*, Payot et Rivages, 2013.

B. J. King, *How Animals Grieve*, University of Chicago Press, 2013.

es humains ne perçoivent pas comme des signes de deuil ? À ce jour, les données dont disposent les scientifiques sont insuffisantes. De plus, il est difficile de savoir si les mères et autres proches apportant nourriture et protection à des petits remplissent les premières conditions de la définition, puisque leur comportement répond à l'instinct de survie. Pourtant, ils sont susceptibles d'être les premiers à ressentir de la douleur quand les petits disparaîtront.

Les études futures sur le deuil animal aideront à préciser cette définition. Pour l'heure, elle offre un premier cadre pour évaluer les réactions comportementales des animaux face à la mort de leurs proches. Par exemple, les mères de babouins et de chimpanzés vivant à l'état sauvage en Afrique portent parfois leur petit mort, pendant des jours, des semaines, voire plusieurs mois. À première vue, ce comportement s'apparente au deuil. Mais elles ne montrent aucun signe flagrant d'agitation ou de détresse, et leur comportement routinier n'est pas altéré - elles s'accouplent, par exemple. On ne peut donc parler de deuil.

Éléphants, dauphins, girafes..

Un grand nombre d'espèces ont néanmoins des comportements correspondant à la définition bipartite du deuil. En 2003, Iain Douglas-Hamilton, fondateur de l'association *Save the Elephants*, et son équipe ont observé, dans la réserve nationale de Samburu, au Kenya, la réaction d'éléphants lors de la mort de la matriarche d'un groupe, Eleanor. Lorsque l'éléphante s'est effondrée, la matriarche d'un autre groupe, Grace, s'est immédiatement approchée, la soutenant de ses défenses tandis qu'elle se relevait. Quand Eleanor s'est de nouveau écroulée, Grace est restée à ses côtés, poussant son corps pendant au moins une heure, alors que le groupe d'Eleanor s'était remis en route. Puis Eleanor est morte. Au cours de la semaine suivante, les femelles de cinq groupes d'éléphants, y compris celui d'Eleanor, ont manifesté de l'intérêt pour la dépouille de leur congénère. Certaines tiraient sur le corps, le poussant de la trompe ou de la patte, ou se balançant d'avant en arrière, appuyées contre la dépouille.

Les cétacés sauvages semblent avoir une réaction collective similaire. En 2001, aux îles Canaries, Fabian Ritter, de l'organisation *Mammal Encounters Education Research*, a

observé un dauphin à dents dures (*Stenopredanensis*) femelle repoussant et attirant le cadavre de son petit, comme le faisait la mère du golfe d'Arta. En revanche, elle n'était pas seule. Par moments, deux dauphins adultes l'escortaient et, à d'autres, un groupe d'au moins 15 dauphins ralentissait sa course pour inclure, dans son sillage, la mère et le petit. Et lorsqu'au cinquième jour, elle a commencé à faiblir, les autres dauphins l'ont relayée, portant le petit sur leur dos.

Les girafes paraissent aussi perturbées par la mort d'un proche. En 2010, dans le sanctuaire sauvage de Soyambu, au Kenya, une girafe de Rothschild femelle a donné naissance à un girafeau dont le pied était difforme. Le petit marchait peu, condamné à une plus grande immobilité que les autres. Durant les quatre semaines de vie du girafeau, Zoe Muller, biologiste travaillant au Kenya dans le cadre du projet de conservation de l'espèce, n'a jamais vu la mère s'éloigner à plus de 20 mètres de son petit. Elle ne participait plus aux activités coordonnées du troupeau, telle la recherche de nourriture.

Un jour, Z. Muller a constaté que le troupeau se comportait de façon inhabituelle. Sur la défensive, 17 femelles, dont la mère du petit, fixaient du regard un mourré. Le petit y était mort une heure plus tôt. Les femelles manifestaient un vif intérêt pour le cadavre, s'en approchant, puis reculant. L'après-midi, elles étaient 23, rejointes par 4 jeunes girafes, certaines touchant le cadavre de leur museau. Dans la soirée, 15 d'entre elles se sont approchées plus près encore et ont entouré étroitement le corps.

Les jours suivants, de nombreuses girafes sont venues près du jeune défunt. Certains mâles se sont approchés dans un périmètre de 100 mètres, sans pour autant s'intéresser au cadavre du petit. Ils récoltaient de la nourriture ou examinaient l'état reproducteur des femelles. Le troisième jour, Z. Muller a trouvé la mère, seule sous un arbre, à 50 mètres de l'endroit où était mort son petit. Le corps, lui, n'y était plus. La biologiste le découvrit plus tard, à moitié dévoré, sous ce même arbre. Le lendemain, la carcasse avait disparu, emportée par les hyènes.

Les observations précises de populations animales sauvages restent rares, pour diverses raisons. Les scientifiques ne sont pas toujours au bon endroit au bon moment.

et quand ils sont sur les lieux, il se peut qu'aucune attitude apparentée au deuil ne soit à noter. Aussi, à ce stade des recherches, toute observation provenant de réserves, de zoos ou même de notre cohabitation avec des animaux de compagnie peut être utile.

Willa et sa sœur Carson, deux chattes siamoises, vivaient chez Karen et Ron Flower en Virginie, aux États-Unis. Elles se faisaient leur toilette mutuelle, dormaient enroulées



2. UNE FEMELLE GORILLE ETEINT son bébé mort dans un zoo de Münster, en Allemagne.

l'une contre l'autre. Lorsque Carson était conduite chez le vétérinaire, Willa restait à la maison, dans un état de légère agitation, jusqu'au retour de sa sœur. En 2011, l'état de santé de Carson empira et ses maîtres l'emmenèrent de nouveau chez le vétérinaire, où elle mourut dans son sommeil. Au début, Willa a agi comme elle le faisait pendant les courtes absences de sa sœur. Mais au bout de deux ou trois jours, elle s'est mise à pousser des miaulements lugubres et à rechercher leurs endroits préférés. Et lorsque cette agitation s'estompée, Willa tomba dans une sorte de léthargie qui dura plusieurs mois.

Un témoignage édifiant provient de la réserve naturelle Farm Sanctuary, à Watkins Glen, dans l'État de New York. En 2006, trois canards – des mulards – sont arrivés à la réserve. Ils souffraient de lipodose hépatique, une maladie du foie provoquée par

leur gavage dans une ferme productrice de foie gras. Deux des trois rescapés, Kohl et Harper, étaient en mauvais état. Kohl avait des pattes difformes et était effrayé par les humains ; Harper ne voyait que d'un œil. Pendant quatre ans, les deux canards ne se sont pas quittés. Lorsque la douleur aux pattes de Kohl s'est intensifiée, l'empêchant de se déplacer, il fut euthanasié. On laissa Harper assister à la procédure, puis approcher la dépouille. Après avoir exercé, avec son bec, quelques pressions sur le corps, Harper se coucha à ses côtés et mit sa tête contre le cou de son compagnon. Il resta ainsi plusieurs heures. À partir de ce jour, il repoussa tout lien avec d'autres canards, restant seul au bord d'une petite mare où il venait souvent avec Kohl. Deux mois plus tard, Harper mourait à son tour.

In continuum de réactions

Alors, peut-on parler de deuil chez l'animal ? En l'état actuel des connaissances, rien ne permet de l'assurer. Une difficulté est la grande variabilité des réactions observées face à la mort. Le contexte social et la personnalité des survivants influent sur leur comportement. De toutes les histoires de chats, chiens, lapins, chevaux et oiseaux que j'ai pu récolter se dessine, pour chaque espèce, tout un éventail de réactions, certains animaux restant indifférents à la mort de leur compagnon, d'autres paraissant désespérés.

Les différences cognitives jouent aussi sans doute un rôle. De même qu'il existe divers degrés d'empathie en fonction des espèces ou au sein d'une même espèce, la mort est peut-être perçue différemment d'un animal à l'autre. Certains animaux saisissent-ils le caractère final de la mort ? Parviennent-ils à conceptualiser ? Les animaux anticipent-ils la mort ? Une chose est sûre : devant la multiplication des récits sur des animaux variés, la question du deuil chez l'animal est pertinente. À commencer par les espèces ayant une longévité importante et dont les membres forment des couples, des familles ou des communautés. Les liens ainsi tissés ont-ils tendance à entraîner une réaction exacerbée à la mort d'un proche ? Seule une comparaison systématique des réactions au sein de chaque système social animal apportera une réponse. ■

Le métissage des espèces humaines

Michael Hamme

L'étude des gènes montre que nos ancêtres se sont métissés avec les espèces humaines archaïques qu'ils ont rencontrées. Cette hybridation a sans doute contribué à l'expansion d'*Homo sapiens*.

Au sein de l'humanité actuelle ou récente, le brassage des populations et de leurs gènes est un phénomène répandu et banal. Aux époques reculées où plusieurs espèces humaines coexistaient, y a-t-il eu métissage entre notre espèce, *Homo sapiens*, et d'autres humains archaïques ? Longtemps ignoré, voire nié, un tel métissage est devenu ces dernières années de plus en plus évident dans nos gènes, comme nous allons le voir. Il pourrait même être à l'origine du succès de notre espèce.

Les préhistoriens discutent des origines de l'homme moderne (*Homo sapiens*) depuis que leur science existe. Leurs idées ont varié, mais depuis les débuts de l'étude du génome humain, au cours des années 1980, une théorie dominante s'est installée. Selon cette vision, les hommes anatomiquement modernes sont d'abord apparus en Afrique, il y a quelque 200 000 ans, puis ont progressivement remplacé les formes humaines archaïques partout sur la planète. Nous ignorons largement quelles espèces humaines archaïques ont existé et quand, mais elles comprennent au moins l'homme de Neandertal (*Homo neanderthalensis*) en Eurasie et le minuscule *Homo floresiensis* en Indonésie. Nous ignorons tout autant comment *H. sapiens* a remplacé les autres espèces humaines, mais il était censé,

L'ESSENTIEL

On pensait qu'*Homo sapiens*, espèce d'origine africaine, avait remplacé tous les humains archaïques en Afrique et en Eurasie.

La génétique a montré qu'en fait, *Homo sapiens* s'est métissé, d'abord en Afrique, puis en Eurasie, avec les formes humaines archaïques qu'il a rencontrées au cours de son expansion mondiale.

Homo sapiens a ainsi profité des gènes des humains archaïques bien adaptés qu'il rencontrait, ce qui a certainement aidé à son succès planétaire.

jusqu'à présent, les avoir supplantées sans se croiser avec elles.

Cette vision est nommée le modèle de remplacement africain (en anglais *African Replacement Model*) ; elle domine en préhistoire depuis un quart de siècle. Cependant, les progrès rapides du séquençage de l'ADN, de la puissance de calcul et leurs retombées dans l'étude tant des fossiles humains que des humains actuels ont révélé que nos contemporains portent de l'ADN néandertalien et d'autres espèces humaines archaïques. S'il en est ainsi, c'est bien parce qu'il y a eu métissage entre nos ancêtres *H. sapiens* et des individus d'autres espèces. Les preuves génétiques récentes de ces mélanges sont donc des découvertes majeures.

De l'Afrique à l'Eurasie

Pour en apprécier pleinement la portée, reportons-nous au débat qui faisait rage au début des années 1980 sur la façon dont *H. sapiens* a conquis la planète. L'étude des fossiles humains avait alors conduit les paléanthropologues à penser qu'une première sortie d'Afrique avait eu lieu peu de temps après l'apparition de l'espèce *Homo erectus*, il y a quelque deux millions d'années. Des membres de

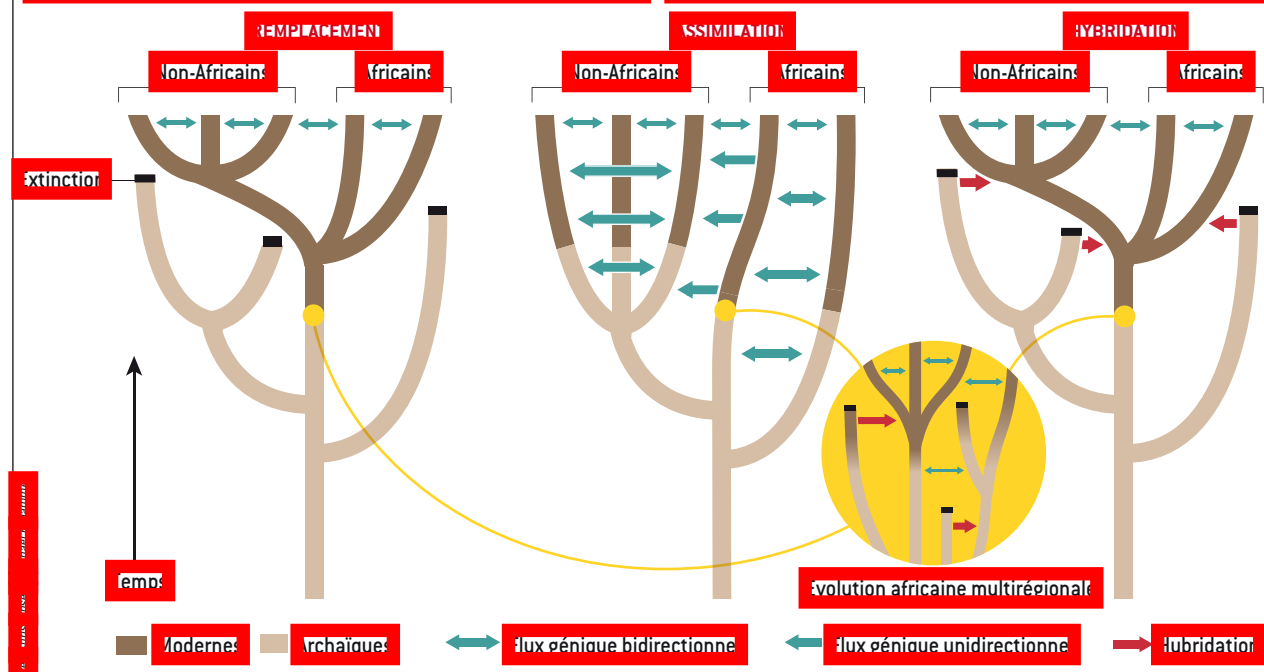


UNE NEANDERTALIENNE RECONSTITUÉE.
Des études génétiques montrent que l'ADN
des non-Africains actuels contient un à quatre
pour cent d'ADN néandertalien.

QUELLES SONT LES SOURCES DE *HOMO SAPIENS* ?

Le débat se poursuit sur la façon dont les hommes anatomiquement modernes (en brun foncé) ont évolué à partir des formes archaïques (en brun clair). Dans toutes les théories de cette évolution présentées ici, l'origine des hommes modernes est en Afrique. Selon la théorie du remplacement (à gauche), ils se sont substitués aux espèces humaines archaïques présentes en Afrique et en Eurasie sans se mélanger avec elles. Selon la théorie de l'assimilation, en revanche (au milieu), les traits modernes issus d'Afrique se sont répandus parmi les groupes archaïques, à la faveur des

migrations et de métissages à l'origine de flux géniques (flèches vertes). Selon la théorie de l'hybridation (à droite), les hommes modernes ne se sont pas rarement croisés avec des espèces archaïques à mesure qu'ils les remplaçaient (flèches rouges). Pour sa part, la théorie de l'évolution africaine multirégionale (bulle jaune) ne concerne que la période de transition archaïque-moderne en Afrique; elle fait appel à des hybridations à l'origine de flux géniques entre différents groupes archaïques distincts. Ce scénario pourrait avoir précédé, en Afrique, chacun des trois autres scénarios.



cette espèce ancienne sont en effet passés alors en Eurasie. Les paléanthropologues divergeaient toutefois sur la façon dont s'est produite l'évolution depuis la forme *H. erectus* jusqu'à la forme moderne. Avec son crâne arrondi et son squelette gracile caractéristiques, *H. sapiens* n'est en effet attesté dans le registre fossile qu'à partir d'il y a 195 000 ans environ.

Deux thèses évolutives s'opposent. Milford Wolpoff, de l'Université du Michigan, et d'autres chercheurs ont proposé l'hypothèse de l'origine multirégionale de l'homme moderne. D'après cette théorie, les populations archaïques se sont progressivement «modernisées» à mesure que l'arrivée d'hommes modernes et le métissage avec eux y multipliaient les traits avantageux modernes !. Selon ce scénario, à l'issue de la transition, tous les humains partagent les mêmes caractéristiques modernes, tandis que certains traits distinctifs hérités des ancêtres archaïques persistent localement, sans doute parce qu'ils sont avantageux pour la survie dans une région.

Fred Smith, de l'Université d'Etat de l'Illinois, a proposé pour sa part une variante de la théorie multirégionale, selon laquelle la contribution des populations venues d'Afrique aux caractéristiques anatomiques modernes est plus grande.

Origine africaine ou multirégionale ?

A ce courant d'idées s'opposent les partisans de l'hypothèse de l'origine africaine de l'homme moderne, que l'on nomme aussi l'hypothèse du remplacement (en anglais *Out of Africa*, entre autres). Pour les partisans de cette théorie, par exemple Christopher Stringer, du Muséum d'histoire naturelle de Londres, les hommes anatomiquement modernes sont apparus en Afrique subsaharienne, puis ont remplacé partout les hommes archaïques sans se métisser.

Günter Bräuer, de l'Université de Hambourg, a proposé une version plus souple de cette théorie, admettant la possibilité de

métissages occasionnels lors des rencontres entre groupes archaïques et modernes, quand les «Africains» abordaient de nouveaux territoires.

Qu'indique l'étude morphologique des rares fossiles humains ? Pas assez, même s'il arrive que l'on décèle un métissage (voir l'encadré page 64 sur un cas italien). Dès lors, si l'on prend comme base de discussion le seul registre fossile, le débat sur les origines de l'homme moderne aboutit à une impasse.

Heureusement, les apports de la génétique changent la donne. Avec l'avènement du séquençage et de l'analyse de l'ADN humain, les chercheurs ont pu mettre au point des méthodes pour reconstituer partiellement le passé en examinant les variations génétiques dans les populations humaines contemporaines. Grâce à ces méthodes, ils ont pu reconstruire les arbres phylogénétiques de certains gènes, dont ils ont déduit et daté le dernier ancêtre commun de toutes les variantes observées – ce qui donne des informations sur la population d'origine de la séquence ancestrale.

Ainsi, dans une étude de 1987 qui a fait date, Allan Wilson, de l'Université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont établi l'arbre phylogénétique de l'ADN mitochondrial. Cet ADN, rappelons-le, se trouve au sein des mitochondries, petits organites à l'origine de l'énergie de la cellule, et n'est transmis que par la mère. Ils en ont déduit que notre ADN mitochondrial remonte à l'«Ève mitochondriale», une ancêtre qui aurait vécu dans une population africaine il y a environ 200 000 ans.

Ce résultat appuie donc la théorie du remplacement des hommes archaïques par *H. sapiens*. Il en va de même de résultats similaires obtenus dans le cas de certaines petites séquences de l'ADN nucléaire (l'ADN des noyaux cellulaires), tel, par exemple, le chromosome Y qui ne peut être hérité que du père, puisqu'il est à l'origine du sexe masculin.

Dix ans plus tard, la théorie du remplacement a de nouveau reçu le renfort de la génétique lorsque l'équipe de Svante Pääbo, de l'Institut Max Planck d'anthropologie évolutionniste de Leipzig, est parvenue à extraire un fragment d'ADN mitochondrial d'ossements néandertaliens. Il est alors apparu que ces séquences d'ADN mitochondrial étaient différentes de celles des hommes modernes et que ces derniers ne se sont pas mélangés avec les Néandertaliens. D'autres travaux ultérieurs, sur de l'ADN mitochondrial d'autres individus néandertaliens, donnèrent des résultats semblables.

Le coup de grâce semblait avoir été donné à la théorie multirégionale, mais il ne s'agissait que d'une première impression. Le raisonnement mené jusqu'à ce stade souffre d'un biais majeur : le génome mitochondrial n'est pas tout le génome ! De fait, le génome mitochondrial contient environ 16 000 bases, tandis que le génome humain dans son ensemble contient quelque 3,2 milliards de paires de nucléotides. En outre, une région du génome issue d'un métissage pourrait ne pas le montrer, dans la mesure où des gènes d'origine étrangère, mais ne conférant aucun avantage pour la survie, tendent à disparaître au fil du temps, par le fruit du hasard.

Savoir si les hommes modernes et les hommes archaïques se sont croisés implique donc de comparer de nombreuses régions de leurs génomes ou, mieux, de comparer leurs génomes entiers. Du reste, avant que les données génétiques sur les espèces humaines archaïques n'apparaissent, les

résultats de certaines études de l'ADN humain moderne contredisaient déjà la théorie du remplacement. Une étude publiée en 2005 et conduite par Daniel Garrigan, alors postdoctorant dans mon laboratoire, en constitue un exemple clair. D. Garrigan a examiné une région non fonctionnelle du chromosome X connue sous le nom de RRM2P4. Or, une fois reconstitué, l'arbre phylogénétique de cette région la faisait remonter à une souche d'Asie du Sud-Est vieille de 1,5 million d'années. En d'autres termes, l'ADN en question proviendrait d'une espèce asiatique archaïque qui se serait croisée avec l'*Homo sapiens* africain.

Des traces de mélanges dans le génome

De façon similaire, notre équipe découvrit cette même année une variation dans la région Xp21.1 du chromosome X, elle aussi non fonctionnelle, correspondant à un arbre phylogénétique comprenant deux branches parallèles ayant évolué séparément durant environ un million d'années. Nous supposons que l'une des branches a été introduite dans les lignées *Homo sapiens* par une espèce africaine archaïque. Les régions RRM2P4 et Xp21.1 du chromosome X suggèrent donc des croisements entre des espèces archaïques d'Asie et d'Afrique et les hommes modernes plutôt qu'un remplacement sans métissage des premiers par les seconds.

Puis, grâce aux progrès du séquençage, les scientifiques ont pu déterminer les génomes nucléaires entiers – y compris ceux d'espèces humaines disparues. En 2010, S. Pääbo annonçait que son équipe avait reconstitué la majeure partie d'un génome néandertalien, sur la base de l'ADN extrait de plusieurs fossiles trouvés en Croatie. Contrairement à ce qu'attendaient les chercheurs, les résultats indiquaient que les Néandertaliens ont apporté une contribution petite, mais significative (un à quatre pour cent de l'ADN des hommes modernes non africains), au génome contemporain. Autrement dit, un à quatre pour cent des nucléotides des hommes anatomiquement modernes semblent avoir été hérités des Néandertaliens. Qu'en conclure, sinon que des mélanges se sont produits entre les Néandertaliens et les ancêtres modernes de tous les non-Africains ? Les chercheurs ont avancé que ces mélanges auraient eu lieu il y a 80 000 à 50 000 ans au Proche-Orient.

L'AUTEUR



Michael HAMMER est généticien des populations. Il travaille à l'Université de l'Arizona.

aux États-Unis

BIBLIOGRAPHIE

F. L. Mendez *et al.*, An African American paternal lineage adds an extremely ancient root to the human Y chromosome phylogenetic tree, *American Journal of Human Genetics*, vol. 92(3), pp. 454-459, 2013.

S. Condemi *et al.*, Possible interbreeding in late Italian Neandertals ? New data from the Mezzena (Monte Lessini, Verona, Italy), *PLoS One*, vol. 8(3), e59781, 2013.

M. Meyer *et al.*, A high-coverage sequence from an archaic Denisovan individual, *Science*, vol. 338, pp. 222-226, 2012.

E. Roudier, Vo'Houna, France, 2013.

à où les deux groupes humains étaient présents à la même époque.

Très peu de temps après l'annonce du séquençage du génome néandertalien, l'équipe de S. Pääbo fit part d'une nouvelle découverte, encore plus étonnante. Les chercheurs ont réussi à séquencer l'ADN mitochondrial contenu dans un fragment de phalange vieux d'environ 40 000 ans trouvé dans la grotte de Denisova, dans les montagnes de l'Altai sibérien. Ce fragment de phalange étant le seul os que l'on ait de cet individu, on ignore son espèce. Or son ADN mitochondrial a révélé qu'il ne s'agissait ni d'un homme moderne ni d'un homme de Neandertal, même si la population dont il faisait partie était légèrement plus proche des Néandertaliens. De plus, il s'avère que des séquences du type de celle de Denisova se retrouvent dans un à six pour cent de l'ADN des Mélanésiens, des

Aborigènes australiens, des Polynésiens et d'autres populations du Pacifique Ouest, mais pas du tout dans l'ADN des Africains ou des Eurasiens.

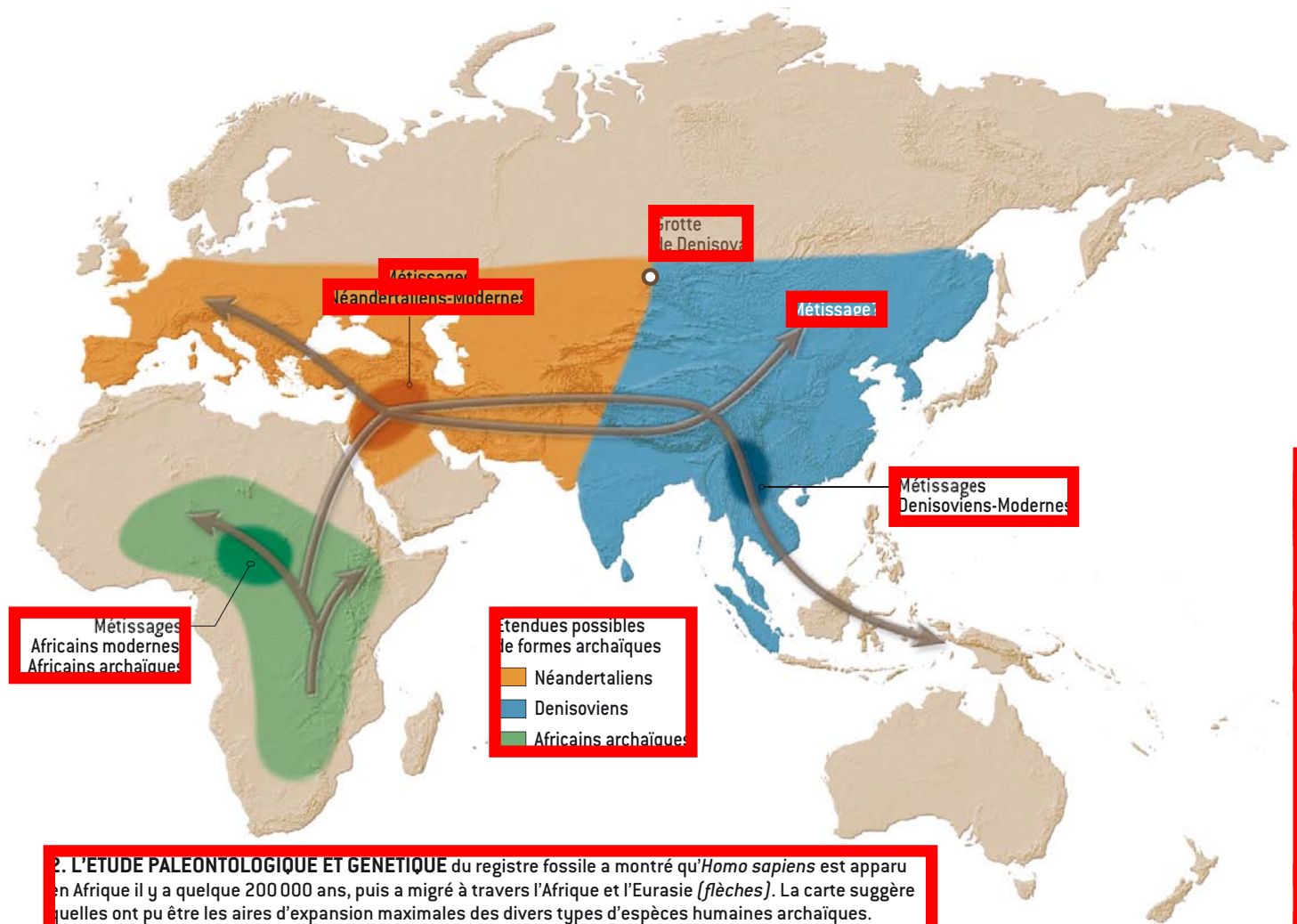
Croisements successifs

Pour expliquer ces observations, les chercheurs ont avancé l'idée de plusieurs mélanges successifs. Tout d'abord, des hommes anatomiquement modernes sortis d'Afrique se sont croisés avec des Néandertaliens, comme on l'a évoqué plus haut. Puis les descendants de ces premiers migrants modernes se seraient déplacés jusqu'en Asie du Sud-Est, où ils se seraient croisés avec des Denisoviens. Des ancêtres doublement croisés de groupes actuels, tels que les Mélanésiens, auraient ensuite atteint l'Océanie il y a environ 45 000 ans, et une seconde vague d'hommes anatomique-

ment modernes aurait migré vers l'Asie orientale sans se croiser avec ces ancêtres de type denisovien.

Même si ce sont les croisements hors d'Afrique qui ont suscité le plus de travaux jusqu'à présent, il est clair que c'est *a priori* en Afrique que les hommes anatomiquement modernes ont eu le plus de chances de se croiser avec des formes archaïques, puisque c'est sur le grand continent que la coexistence entre espèces a duré le plus longtemps. Malheureusement, les conditions régnant dans les forêts équatoriales africaines ne favorisent pas la conservation d'ADN fossile. Sans la référence d'une séquence d'ADN africain ancien, les généticiens doivent pour l'instant se limiter à l'étude des génomes africains contemporains et à y rechercher des indices de mélanges anciens.

C'est dans ce but qu'avec l'équipe de Jeffrey Wall, de l'Université de Californie



2. L'ETUDE PALEONTOLOGIQUE ET GENETIQUE du registre fossile a montré qu'*Homo sapiens* est apparu en Afrique il y a quelque 200 000 ans, puis a migré à travers l'Afrique et l'Eurasie (flèches). La carte suggère quelles ont pu être les aires d'expansion maximales des divers types d'espèces humaines archaïques. Les dernières incluent, à l'Est, le type denisovien identifié par l'ADN extrait d'une phalange retrouvée dans la grotte de Denisova, en Sibérie. La carte indique les régions où des mélanges entre humains modernes et archaïques se sont probablement produits (ellipses), du moins d'après les indices génétiques disponibles.

à San Francisco, mon équipe a séquencé l'ADN de 61 régions du génome au sein de trois populations africaines subsahariennes. En 2011, la simulation informatique des divers scénarios évolutifs possibles nous a menés à la conclusion que ces populations ont reçu une contribution de deux pour cent de l'ADN d'une population humaine éteinte. Ce groupe se serait séparé des ancêtres des hommes anatomiquement modernes il y a quelque 700 000 ans, puis se serait reproduit avec des humains modernes il y a environ 35 000 ans, en Afrique centrale.

Des métissages en Afrique aussi

Un autre indice d'un possible métissage ancien en Afrique est venu de l'étude d'une séquence inhabituelle du chromosome Y (l'un des deux chromosomes du système XY de détermination du sexe), trouvée chez un Afro-Américain originaire de Caroline du Sud, dont l'ADN avait été analysé par une société spécialisée dans les tests ADN commerciaux. Cette séquence particulière n'avait encore jamais été observée. En la comparant à la séquence correspondante sur l'ADN d'autres humains et de chimpanzés, nous avons établi qu'elle représente une branche apparue sur l'arbre phylogénétique du chromosome Y il y a plus de 300 000 ans.

Suite à cette constatation, nous avons lancé des recherches dans une base de données contenant près de 6 000 chromosomes Y africains et identifié 11 correspondances, provenant toutes d'hommes vivant dans une très petite région de l'Ouest du Cameroun. Publiée cette année, cette découverte suggère que le dernier ancêtre commun de toutes les variantes modernes du chromosome Y serait 1,7 fois plus ancien qu'on ne le pensait. La présence même de cette lignée chez une population contemporaine est un signe possible de métissage entre *H. sapiens* et une espèce archaïque inconnue issue de l'Ouest de l'Afrique centrale.

Par ailleurs, bien que les analyses des ADN denisovien et néandertalien fournissent des indices toujours plus nombreux en faveur d'un apport des humains archaïques à notre héritage génétique, de nombreux aspects de ces métissages restent obscurs. L'estimation des pourcentages de contribution des Néandertaliens et des Denisoviens à notre génome est fondée sur une méthode qui fournit peu d'informations sur la manière et le moment où les métissages se sont pro-

Métissage récent?

En 2011, les paléontologues travaillant sur le site d'Iwo Eleru, au Nigeria, ont réexaminé des fossiles humains dont les crânes semblaient intermédiaires entre ceux d'hommes anatomiquement modernes et ceux d'une autre forme, sans doute archaïque. Or ces fossiles datent d'à peine 13 000 ans, soit de bien après l'apparition de *Homo sapiens*.

Les observations effectuées, ainsi que celles réalisées sur le site d'Ishango, en République démocratique du Congo, suggèrent, soit que deux types de population ont coexisté jusqu'à un passé récent en Afrique, soit que les populations présentant les caractéristiques à la fois modernes et archaïques se sont croisées sur le grand continent pendant des milliers d'années.

duits. Pour en savoir plus, les chercheurs doivent en particulier comprendre exactement quelles parties du génome proviennent des espèces humaines archaïques et quelles espèces ont apporté quelles contributions. Au cours de son travail de thèse dans mon laboratoire, Fernando Mendez a entrepris des recherches en ce sens. Il a trouvé des preuves concluantes que certains contemporains non africains portent un segment de chromosome 12 contenant le gène *STAT2* originaire des Néandertaliens (gène impliqué dans la première ligne de défense du corps contre les virus pathogènes).

L'étude détaillée des régions de l'ADN héritées de nos ancêtres archaïques pourrait donc nous renseigner sur les éventuels avantages adaptatifs dus à l'acquisition par *H. sapiens* de ces variantes génétiques. En effet, le gène *STAT2* constitue un exemple fascinant d'une variante apparemment avantageuse qui s'est intégrée au patrimoine génétique de l'homme moderne. Environ dix pour cent des Eurasiens et des Océaniens portent la variante néandertalienne du gène *STAT2*. Il est intéressant de constater que cette variante est dix fois plus fréquente en Mélanésie qu'en Asie orientale. Les analyses suggèrent que ce segment d'ADN a vu sa fréquence d'apparition augmenter *via* une sélection naturelle positive (en d'autres termes, parce qu'il favorise le succès reproductif ou la survie) plutôt que par le fruit du hasard. Cela signifie qu'il a constitué un avantage pour les populations modernes de Mélanésie.

L'ADN archaïque : un avantage pour la survie

De façon analogue, un morceau de type néandertalien de la région dite HLA (*Human Leukocyte Antigen*) du génome semble être présent à une fréquence relativement élevée dans les populations eurasiennes, à la suite d'une sélection naturelle positive liée à son rôle dans la lutte contre les pathogènes. Sans doute ne devrions-nous pas être surpris de trouver des contributions archaïques contenant des gènes qui renforcent l'immunité. Il est facile d'imaginer que l'acquisition d'une variante d'un gène procurant un avantage pour résister aux pathogènes locaux ait avantage les lignées d'hommes anatomiquement modernes qui l'acquerraient.

Au vu de l'accumulation des indices de métissages entre *Homo sapiens* et des espèces humaines archaïques, tant en

In cas de métissage *Homo sapiens-Homo neanderthalensis* en Italie

En 1957, dans l'abri de Riparo Mezzena en Venétie, un fragment de

mandibule est découvert dans une couche pleine d'outils moustériens (donc néandertaliens). Son propriétaire – *a priori* un Néandertalien – avait un menton. Un détail ? Pas pour les paléanthropologues, qui savent bien que l'une des principales caractéristiques distinctives des Néandertaliens anciens dont on a retrouvé les fossiles est l'absence de menton.

Pour en avoir le cœur net, notre équipe franco-italienne a recherché dans le collagène extrait de la mandibule des restes d'ADN mitochondrial, et ADN qui ne se transmet que dans les lignées féminines. Aucun doute n'est permis : la mère de l'individu de Mezzena était néandertalienne, ce que confirme la morphologie générale de la mandibule.

Mais le menton fait exception. Au lieu d'être de profil convexe comme chez les Néandertaliens anciens, la symphyse mentonnière (la pente du menton) de la mandibule de Mezzena est verticale, comme chez *Homo sapiens*. En outre, elle présente une

protubérance osseuse mentonnière, qui est anormal chez les Néandertaliens, mais tout à fait courant chez les hommes anatomiquement modernes (voir ci-dessous). Ce menton de Mezzena aurait pu passer pour une anomalie sans signification particu-

lière en Croatie (33 000 ans), et s'il n'était aussi fortement caractéristique des hommes modernes.

Nous avons donc cherché à prouver que la protubérance mentonnière de l'individu de Mezzena est due à une ascendance moderne. Pour cela,



lière si des protubérances similaires n'avaient été observées sur des fossiles d'autres Néandertaliens tardifs d'Europe, tels ceux de Spy en Belgique (36 000 ans), de La Ferrassie en Dordogne (50 000 ans), de Las Palomas en Espagne (42 000 ans) et de Vin-

hoblen en Allemagne. Nous nous sommes livrés à une analyse discriminante, c'est-à-dire à la comparaison statistique de la conformation en 3D de la mandibule de Mezzena avec celle des mandibules de groupes représentatifs de Néandertaliens et d'hommes modernes. Il en

ressort que, d'un point de vue statistique, la symphyse de Mezzena est moderne, c'est-à-dire de type *H. sapiens*, alors que son propriétaire porte un ADN mitochondrial néandertalien.

Qu'en conclure, étant donné que l'ADN mitochondrial n'est transmis que par la mère ? Deux interprétations sont possibles : soit l'individu de Mezzena est issu d'une lignée néandertalienne au menton, soit le père ou un ascendant masculin de l'individu de Mezzena était un *H. sapiens*. La première interprétation paraît quelque peu spéculative, dans la mesure où aucune lignée néandertalienne au menton n'a jamais été repérée en Europe de l'Ouest. La seconde interprétation paraît donc la plus plausible. Elle l'est d'autant plus que l'occupation néandertalienne de l'abri de Mezzena était contemporaine de l'occupation par des hommes modernes de la grotte de Fumane, située à seulement 20 kilomètres. Du reste, l'événement de métissage de Mezzena est déjà en bande dessinée (voir la bibliographie) !

Silvana Condemi
ADES/CNRS, Univ. d'Aix-Marseille

Illustration : J. L. L.

Afrique qu'ailleurs, la théorie du remplacement n'est plus tenable. Nous nous sommes toujours mélangés ! Ainsi, même si les formes humaines archaïques se sont éteintes, elles ont laissé leurs empreintes dans le génome humain actuel. Pour autant, les génomes des populations actuelles semblent dériver pour l'essentiel d'ancêtres africains, et les contributions des Eurasiens archaïques au génome eurasien moderne semblent plus modestes que ne l'impliquent la théorie d'une évolution multirégionale et celle d'une assimilation.

Hybridations

par événements isolés

Nombre de chercheurs se prononcent donc désormais en faveur de la théorie de l'hybridation de G. Bräuer, suivant laquelle le métissage entre *Homo sapiens* et les espèces archaïques s'est limité à un certain nombre d'événements isolés. Que ces métissages aient été rares après la sortie d'Afrique des hommes modernes me paraît clair, mais je suis persuadé qu'il faut encore affiner notre vision du passé. Les témoignages

qu'en donnent les fossiles africains sont complexes : ils suggèrent qu'entre 200 000 et 35 000 ans environ, divers groupes humains transitoires présentant des caractéristiques à la fois archaïques et modernes ont vécu dans un espace s'étendant du Maroc à l'Afrique du Sud. Pour ma part, je suis en faveur d'une théorie prenant en compte un métissage des espèces pendant la transition des formes archaïques à la forme moderne. Ce scénario tient compte de la possibilité que certains traits qui nous rendent anatomiquement modernes soient hérités de formes transitoires (entre formes humaines archaïques et modernes) aujourd'hui disparues. Selon moi, c'est une combinaison d'une théorie multirégionale en Afrique et de la théorie de l'hybridation de Bräuer qui explique le mieux les données génétiques et fossiles actuellement disponibles.

Toutefois, avant de pouvoir tester cette théorie... hybride, nous devons mieux comprendre quels gènes codent les traits anatomiquement modernes et établir leur histoire évolutive. Pousser l'analyse des génomes tant archaïques que modernes devrait nous aider à déterminer à quelles

époques et à quels endroits les métissages se sont produits, et si les gènes archaïques ont procuré un avantage aux populations qui les ont acquis. Ces informations nous aideront à évaluer si les métissages d'*Homo sapiens* avec des humains archaïques bien adaptés localement ont fourni à *Homo sapiens* les traits qui lui ont permis, *in fine*, de dominer le monde entier.

Le partage de gènes *via* des métissages occasionnels entre espèces est l'un des mécanismes par lesquels des évolutions se sont produites au sein de nombreuses espèces végétales et animales. Pourquoi en serait-il autrement pour les espèces humaines ?

Il reste beaucoup de questions à élucider sur l'origine de nos gènes, mais une chose est déjà claire : les hommes modernes ne descendent pas d'une seule population ancestrale africaine, mais de plusieurs populations de l'Ancien monde (l'Afrique et l'Eurasie). On considérerait jusqu'à récemment les hommes archaïques comme des concurrents surclassés par les hommes modernes. Et s'ils étaient en fait le secret de la réussite de ces derniers ?

■ POUR LA

POUR LA

1 an ■ 12 numéros

56 € seulement
au lieu
de ~~74.90€~~



■ POUR LA
SCIENCE

• Pour la Science • Service Abonnements • Ihre rennse 411 387 • 75 781 Paris cedex 13

1 an • 12 numéros • 56 € au lieu de ~~74.90 €~~

tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12 € – autres pays 25 €

2 ans • 24 numéros • 106 € au lieu de ~~149,80 €~~

tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 25€ – autres pays 51€

Je préfère m'abonner à *Pour la Science* (12 n^{os}/an) + *Dossier Pour la Science* (4 n^{os}/an)

1 an • 16 numéros • 76 € au lieu de ~~102,70 €~~

tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16 € – autres pays 35 €

2 ans • 32 numéros • 143€ au lieu de ~~205,40€~~

tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34€ – autres pays 72€

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP: [] [] [] Ville []
Paus : [] [] tél.: [] []

Tél.: _____
Pour le suivi client (facultatif)

Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Par carte bancaire[illegible]

Date d'expiration

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscules)

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 ☐



PIQUURES D'INSECTES : comment s'en protéger ?

Vincent ROBERT

Moustiquaires, lotions répulsives, appareils à ultrasons, etc. : le marché regorge de produits censés éviter à leur utilisateur des piqûres, toujours désagréables et parfois dangereuses. Une récente étude globale aide à faire le tri et à pointer certaines tromperies.

Ne sous-estimons pas le pouvoir des petites bêtes : un seul moustique piqueur est capable, en bourdonnant à proximité de nos oreilles et par ses remarquables réflexes de fuite et de dissimulation, de nous faire passer une nuit blanche... et, malgré notre vigilance, de nous créer plusieurs jours de démangeaisons. Il faut dire que les insectes hématophages, c'est-à-dire qui se nourrissent de sang, existaient déjà il y a 170 millions d'années, quand la lignée des mammifères était uniquement composée d'espèces de la taille des petits rongeurs actuels. Ces insectes sont donc nettement plus anciens que les mammifères et les oiseaux actuels et, bien entendu, que l'espèce humaine. Quand nous sommes réveillés par un moustique en quête d'un repas de sang, souvenons-nous qu'il a un avantage ancestral de plusieurs millions d'années d'expérience !

Pour autant, chacun d'entre nous fait de son mieux pour se soustraire aux piqûres de moustiques et, plus généralement, aux piqûres d'arthropodes hématophages – essentiellement des insectes et les tiques. L'enjeu est de taille. Il s'agit bien sûr d'échapper à de désagréables boutons et démangeaisons. Mais il s'agit surtout

L'ESSENTIEL

De nombreuses espèces

d'insectes et autres arthropodes piquent l'homme pour se nourrir de son sang.

Ces piqûres transmettent

parfois des maladies graves : le paludisme, la dengue, la maladie ou borréliose de Lyme, etc.

À l'échelle de l'individu,

divers moyens d'éviter les piqûres ou d'en diminuer le nombre sont disponibles sur le marché.

Plusieurs de ces moyens

de prévention n'ont aucune efficacité reconnue, tandis que d'autres ont fait leurs preuves.

de préserver sa santé. En effet, les arthropodes hématophages véhiculent souvent des agents de maladies, dont certaines sont graves ou ont de lourdes conséquences en termes de santé publique – par exemple le paludisme, les leishmanioses, la maladie de Lyme (borréliose de Lyme) ou la maladie de Chagas.

Se protéger des piqûres d'arthropodes est ainsi le souci d'un grand nombre de personnes, incluant les voyageurs et les résidents dans des régions à risque. Il est arrivé à chacun de nous d'investir du temps, de l'énergie et de l'argent pour éviter de telles piqûres. Les magasins, spécialisés ou non, proposent une multitude de produits censés apporter une protection individuelle contre des arthropodes piqueurs : moustiquaires, lotions répulsives, serpentins fumigènes, appareils à ultrasons, etc. Et les conseils plus ou moins avisés sur l'efficacité de tel ou tel procédé, sur l'attitude à adopter face aux insectes nuisants, ne manquent pas. Comment s'y retrouver dans cet ensemble pléthorique d'offres commerciales et de recommandations parfois contradictoires ?

La première réponse systématique à cette question a été apportée en 2012 par

la publication d'une expertise collective. Cette étude de synthèse a été coordonnée par Gérard Duvallet, entomologiste et parasitologue professeur émérite à l'Université de Montpellier, et Ludovic de Gentile, médecin et biologiste au Centre hospitalier universitaire d'Angers.

L'expertise a impliqué la participation de plus d'une dizaine d'instituts et de sociétés savantes français. La méthodologie suivie a été élaborée par la Haute Autorité de la santé. Trente et une « recommandations de bonne pratique » ont été proposées, validées et publiées au terme d'un processus qui a duré deux ans.

Par son ampleur et sa rigueur, l'étude publiée constitue une première mondiale. Elle fait le point des connaissances sur les différents moyens de protection disponibles à l'échelle de l'individu, sur les risques de leur utilisation, ainsi que sur les cas particuliers posés par les nouveau-nés, les jeunes enfants et les femmes enceintes ou allaitantes. Je présenterai ici quelques-unes de ses principales conclusions. Mais il est utile, auparavant, de souligner la

distinction entre arthropodes nuisants et arthropodes vecteurs de maladies.

Bien que fondamentale, la distinction entre arthropodes nuisants et arthropodes vecteurs (ou hôtes d'agents infectieux) n'est pas toujours évidente. La notion de « nuisants » découle du désagrément, voire de la gêne intense occasionnée par la présence d'un arthropode, elle-même étant souvent fonction de leur densité.

Nuisants ou vecteurs de maladies ?

Alors qu'une mouche domestique en vol circulaire au centre d'une pièce est un non-événement, des hordes de mouches attirées par les yeux ou les narines peuvent, à l'inverse, constituer une nuisance presque insupportable. De même, une piqûre isolée d'un moustique est difficilement comparable à une nuée de moustiques agressifs comme on peut en voir dans les régions nordiques au début de l'été ou dans certaines îles tropicales à la saison des pluies.

La notion de nuisance va au-delà de l'inconfort, en particulier lors d'infestations importantes ou récurrentes. Il peut y avoir un réel impact sur la santé. En cas de forte agressivité d'arthropodes hématophages, le cumul de milliers de piqûres quotidiennes peut entraîner une anémie, du moins chez les animaux domestiques attachés ou confinés. Un autre aspect de l'hématophagie est l'injection de salive par l'arthropode au moment du repas sanguin ; cette salive peut déclencher des réactions inflammatoires et immunitaires allant de simples démangeaisons à de graves allergies. De nombreux arthropodes, hématophages ou non, peuvent se révéler allergisants, mais rarement jusqu'à créer un problème de santé publique. Une exception notable concerne les acariens dans les poussières domestiques, à l'origine de fréquentes allergies respiratoires.

1. UN PHLEBOTOME en train de prendre un repas de sang. Les phlébotomes, minuscules diptères mesurant deux millimètres environ, véhiculent la leishmaniose, maladie dont certaines formes sont mortelles.



Famille ou sous-famille		Stades vecteur	Principaux agents pathogènes	Maladies associées
Culicidae (moustiques)		adultes femelles	Virus amaril ; virus de la dengue ; Plasmodium : filaires	fièvre jaune ; dengue ; paludisme ; filariose de Bancroft
Simuliidae (simulies)		adultes femelles	filaires	Inchocercose
Phlebotominae (phlébotomes)		adultes femelles	Leishmanie	Leishmaniose
Tabanidae (taons, Chrysops)		adultes femelles	filaires ; trépanosomes	Loase ; trépanosomoses animales
Ceratopogonidae (dont Culicoides)		adultes femelles	Virus bluetongue	fièvre catarrhale ovine
Glossinidae (mouches tsé-tsé)		adultes mâles et femelles	trépanosomes	Maladie du sommeil
Puces (nombreuses familles)		adultes mâles et femelles	Bactéries Yersinia, Rickettsia	Peste ; typhus murin
Punaises Reduviidae (réduves, triatomes)		adultes mâles et femelles, et immatures	trépanosome	Maladie de Chagas
Pediculicidae (poux)		adultes mâles et femelles, et immatures	Rickettsies	Typhus exanthématique
Ixodidae (tiques dures)		adultes mâles et femelles, et immatures	Virus Flaviviridae et Bunyaviridae ; bactérie Borrelia	Encéphalite européenne à tiques ; fièvre hémorragique de Crimée-Congo ; borréliose de Lyme
Argasidae (tiques molles)		adultes mâles et femelles, et immatures	Borrelia	fièvre récurrente à tique

2. LES PRINCIPAUX ARTHROPODES NUISANTS OU VECTEURS de maladies pour l'homme. Dans ce tableau, tous les arthropodes sont des insectes, à l'exception des tiques (deux dernières lignes), qui sont des

acariens. Et parmi les insectes de cette liste, la plupart sont des diptères (six premières lignes), ordre d'insectes dont les membres ont deux ailes au lieu de quatre et qui inclut les mouches et les moustiques.

Le syndrome d'Ekbohm

Certains patients attribuent de façon obsessionnelle des insectes invisibles les troubles de la peau persistants. Ce syndrome d'Ekbohm, du nom du neurologue suédois qui l'a décrit en 1938, apparaît à l'âge adulte, principalement chez la femme âgée. Le sujet ressent avec une acuité extrême des démangeaisons ou des fourmillements superficiels, qu'il attribue à de petits animaux piqueurs ou présents dans le derme. Malgré un déploiement d'intenses efforts pour apporter des éléments de preuve qui, dans le meilleur des cas, se révèlent être des morceaux d'insectes inoffensifs et répandus dans les maisons (mouches, poissosons d'argent, pousiers, etc.).

Dans certains cas extrêmes, l'arthropode nuisant est lui-même un pathogène. Il en est ainsi du sarcopte, acarien responsable d'une gale cutanée, ou de l'asticot de certaines mouches qui se développe aux dépens des tissus de l'hôte. Mais il ne faut pas oublier que la majorité des arthropodes sont inoffensifs pour l'homme (voir l'encadré page 69 en haut).

Parmi les nuisants, on inclut parfois les arthropodes venimeux, qui ne sont pas hématophages et qui piquent occasionnellement l'homme, le plus souvent par réaction de défense. Ils relèvent de cinq groupes principaux qui utilisent divers systèmes inoculateurs de venin.

Ceux du premier groupe, comme les araignées et les scolopendres, injectent du venin par deux crochets situés au voisinage de la cavité buccale. Le deuxième comprend les scorpions, dont le dernier segment abdominal est muni d'un dard. Le troisième groupe est celui des hyménoptères tels que bourdons, abeilles, guêpes et frelons, dont les femelles adultes piquent avec un dard rétractile situé à l'extrémité de l'abdomen. Le quatrième groupe inclut de nombreux arthropodes

qui utilisent leurs pièces buccales et leur salive pour se défendre lorsqu'on les saisit, et infligent de douloureuses piqûres ; c'est le cas d'hétéroptères, comme les punaises prédatrices ou suceuses de sève. Enfin, le dernier groupe d'arthropodes venimeux est constitué de chenilles urticantes de papillons, dont certaines soies sont différenciées en micro-harpons contenant un venin allergène ; c'est le cas de la chenille processionnaire du pin, dont l'aire de répartition est aujourd'hui en forte expansion.

Des agents infectieux dangereux

La nuisance ou la pathogénie résultent de l'arthropode lui-même ou de sa piqûre. En revanche, la notion de vecteur implique l'existence d'un acteur supplémentaire : un agent infectieux (un virus, une bactérie ou un parasite, lequel peut être un organisme unicellulaire ou un organisme plus complexe, tel un ver) que le vecteur peut transmettre. L'agent infectieux constitue un problème grave, bien que sa taille soit souvent microscopique.

Le terme de vecteur revêt deux significations en biologie. L'acception la plus large inclut tout organisme qui intervient dans la transmission d'un agent infectieux. Cette définition accepte les poucerons comme vecteurs de virus de plantes, les sangsues comme vecteurs de parasites de poissons, grenouilles ou tortues, et des chauves-souris vampires comme vecteurs de virus de la rage en Amérique. Selon une seconde acception, la visée opérationnelle pour la lutte contre les insectes transmettant des maladies aux humains, on désigne par arthropode vecteur « tout arthropode hématophage qui assure la transmission biologique active d'un agent pathogène d'un vertébré à un autre vertébré ». En pratique, cela regroupe des insectes et les tiques.

L'hématophagie a un rôle central

Parfois, le statut de vecteur représente un stade chronologiquement postérieur à celui de nuisant. Ainsi, *Aedes albopictus* était un moustique nuisant dans l'île de La Réunion et, lorsque le virus du chikungunya y a été introduit, ce moustique en a assuré la transmission vectorielle, sans rien perdre de son pouvoir de nuisance. Cet exemple illustre qu'un nuisant, en présence d'un agent infectieux, peut devenir vecteur, au moins le temps d'une épidémie.

Dans un petit nombre de cas, la fonction de vecteur peut s'exercer sans aucune nuisance. Ainsi, en Afrique de l'Ouest, la fièvre récurrente à tiques est transmise la nuit, à une personne endormie, par une tique molle dont la piqûre, brève et pratiquement indolore, passe inaperçue. Il y a donc là transmission vectorielle d'un agent infectieux sans nuisance par la piqûre.

L'hématophagie est une notion centrale des infections vectorielles. Ce mode d'alimentation implique que les vecteurs transmettent exclusivement des « parasites » dermiques, hémolymphatiques ou sanguins, la peau et la circulation sanguine ou lymphatique étant les seuls compartiments auxquels ils ont accès. Ainsi, les parasites intestinaux ne sont jamais transmis par voie vectorielle.

La prise du repas sanguin suppose l'identification par l'hématophage de l'hôte à piquer, identification qui fait intervenir de nombreux mécanismes perceptifs (voir l'encadré page 70). Et l'ingestion de

Ils ne piquent pas !

La plupart des insectes (plus d'un million d'espèces) sont inoffensifs pour l'homme et rendent de précieux services écologiques. Certains, tels les syrphes (mouches butineuses), les tipules (ou cousins) ou les chironomes (diptères à antennes plumeuses) ressemblent à des insectes piqueurs, mais n'en sont pas.



sang, liquide riche en eau et en nutriments, impose nombre de contraintes, dont la coagulation. Et, de fait, toutes les salives d'hématophages sont anticoagulantes. Ensuite, des pompes aspirantes fonctionnent pour ingérer le bol alimentaire, et des sortes de valves empêchent le reflux du liquide ingéré. Aussitôt, le bol alimentaire est concentré, ce qui permet d'augmenter le volume ingéré.

La transmission par un animal vecteur est souvent obligatoire pour les agents infectieux. C'est le cas pour les *Plasmodium*, agents unicellulaires du paludisme, qui sont uniquement transmis par la piqûre d'un moustique anophèle femelle (mise à part leur transmission non naturelle lors de transfusions de sang contaminé). Il en va de même pour les trypanosomes, agents de la maladie du sommeil, transmis en Afrique par la piqûre des mouches tsé-tsé ou glossines).

Parfois, la transmission vectorielle n'est pas le seul mode de transmission possible. Il en est ainsi de l'encéphalite européenne à tiques, pour laquelle coexistent deux modalités de passage du virus à l'homme : une transmission vectorielle par piqûre de la tique et une transmission orale par ingestion de lait non pasteurisé. Cette grave maladie due à un arbovirus sévit principalement en Europe de l'Est, jusqu'à l'Est de

	MOUSTIQUES VECTEURS	MALADIES TRANSMISES	LES MOYENS DE PROTECTION	
			MOUSTIQUES VECTEURS	MALADIES TRANSMISES
	Anopheles et Culex piquent du coucher (au lever du soleil)	Paludisme, encéphalite méditerranéenne, dengue...	Les moustiques piquent tout le jour	Chikungunya, fièvre jaune...
MOYENS DE PROTECTION	Moustiquaire imprégnée d'insecticide	+++	+	+
	Pulvérisation dans le domicile d'insecticides rémanents	++	+	+
	Diffuseur électrique d'insecticide l'intérieur	+	+	+
	Moustiquaires de fenêtres et de porte	+	+	+
	Climatisation	+	+	+
	Ventilation	+	+	+
	Répulsifs cutanés	++	++	++
	Vêtements imprégnés d'insecticide	+	+	+
	Serpentins fumigènes l'extérieur	+	+	+

3. EFFICACITÉ RELATIVE DES MOYENS DE PREVENTION disponibles contre les piqûres de moustiques. Certaines mesures d'appoint, tels les appareils à ultrasons ou les comprimés de vitamine B₁, dont l'inefficacité a été prouvée, ne figurent pas ici.

Comment les moustiques détectent leurs victimes

Les moustiques choisissent leurs hôtes à piquer en fonction de la chaleur, du gaz carbonique et des odeurs qu'ils émettent. Savoir ce qui les attire ou les éloigne est essentiel pour les inciter à s'approcher (pour les piéger) ou pour les repousser (et éviter ainsi des piqûres). Des recherches actives sont en cours sur l'olfaction des insectes. Plusieurs familles de récepteurs olfactifs localisés sur les antennes du moustique ont été identifiées. Ces récepteurs sont reliés à des nerfs sensoriels qui réagissent quand une molécule attractive s'y fixe. Il existe des dizaines de molécules attractives, notamment des odeurs caractéristiques des humains comme l'ammoniac, l'acide lactique ou l'amiobutane. Selon les espèces de moustiques, ce sont les composés volatils émis dans la respiration qui sont attractifs (CO_2 notamment), ou dans la sueur avec une forte participation de la microflore cutanée. En fonction du cocktail olfactif et des espèces de piqueurs présentes, certains individus ou types d'individus (femmes enceintes, personnes ayant bu de l'alcool...) sont davantage piqués que d'autres (voir « Y a-t-il des niveaux à moustiques ? », *Pour la Science*, juillet 2012).

En France. Le vecteur est une tique du genre *Ixodes*. Le réservoir de virus est constitué de nombreux animaux (rongeurs et oiseaux, notamment). Le bétail est aussi susceptible d'héberger le virus, qui survit longtemps dans le lait des animaux, d'où la possibilité d'une transmission par voie orale.

La distinction entre nuisants et vecteurs est, comme on l'a vu, parfois malaisée. Mais ce n'est pas qu'une question de biologie théorique : elle a, au moins en France, des implications réglementaires pour les insectes vecteurs de pathogènes pour l'homme. Le texte législatif de référence mentionne en effet que là où « l'existence de conditions entraînant un risque de développement de maladies humaines transmises par l'intermédiaire d'insectes et constituant une menace pour la santé de la population [...], la définition des mesures de lutte nécessaires relève de la compétence de l'État ». À l'égard des arthropodes nuisants qui ne sont pas vecteurs, la définition de la responsabilité des actions de contrôle relève d'autres réglementations désignant, selon les cas, d'autres acteurs (Conseils généraux, communes, particuliers...).

Prévention collective ou personnelle

En pratique, le contrôle des arthropodes nuisants ou vecteurs fait l'objet de deux approches complémentaires.

La première est la « lutte antivectorielle », qui désigne comme cible le vecteur et comme bénéficiaire la collectivité. Elle vise à réduire localement la densité d'arthropodes vecteurs, en mettant en jeu de grands moyens dans des actions dirigées contre les populations de vecteurs ou les milieux où ils se développent (par exemple,

L'AUTEUR



Vincent ROBERT est directeur de recherche à l'IRD (Institut de recherche pour le

développement), et travaille au Laboratoire MIGEVIC (unité mixte IRD-CNRS-Université Montpellier 1 et 2) du Centre IRD France-Sud, à Montpellier.



4. QUELQUES MOYENS D'APPONT vendus dans le commerce : appareil à ultrasons, essence de citronnelle, bracelet anti-moustique, comprimés de vitamine B_1 . L'efficacité de ces dispositifs est soit faible (huiles essentielles, bracelets), soit nulle (appareils à ultrasons, vitamine B_1).

la lutte contre les simuliés en Afrique de l'Ouest pour enrayer la transmission de l'onchocercose, la lutte contre les moustiques à Mayotte qui transmettent le paludisme et des arboviroses, le contrôle des populations de moustiques sur le littoral méditerranéen ou atlantique pour réduire les piqûres, etc.).

La seconde approche est la protection personnelle antivectorielle (PPAV), qui vise plus modestement à protéger la maison, la famille ou l'individu en recourant à des dispositifs ou produits plus simples que ceux mis en œuvre dans la lutte antivectorielle. Abordons cette question de la prévention au quotidien.

Allier efficacité

simplicité, bas coût et absence d'effets négatifs

Idealement, la protection personnelle antivectorielle doit à la fois être efficace, présenter le moins possible d'effets indésirables, être bon marché et suffisamment simple pour être suivie sur une longue période. Le domicile constitue un cadre privilégié pour envisager une désinsectisation. Encore faut-il respecter quelques principes de base, rappelés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), et qui relèvent du bon sens.

Tout d'abord, une utilisation d'insecticide « à l'aveugle » contre un insecte inconnu est presque toujours inefficace. Il faut la cibler sur un ou des insectes bien identifiés et localisés. Ensuite, toute lutte est d'abord mécanique, c'est-à-dire effectuée sans produit insecticide. Hygiène et propreté en constituent le socle : usage de l'aspirateur, lavage du linge à des températures supérieures à 40°C , entretien des papiers peints, moquettes et tapis, bouchage des fentes dans les murs, pose de grillage moustiquaire aux portes et fenêtres, etc. L'usage d'insecticide chimique, lui-même optionnel, doit toujours être accompagné ou précédé par une lutte mécanique. Enfin, tuer les insectes adultes sans éliminer les larves et les œufs est généralement inefficace à court ou moyen terme.

Du côté des produits chimiques, l'utilisation de répulsifs cutanés (lotions ou crèmes appliquées sur la peau) est l'un des principaux moyens de protection individuelle. Sur le plan réglementaire, ils relèvent des produits biocides. On a longtemps pensé

que l'effet de ces lotions sur les insectes était strictement répulsif; il apparaît maintenant qu'ils sont également insecticides, puisqu'ils tuent l'insecte lorsqu'ils sont en contact avec lui. Les molécules actives ayant fait l'objet de l'évaluation prescrite au niveau européen (et également retenues aux États-Unis et au Canada) sont au nombre de quatre: le DEET, l'IR3535, le PMD (connu sous le nom de marque Citriodiol) et la picaridine (autres noms: icaridine, KBR 3023).

Les nombreux produits répulsifs commercialisés procurent des durées de protection très variables contre les piqûres, selon la substance active, sa concentration et sa formulation. Les durées maximales de protection sont d'une dizaine d'heures, mais certains facteurs les diminuent, par exemple la forte sudation, inévitable en zone chaude et humide.

Des précautions s'imposent pour l'usage des répulsifs sur les femmes enceintes, les nouveau-nés et les jeunes enfants. Ainsi, selon le Haut conseil de la santé publique, le seul répulsif utilisable chez la femme enceinte est l'IR3535, mais d'autres sources, comme l'OMS, sont plus tolérantes et admettent le DEET et la picaridine. Des recommandations de concentration minimale (pour assurer l'efficacité) et maximale (pour assurer l'innocuité) ont été émises, en particulier dans les zones impaludées, pour prévenir les piqûres d'anophèles vecteurs et dans les contextes d'épidémie d'arbovirus transmises par moustiques. Ces concentrations recom-

mandées sont légèrement plus faibles pour la femme enceinte ou les jeunes enfants; en contrepartie, la durée de protection est diminuée et il faut associer d'autres moyens personnels de prévention.

Parallèlement à ces répulsifs chimiques, l'offre en matière de substances « naturelles » reste soutenue, en particulier des substances à base d'huiles essentielles. Mais la durée de protection conférée par ces produits est en général inférieure à 20 minutes, c'est-à-dire très insuffisante. De plus, les risques d'allergie et de photosensibilisation sont avérés. L'expertise collective récemment réalisée déconseille

LE NOMBREUX PRODUITS RÉPULSIFS COMMERCIALISÉS PROCURENT DES DURÉES DE PROTECTION TRÈS VARIABLES SELON LA SUBSTANCE ACTIVE, SA CONCENTRATION ET SA FORMULATION

explicitement l'utilisation d'huiles essentielles comme répulsifs cutanés.

Un autre moyen important de protection personnelle est la moustiquaire imprégnée d'insecticide. Ces dernières années, de grands progrès ont été réalisés et ont augmenté la durée de protection conférée par de telles moustiquaires, avec une imprégnation effectuée dès le stade de la fabrication. Les procédés industriels réalisent l'incorporation de l'insecticide soit par fusion dans la fibre, soit en mélange dans une résine déposée autour de la fibre. On dispose maintenant de moustiquaires imprégnées qui restent efficaces pendant

plusieurs années, même après plusieurs lavages, sans nécessiter de réimprégnation manuelle d'insecticide.

Dans des conditions normales d'utilisation, une moustiquaire apporte une protection à la fois physique et chimique. Les insecticides utilisés sont toujours des pyréthrinoides (perméthrine ou deltaméthrine, le plus souvent), qui présentent pour l'insecte un effet létal quasi immédiat et, pour les mammifères, une faible toxicité. Sur ce point, des inquiétudes sont tout jour avec l'apparition de plus en plus fréquente de résistances des anophèles aux pyréthrinoides, notamment en Afrique.

Ce phénomène de résistance a été favorisé par l'utilisation agricole de ces insecticides, afin de protéger les récoltes.

En zone tropicale, les moustiquaires de lit et de berceau sont irremplaçables pour protéger les dormeurs ainsi que les jeunes enfants ne marchant pas encore contre nombre de maladies à transmission nocturne telles que le paludisme, des arboviroses, la maladie de Chagas, les leishmanioses et contre les piqûres de puces et de punaises de lit. L'OMS est particulièrement vigilante pour accorder son homologation à certaines moustiquaires du commerce, gage de qualité pour l'usager (concentration adéquate d'insecticide, répartition homogène, biodisponibilité pendant au moins 20 lavages, résistance au déchirement, etc.).

L'efficacité du port de vêtements amples et couvrants pour faire écran aux

Principe actif	Durée d'action	Inconvénients	Avantages	Utilité
DEET < 10%	~3 heures	Huileux, odeur importante, altère les yeux, efficacité discutable contre les tiques, les réduites et les anophèles.	Long marché, bon recul sur l'utilisation, large spectre de protection, toxicologie bien connue.	Moustiques <i>Aedes</i> , <i>Culex</i> , <i>Anopheles</i> , <i>Mansonia</i> ; phlébotomes; simuliens; acariens trombiculidés; tiques dures et molles; punaises <i>Cimex</i> ; puces.
DEET 20-33%	~12 heures			
Picaridine 2%	~4 heures	Cher, peu de recul sur l'utilisation, non actif sur certains moustiques, tiques et culicoides.	Large spectre, n'altère pas les plastiques, faible odeur, non huileux, concentration élevée.	Tiques; gale; acariens piqueurs; moustiques; culicoides; stomoxes.
Picaridine 15%	~8 heures		Le plus sûr pour le tourisme.	
IR3535		Efficacité insuffisante à faible concentration (moins de 20%), irrites les yeux et la peau.	Large marge de sécurité, utilisation depuis plusieurs années, faible odeur, non huileux, n'altère pas les plastiques, large spectre.	Tiques; gale; acariens piqueurs; moustiques; culicoides; taons.
PMD 10%	~2 heures	Peu d'études d'évaluation, mauvais odeur forte, irrites les yeux.	Actif contre les anophèles et les tiques, d'origine naturelle de plante.	Moustiques; stomoxes; tiques; culicoides; mouches piqueuses.

5. QUATRE REPULSIFS CUTANÉS ONT UNE EFFICACITÉ INTERNATIONALEMENT RECONNUE. Il s'agit du DEET [N,N-diéthyl-3-méthylbenzamide], de la picaridine [carboxylate de sec-butyl-2-(2-hydroxyéthyl)]

[L-pipéridine, ou KBR 3023, ou encore icaridine], de l'IR3535® [N-acétyl-N-butyl-β-alaninate d'éthyle] et du PMD [mélange de cis- et trans-menthane-3,8-diol, ou Citriodiol®].

Quelles sont les préférences des moustiques ?

Une multitude d'idées reçues circulent à propos des moustiques. On n'a pas entendu, assénées de façon péremptoire, les affirmations selon lesquelles la lumière attire les moustiques, les femmes sont plus piquées que les hommes, la couleur bleue repousse les moustiques, ils piquent surtout à l'aube ou au crépuscule, etc. ?

Une réponse simple pour confirmer ou réfuter ces affirmations est en fait impossible, pour la simple raison que leur véracité dépend d'une myriade de paramètres environnementaux. Les moustiques représentent une famille d'insectes de plus de 3 500 espèces dont les préférences alimentaires et les comportements sont divers, résultant à la fois de caractéristiques génétiques propres à la population considérée et de la densité des hôtes à piquer, de leur accessibilité, des caractéristiques de l'environnement, etc.

La plupart des espèces de moustiques sont opportunistes quant à l'hôte à piquer, alors qu'une minorité exprime une nette préférence pour une espèce ou un petit groupe d'espèces (les passereaux, les primates, l'homme, les bovidés, les grenouilles, etc.).

Dans des expériences de choix individuel, laissant la possibilité à un moustique en quête d'un repas de sang de se diriger vers une personne ou vers une autre, une préférence se manifeste souvent pour l'une d'elles, probablement pour des raisons de plus grande attractivité olfactive. Les communautés bactériennes vivant sur la peau varient beaucoup d'un individu à l'autre, d'où des variations importantes de cocktails olfactifs qui entraînent, du moins vis-à-vis des moustiques, des variations d'attractivité plus importantes entre individus qu'entre hommes et femmes. Les moustiques ont un sens de la vision très performant. Il est vrai que la lumière est attractive, au moins pour certaines espèces de moustiques nocturnes, puisque des pièges fonctionnent justement avec la lumière comme appât. Mais les moustiques n'ont pas de perception nette des couleurs, ce qui ne les empêche pas de distinguer les variations d'intensité lumineuse ou de chaleur. On estime que la couleur proprement dite ne joue pas de rôle significatif dans la succession de comportements qui aboutit à la prise d'un repas de sang.

Enfin, il est exact que certains moustiques (tels *Aedes aegypti* et *Aedes albopictus*) ont des pics d'activité de piqure en fin d'après-midi et à l'aube. D'autres (tel *Culex pipiens*) piquent toute la nuit, mais principalement durant la seconde moitié de nuit, quand le sommeil du dormeur est *a priori* le plus profond. Encore une fois, il est impossible de généraliser à l'ensemble du vaste groupe des moustiques.

J. Takken et R. O. Vermaut, Host preferences of blood-feeding mosquitoes, *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 58, pp. 433-453, 2013.

insectes en quête d'un repas de sang est prouvée depuis longtemps. Dans cet esprit, divers tissus imprégnés de substances insecticides ou répulsives sont apparus et permettent de confectionner vêtements, rideaux, couvertures, bâches murales ou voiles de tentes.

Les vêtements imprégnés de perméthrine confèrent une réelle protection, en particulier lorsque le tissu est imprégné au cours même de sa fabrication. Des kits d'imprégnation (ou de réimprégnation) de vêtements sont en vente dans le commerce ; ils apportent une aide appréciable, mais offrent une protection plus courte qu'avec une imprégnation faite par le fabricant. De plus, la manipulation de produits concentrés exige de l'utilisateur d'importantes précautions.

Le port de vêtements imprégnés n'exclut pas l'application de répulsifs cutanés, bien au contraire ; l'association de ces deux mesures a donné des résultats spectaculaires pour la prévention de piqûres d'insectes, en particulier en forêt guyanaise. Toutefois, la moustiquaire à imprégnation de longue durée reste le dispositif considéré comme le plus efficace pour protéger le dormeur.

Aux moyens de protection mentionnés jusqu'ici s'ajoutent des mesures dites d'appoint constituées d'un vaste ensemble de dispositifs disparates. Certains sont considérés comme d'emploi possible si on les utilise en complément d'autres mesures à efficacité démontrée. Il en va ainsi des

insecticides en aérosol, pour une utilisation ponctuelle, et des insecticides à diffusion lente sous forme de plaquette chauffante ou de liquide, la diffusion étant assurée par une résistance électrique. Les serpentins fumigènes ont quelque efficacité, mais ils doivent être réservés à un usage en extérieur et de courte durée, en raison de la toxicité des fumées. En revanche, l'usage de bracelets anti-insectes, souvent à base de DEET ou d'huiles essentielles à des concentrations non précisées, est fortement déconseillé, leur efficacité étant médiocre ou non prouvée et en raison des risques de réactions cutanées qu'ils font courir.

Inefficacité prouvée...

Il est également déconseillé d'utiliser les appareils à ultrasons, supposés reproduire la fréquence sonore du moustique mâle en vol, lequel ferait fuir les femelles en quête de sang (certains fabricants indiquent que leur appareil reproduit la fréquence sonore de la femelle !), ainsi que les comprimés de vitamine B₁ (supposée induire, après plusieurs prises orales à forte dose, une odeur cutanée répulsive pour les insectes). La non-efficacité de ces procédés a été prouvée par plusieurs études scientifiques.

Pour d'autres dispositifs, tels les supports gluants sans insecticide (sur lesquels les insectes se font piéger) ainsi que les coûteux pièges lumineux ou à dioxyde de carbone, les études sont encore peu

nombreuses, mais elles ne semblent pas indiquer d'efficacité significative.

Au-delà des informations concrètes sur l'efficacité de tel ou tel moyen de prévention des piqûres, quelques remarques s'imposent. La biodiversité impliquée dans les aspects de nuisance et de transmission vectorielle regroupe une large part de l'ensemble du vivant. Elle englobe hôtes vertébrés, arthropodes vecteurs et agents infectieux (bactéries, virus, parasites), et concerne de nombreuses maladies. Mais la complexité de cet ensemble ne s'arrête pas là.

Cette diversité est elle-même changeante en raison des variations de la répartition des espèces vectrices (certaines disparaissent, d'autres sont invasives), de l'apparition de nouvelles espèces (par découverte récente, ou par la spéciation en cours), de la structure génétique des agents infectieux (avec, au premier rang, celle des virus), des comportements des hôtes (en particulier l'homme), de l'environnement (changements globaux, aménagement du territoire, pratiques agricoles...). Les systèmes vectoriels, quoiqu'ils ne soient de mieux en mieux compris, restent en perpétuelle évolution.

Ce foisonnement du vivant suggère que, en matière de prévention de la piqûre, il faut une réponse résolument pragmatique. On a vu que l'arsenal des moyens et méthodes disponibles offre des solutions, mais leur nombre et leur efficacité sont limités. L'acceptabilité de certaines mesures évolue également. Tout comme

Le risque zéro, la protection totale n'est jamais atteinte. La conduite à tenir n'est pas la même en situation normale et en situation à haut risque infectieux, par exemple lors d'une épidémie de dengue ou en zone impaludée. Une approche bénéfice-risque est ainsi nécessaire pour définir la meilleure stratégie préventive. L'existence ou non d'un traitement des maladies mises en jeu est également à considérer. Par exemple, un recours thérapeutique est presque toujours possible en cas de maladies bactériennes, alors que ce n'est pas le cas pour les encéphalites ou les fièvres hémorragiques virales. Et des vaccins existent pour certaines maladies (fièvre jaune, encéphalite à tiques).

Face à ce constat, les scientifiques s'efforcent d'améliorer la connaissance des mécanismes d'identification et de reconnaissance de l'hôte par l'arthropode vecteur, pour mieux les contrarier, et imaginent des procédés novateurs pour pallier les limitations actuelles. En l'état actuel des recherches, on espère disposer d'ici quelques années de nouvelles familles de composés

BIBLIOGRAPHIE

Haut conseil de la santé publique, *Recommandations sanitaires pour les voyageurs 2013* (à l'attention des professionnels de santé), *Bulletin Épidémiologique hebdomadaire*, n° 22-23, 4 juin 2013 (téléchargeable sur <http://www.invs.sante.fr>).

S. Duvallet et L. de Gentile, *Protection personnelle antivectorielle*, IRD Éditions. 2012.

P. Carnevale, V. Robert *et al.*, *Les anophèles – Biologie, transmission du Plasmodium et lutte antivectorielle*, IRD Éditions. 2009.

J. Fontenille *et al.*, *La lutte antivectorielle en France – Disease control in France*, IRD Éditions. 2009.

Logiciels d'identification (identiciels) disponibles sur www.mivepec.ird.fr.

actifs contre les arthropodes, composés notamment issus du fantastique réservoir de molécules que constitue l'ensemble des plantes et des micro-organismes.

Quels sont les effets à long terme ?

Les scientifiques s'intéressent aussi à l'effet à long terme des mesures de protection individuelle sur la santé. La difficulté est d'évaluer l'impact de faibles expositions pendant une longue période. Cette difficulté est accrue lors d'exposition à des cocktails de substances actives, ce qui est le cas en pratique. Les chercheurs étudient aussi l'effet des moyens de protection personnelle sur l'environnement : leur utilisation peut conduire à une accumulation de substances toxiques dans les chaînes alimentaires, à des déséquilibres écologiques, à l'apparition de résistances aux produits insecticides. Autant de questions qui restent à éclaircir et qui appellent que toute action contre certains organismes vivants peut avoir des effets indésirables sur d'autres.

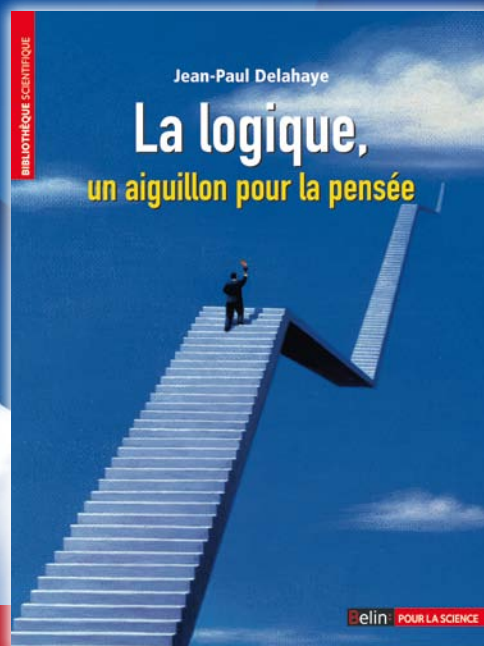
La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique – prise au sens large – a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'infinie variété des infinis, les étranges hyperensembles, l'indécidabilité de Turing, les déconcertants paradoxes probabilistes... Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences intéressera autant mathématiciens que philosophes et curieux, intrigués par le monde abstrait des raisonnements !

éditions Belin / Pour la Science 2012
160 pages – 27 euros – ISBN 978-2-8476-5115-2

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr



Erreurs fécondes

En 1982, l'Américain Nick Herbert imagine un télégraphe plus rapide que la lumière. Dans les années 1940, l'Allemand Max Delbrück explore la nature des gènes en étudiant des virus. Bien qu'erronées, leurs hypothèses ont entraîné des avancées majeures.

David Kaiser et Angela Creager

Comme la majorité des êtres humains, la plupart des scientifiques font nombre d'erreurs au long de leur parcours. Toutes, cependant, ne revêtent pas la même importance. Parmi les innombrables erreurs insignifiantes, les historiens ont découvert plusieurs exemples d'idées fausses qui se sont révélées fécondes. Ces erreurs, ayant trait à des caractéristiques fondamentales du monde, ont entraîné de nouvelles recherches qui ont débouché sur des percées majeures.

Le modèle atomique conçu par le physicien danois Niels Bohr en 1913, par exemple, s'est révélé faux, mais a ouvert la voie à la mécanique quantique. En 1912, le météorologue allemand Alfred Wegener exposait sa théorie de la dérive des continents, expliquant ces mouvements par des forces centrifuges. Le mécanisme d'action était erroné, mais le phénomène, alors décrié, a été confirmé, et ses travaux ont conduit à la théorie de la tectonique des plaques. Deux autres exemples, l'un en physique dans les années 1970, l'autre en biologie dans les années 1940, illustrent particulièrement bien l'impulsion que certaines erreurs peuvent donner aux sciences.

Les auteurs de ces erreurs – Nick Herbert et Max Delbrück –, tous deux chercheurs, avaient chacun tenté de répondre à des questions profondes et peu traitées. En combinant des idées qui n'avaient alors été examinées que par de rares scientifiques, ils ont réalisé des travaux préparatoires essentiels pour les domaines aujourd'hui prolifiques de l'information quantique et des biotechnologies.

La première erreur a contribué à éclairer un désaccord né aux premiers jours de la mécanique quantique, en 1927, lorsque Einstein et Bohr ont engagé une série de débats sur la nature et les implications de la théorie quantique. Einstein s'était attaqué à plusieurs étrangetés de la théorie. Les équations de la mécanique quantique, par exemple, ne donnaient que des probabilités de présence d'une particule et non des résultats définitifs. Comment pouvaient-elles suffire à décrire le monde ? Dieu ne joue pas aux dés, disait Einstein. La question en était restée là pendant 30 ans. Aucun des deux hommes n'avait pu convaincre son opposant.

Le commutateur supraluminique FLASH

Des décennies plus tard, un jeune physicien d'Irlande du Nord, John Bell, revient sur les échanges entre Einstein et Bohr. Bell revisite une expérience de pensée publiée en 1935 par Einstein et deux collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen. Souhaitant montrer que la mécanique quantique ne décrivait pas toute la réalité physique d'un système, les trois physiciens avaient imaginé une source projetant des paires de particules quantiques couplées – des photons, par exemple – dans des directions opposées. Leur expérience de pensée illustrait une étrange conséquence de la mécanique quantique : lorsque deux particules sont couplées d'une certaine façon (on dit aujourd'hui qu'elles sont « intriquées »), leurs propriétés restent corrélées. Dans l'expé-

rience de pensée, il suffisait ainsi de mesurer une grandeur physique de l'une pour connaître la valeur de la même grandeur pour l'autre. Pour les trois physiciens, cette corrélation était telle qu'elle impliquait l'existence d'une propriété commune aux deux particules, non décrite par la mécanique quantique. Mais Bell conçoit une variante de l'expérience de pensée où la mécanique quantique elle-même contredit cette idée.

En 1964, dans un article bref et élégant, il démontre qu'il existe certaines corrélations partielles qui ne s'expliquent que par la mécanique quantique. Il suffirait de les observer expérimentalement pour mettre en défaut la thèse d'Einstein, Podolsky et Rosen. De plus, conclut Bell, la corrélation entre les deux mesures étant instantanée, toute théorie capable de reproduire les corrélations quantiques à l'aide de « paramètres supplémentaires » impliquerait que le signal responsable de cette corrélation se propage instantanément d'une particule à l'autre.

L'article de Bell reçoit un accueil mitigé. Plusieurs physiciens remarquent que la propagation instantanée de signaux violerait les lois de la relativité restreinte d'Einstein, solidement étayées, qui énoncent qu'aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Nick Herbert est de ceux-là. Physicien dans le secteur industriel de la baie de San Francisco, il participe à un groupe de discussion informel, le Groupe de physique fondamentale. Les participants, pour la plupart de jeunes physiciens ayant obtenu leur doctorat dans des universités prestigieuses,

sont sans emploi ou sous-employés, victimes d'une crise sans précédent.

Disposant de temps, N. Herbert et ses camarades se réunissent chaque semaine au milieu des années 1970 pour chercher des solutions originales à des problèmes complexes de la physique moderne ayant fait l'objet de peu d'attention au cours de leur formation en physique. En particulier, le théorème de Bell et l'intrication quantique les fascinent. Un autre membre du groupe, John Clauser, a mené en 1972 la première expérience visant à tester le théorème de Bell. Les résultats semblaient corroborer les prévisions de la mécanique quantique, mais le montage, peu fiable, devait être amélioré (l'expérience décisive sera réalisée en 1982 par l'équipe d'Alain Aspect, de l'Institut d'optique théorique et appliquée, à Orsay). Le groupe s'intéresse notamment à ce que Bell a décrit comme des signaux instantanés entre particules quantiques. Si de tels signaux sont possibles, pourraient-ils

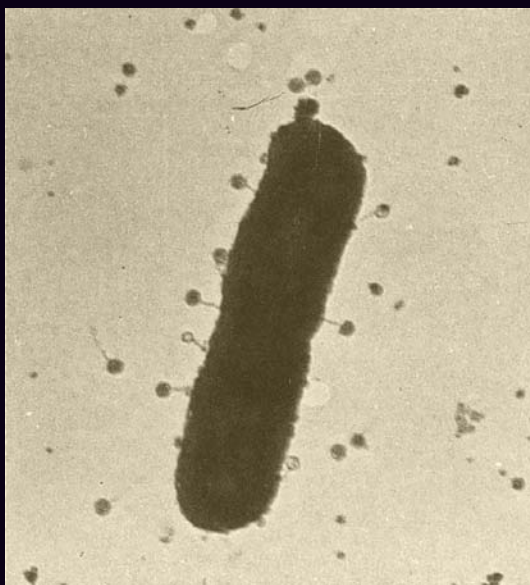
être utilisés pour transmettre des messages plus vite que la lumière ?

N. Herbert dresse les plans de ce qu'il nomme le communicateur supraluminique, un dispositif qui vise à exploiter cette propriété... en violant au passage la relativité et donc les lois de la physique. En janvier 1981, après quelques faux départs, N. Herbert finalise son projet, nommé FLASH pour première connexion supraluminique amplifiée par laser (voir l'encadré page 76).

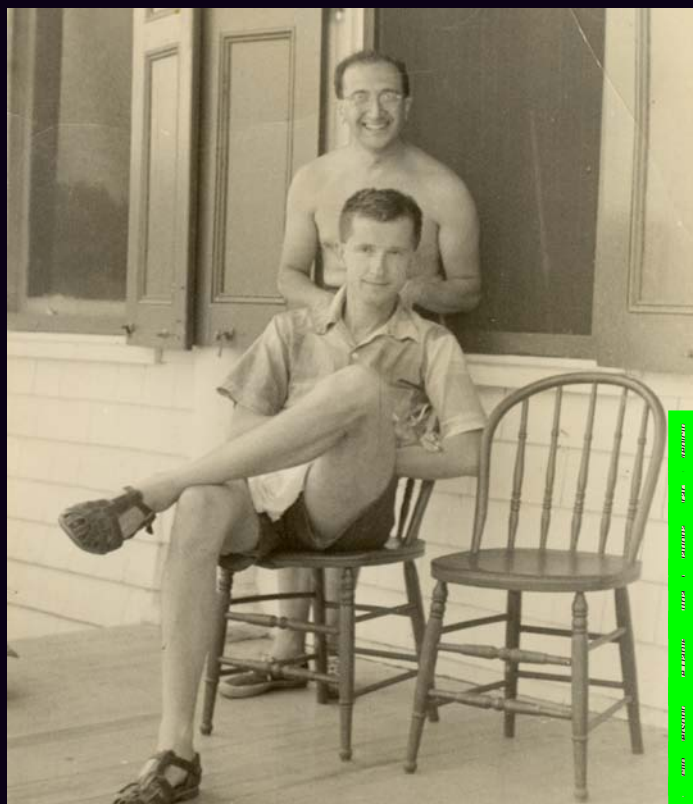
Le projet paraît infaillible. Plusieurs examinateurs du journal auquel il a soumis son article sont convaincus par son argument. « Nous n'avons pu identifier aucun défaut fondamental dans l'expérience proposée, qui révélerait l'origine du paradoxe », écrivent deux arbitres. Un troisième, Asher Peres, adopte une position plus audacieuse : il indique que l'article doit contenir une erreur – et qu'il faut donc le publier. Puisqu'il n'a pu trouver la faille, soutient-il, l'erreur doit être importante, du genre à produire de nouvelles avancées.

La position de Peres est vite corroborée. Trois groupes de physiciens – Gian Carlo Ghirardi et Tullio Weber en Italie, Wojciech Zurek et Bill Wootters aux États-Unis, et Dennis Dieks aux Pays-Bas – soumettent l'article de N. Herbert à un examen attentif. Ils montrent tous que N. Herbert a commis une erreur subtile dans le calcul du signal que le destinataire doit voir en sortie de son dispositif. N. Herbert a supposé que le laser amplificateur de son appareil serait capable d'émettre de grandes quantités de lumière dans le même état que la lumière originale. Les physiciens s'aperçoivent que le laser ne peut pas produire de telles copies d'un seul photon, mais seulement un mélange aléatoire d'états quantiques qui produirait un signal confus inexploitable.

Au cours de leur étude, les trois groupes découvrent une caractéristique fondamentale de la mécanique quantique : la théorie interdit la copie – le « clonage » – d'un état quantique inconnu sans perturber l'état en



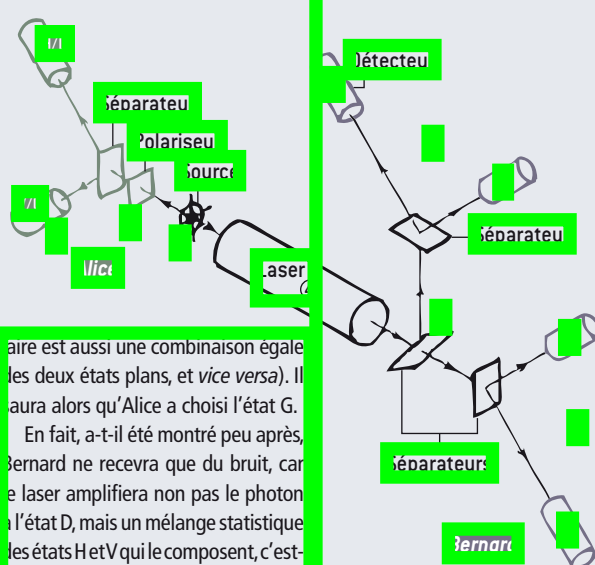
DANS LES ANNEES 1940 AUX ETATS-UNIS, le physicien allemand Max Delbrück (ci-contre à Cold Spring Harbor dans les années 1950) et son collègue Salvador Luria (au second plan) se sont lancés dans l'étude de la réplication du bactériophage, un virus infectant des bactéries (ci-dessus, sur un cliché de microscopie électronique réalisé en 1953 par Thomas Anderson). Ils espéraient découvrir la nature des « atomes » porteurs de l'hérédité, les gènes.



Un télégraphe plus rapide que la lumière ?

Le commutateur supraluminique FLASH imaginé par Nick Herbert en 1981 était inspiré de l'expérience de pensée d'Einstein, Podolsky et Rosen. Une source ① envoie des paires de photons intriqués dans des directions opposées. La propriété considérée est la polarisation des photons, c'est-à-dire la direction d'oscillation du champ électrique associé : la polarisation d'un photon peut être plane, avec un champ électrique oscillant soit horizontalement (H) soit verticalement (V), ou circulaire, où le champ décrit une hélice orientée vers la droite (D) ou vers la gauche (G). À gauche, à l'aide de polariseurs ②, Alice choisit de donner au photon reçu une polarisation plane ou circulaire. À droite, Bernard trouve que la moitié des photons sortants sont dans l'état D, aucun dans l'état G, un quart dans l'état H et un quart dans l'état V (car un état circu-

place vers Bernard, est alors instantanément imposée : si l'un est dans l'état H, l'autre doit être dans l'état V (idem avec les états D et G). Reste à décoder l'information, et elle aura été transmise plus vite que la lumière. Pour ce faire, N. Herbert ajoute un laser ④ sur le chemin du photon destiné à Bernard. Les lasers ont la propriété de produire en sortie un faisceau de photons de même polarisation que le signal entrant. En séparant le faisceau de photons en deux ⑤, Bernard peut en envoyer une moitié vers un détecteur mesurant la polarisation plane ⑥ et l'autre vers un détecteur mesurant la polarisation circulaire ⑦. Et si Alice a choisi une polarisation G, conclut N. Herbert, Bernard trouvera que la moitié des photons sortants sont dans l'état D, aucun dans l'état G, un quart dans l'état H et un quart dans l'état V (car un état circu-



laire est aussi une combinaison égale des deux états plans, et vice versa). Il aura alors qu'Alice a choisi l'état G. En fait, a-t-il été montré peu après, Bernard ne recevra que du bruit, car le laser amplifiera non pas le photon de l'état D, mais un mélange statistique des états H et V qui le composent, c'est-à-dire que les photos produits seront soit dans l'état H, soit dans l'état V, avec une probabilité de 50 pour cent.

question. C'est à cause de cette propriété, connue depuis sous le nom de théorème de non-clonage, que le système FLASH ne fonctionnait pas. Ce théorème rend impossible l'utilisation de la théorie quantique pour construire des télégraphes plus rapides que la lumière. La corrélation de deux particules n'est pas une action à distance, mais la manifestation du fait que deux systèmes quantiques couplés ne sont pas séparables et doivent être considérés comme un tout. L'intrication quantique et relativité d'Einstein ne sont donc pas incompatibles...

Très vite, quelques autres physiciens s'aperçoivent que le théorème de non-clonage offre plus qu'une simple réponse à l'article de N. Herbert ou qu'une base de conciliation de l'intrication et de la relativité. En 1984, l'Américain Charles Bennett et le Canadien Gilles Brassard s'en inspirent pour concevoir le tout premier protocole de cryptage quantique, une nouvelle méthode pour protéger les signaux numériques contre d'éventuels systèmes espions. Le fait que la mécanique quantique interdise à quiconque de faire des copies d'un état quantique inconnu signifie que des partenaires pourraient encoder

des messages secrets dans des photons intriqués et les transmettre en envoyant ces photons. Si quelqu'un interceptait un photon au passage et en faisait une copie, il détruirait immédiatement le signal recherché et trahirait en même temps sa présence.

Aujourd'hui, le cryptage quantique connaît un essor mondial. Plusieurs équipes, telles celles d'Anton Zeilinger en Autriche, Nicolas Gisin en Suisse et Philippe Grangier en France, ont réalisé des démonstrations en situation réelle de transferts de données sécurisés avec le cryptage quantique. Un héritage plus qu'honorable du projet impossible de N. Herbert...

Qu'est-ce qu'un gène ?

Notre second exemple concerne les travaux de Max Delbrück (1906-1981), professeur à l'Université Vanderbilt puis à l'Institut de Technologie de Californie, aux États-Unis. Ancien élève de Bohr, Delbrück avait tiré d'une conférence de son maître, en 1932, l'idée que la compréhension des processus biologiques engendrerait de nouveaux paradoxes dont la résolution pourrait conduire à la découverte de nouvelles lois de la physique.

Qu'est-ce qu'un gène ? Telle est l'une des questions majeures que l'on se pose dans les années 1940. Au début du XX^e siècle, à la suite de la redécouverte des lois de l'hérédité énoncées en 1866 par le moine morave Gregor Mendel, les biologistes sont convaincus que l'hérédité est portée par des facteurs – des gènes – dotés de deux propriétés : la capacité de se dupliquer et celle de produire des variations ou mutations qui se dupliquent aussi fidèlement que le gène original. Cependant, dans les années 1940, on ne sait toujours pas de quoi les gènes sont constitués, ni comment ils se dupliquent. On ne connaît aucun système physique qui s'autoréplique, écrit Erwin Schrödinger, pionnier de la physique quantique, dans son ouvrage *Qu'est-ce que la vie ?* (1944). Cette capacité des gènes paraît défier les lois de la thermodynamique.

Delbrück cherche le gène atomique, le système physique indivisible responsable des mystères de l'hérédité. En bon physicien, il pense que l'approche la plus fructueuse serait d'étudier les organismes les plus petits et les plus simples connus, les virus. Il choisit les bactériophages (ou phages). Ces virus qui infectent des bactéries sont parmi les

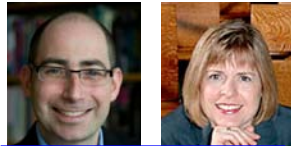
plus faciles à isoler et leur croissance est la plus rapide. Bien qu'à l'instar de tous les virus, les bactériophages ne se multiplient qu'à l'intérieur d'une cellule hôte, Delbrück est convaincu que la réplication des phages est un processus autonome, et il décide de se concentrer sur eux.

Pour résister ainsi aux changements chimiques constants de leur environnement, pense-t-il, les gènes doivent être constitués de molécules d'une grande stabilité, donc de protéines. Il devrait donc être possible d'observer leur duplication pendant la réplication des phages. Mais comment isoler des virus au moment de leur réplication ? La durée de réplication variant d'un phage à l'autre, Delbrück et son collègue Salvador Luria ont l'idée d'infecter la même bactérie avec deux souches d'un phage, l'une se reproduisant plus vite que l'autre. Ils espèrent ainsi isoler les formes intermédiaires de la réplication de la souche « lente » au moment où la bactérie éclate à cause du phage « rapide ».

Toutefois, l'expérience de la double infection ne se déroule pas comme prévu. Luria et Delbrück constatent que l'infection par une souche virale empêche l'infection par l'autre. À la même époque, Thomas Anderson, de l'Université de Pennsylvanie, examine au microscope électronique un échantillon de l'une des souches de phage de Delbrück et Luria. Il découvre que les virus sont bien plus complexes que les scientifiques l'avaient imaginé et qu'ils comportent donc certainement plus d'un gène atomique. Le phage se révèle une particule en forme de têtard, composée à la fois de protéines et d'acides nucléiques, et qui se fixe sur la surface externe de la bactérie pour déclencher une infection. La correspondance un virus/un gène envisagée par Delbrück bat de l'aile.

Le biologiste ne se laisse pas démonter pour autant. Pour comprendre comment certaines bactéries résistent à l'infection par les phages, il met au point avec Luria un « test de fluctuation ». Inspiré des calculs probabilistes de la mécanique quantique, ce test consiste à cultiver séparément quelques bactéries d'une même souche, puis à mettre chaque population obtenue en contact avec le phage. Les proportions de bactéries résistantes dans chaque cas indiqueront si les mutations sont

LES AUTEURS



David KAISER est professeur d'histoire des sciences au Département de physique de l'Institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis.

Angela CREAGER est professeur d'histoire de la biologie à l'Université de Princeton, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

D. Kaiser, *How the Hippies Saved Physics*, W. W. Norton, 2011.

S. Holton [dir.], *Errors : consequences of big mistakes in the natural and social sciences*, *Social Research*, n° 72, 2005.

S. Bergia, *Einstein. Le père du temps moderne*, Belin, 2004.

M. Morange, *Les mousquetaires de la nouvelle biologie, les Génies de la Science*, n° 10, 2002.

A. Creager, *The Life of Virus : Tobacco Mosaic Virus as an Experimental Model, 1930-1965*, University of Chicago Press, 2001.

M. et M. Delbrück, *Bacterial viruses and sex*, *Scientific American*, vol. 129 (5), pp. 46-51, 1948.

apparues aléatoirement ou en réaction au phage. L'expérience montre que les bactéries évoluent selon les principes darwiniens, au gré de mutations aléatoires qui, parfois, leur confèrent des avantages pour leur survie.

Le test de fluctuation n'a pas fait avancer la compréhension de la réplication des virus, au grand dam de Delbrück. De plus, il devenait clair que le phage utilisait les ressources cellulaires de la bactérie hôte pour se répliquer. Contrairement à l'hypothèse initiale de Delbrück, on ne pouvait pas ignorer l'hôte. Néanmoins, son intuition de se concentrer sur un système simple a été fructueuse. Elle a permis de montrer que le patrimoine des bactéries est transmis par des gènes et non acquis par un simple mécanisme d'adaptation au milieu, marquant les débuts de la génétique des bactéries et de la biologie moléculaire. Et le phage est devenu un organisme modèle pour toute une génération de biologistes, inspirant même James Watson dans sa quête de la structure de l'ADN. Quant à Delbrück et Luria, ils ont reçu (avec Alfred Hershey) le prix Nobel de physiologie et médecine en 1969, en partie pour ces travaux.

Et aujourd'hui ?

Dans ces deux exemples, des scientifiques ingénieux ont avancé des idées fausses. Ces erreurs, peu banales, ont entraîné des développements majeurs dans différents domaines de la science fondamentale, bientôt appuyés par des programmes de recherche de plusieurs milliards d'euros, et l'éclosion d'industries prospères.

Les erreurs de N. Herbert et Delbrück invitent à la réflexion. Delbrück a fait une carrière scientifique prestigieuse. Il a expérimenté des approches non conventionnelles et soumis même la meilleure science à un examen critique. Il était assez reconnu par ses pairs pour se permettre l'hétérodoxie. N. Herbert, en revanche, peinait à joindre les deux bouts, allant parfois même à l'assistance publique. Qui sait si, aujourd'hui, son article aurait été publié ? Notre système d'évaluation des contributions scientifiques laisse-t-il une chance de reconnaître ces quelques erreurs qui pourraient susciter un bond créatif en science ?

La sélection de livres

■ POUR LA

SCIENCE

Profitez de l'été pour découvrir les dernières nouveautés de nos différentes collections ! Voyagez au pays des physiciens, mathématiciens, neuroscientifiques, biologistes ou encore des naturalistes avec des ouvrages de référence. Bonnes lectures estivales !

Les sens trompés Des anomalies du cerveau aux comportements étranges

Patrick Verstiche

Cet ouvrage est un recueil des articles que le neurologue Patrick Verstiche a publiés dans le magazine *Cerveau & Psycho*. L'auteur, médecin clinicien, nous propose des « enquêtes médicales » sur des cas cliniques parfois difficiles à élucider !

Editions Belin/Pour la Science 2013
60 pages – 25 euros – ISBN 978-2-84245-111-0



Nouveauté

Réf. 075111

Merveilleux crabes

101 histoires pour un éloge de la biodiversité

Catherine Vadon

Tourteau, araignée de mer, étrille, etc. : si les crabes sont un mets apprécié, l'incroyable diversité de ces animaux aux formes, aux couleurs et aux modes de vie étonnants reste méconnue. Le livre aux 101 histoires de crabes : des histoires de biodiversité, d'exploration des mondes marins, de pêches, de légendes, etc. Chaque histoire est illustrée de magnifiques photos ou planches anciennes.

Éditions Belin 2013
126 pages – 29,50 euros – ISBN 978-2-7011-5414-5



Nouveauté

Réf. 005414

Répondre du vivant

Roland Schaer

La puissance technique a fait de nous une espèce dominante. Si la puissance appelle la responsabilité, comment penser l'exercice de cette responsabilité aujourd'hui ? En cessant de tenir l'homme pour une exception placée hors de la nature. Au travers de cet essai très agréable à lire, Roland Schaer nous amène à effectuer un changement de perspective profond.

Editions Le Pommier 2013
56 pages – 21 euros – ISBN 978-2-7465-0662-4



Nouveauté

Réf. 090662

En partenariat
avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777



Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.



Nous, les mammifères

Jean-Louis Hartenberger

Les humains que nous sommes connaissent-ils bien leur nature profonde ? Ils y gagneraient ! L'auteur nous raconte comment, peu à peu, nous avons appris à connaître les mammifères. Puis il nous explique, avec force détails et anecdotes, les particularités qui caractérisent les mammifères, dont nous sommes : lactation, placenta, oûie, dentition et cerveau.

Éditions Le Pommier 2013
140 pages – 21 euros – ISBN 978-2-7465-0663-3

Enquête sur les créationnismes

Olivier Brosseau, Cyrille Baudouin

Fruit d'une enquête minutieuse et riche d'interviews de spécialistes reconnus (biologistes, cosmologistes, sociologues, philosophes, etc.), cet ouvrage est à la fois un recueil d'informations sur les créationnismes et un outil indispensable pour exercer son esprit critique dès lors que la science est convoquée pour justifier des positions politiques.

Éditions Belin 2013
136 pages – 21,50 euros – ISBN 978-2-7465-5295-5



Nouveauté

Réf. 005414

Innovation

ditions Belin 2013
100 pages – 22 euros – ISBN 978-2-7011-7685-7



Réf. 007685

longue

Éditions Le Pommier 2013
92 pages – 10 euros - ISBN 978-2-7465-0677-0

Réf. 0906

ditions Belin 2013
92 pages – 19,50 euros
ISBN 978-2-8424-5885-3



Ref: 00588

ditions Le Pommier 2013
92 pages – 10 euros
ISBN 978-2-7465-0676-3



Ref: 090526

ditions Le Pommier 2013
92 pages – 10 euros
ISBN 978-2-7465-0675-6



Ref: 11901625

ditions Belin 2013
28 pages – 29,50 euros
ISBN 978-2-7011-6505-9

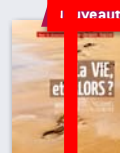


Ref 106501

Éditions Belin 2013
124 pages – 24 euros – ISBN 978-2-7011-5695-8

Réf. 005699

ditions Belin 2013
48 pages – 23,50 euros – ISBN 978-2-7011-6148-



100

ou connectez-vous sur www.pourlascience.fr/librairie
sauf références signalées par un * sur www.editions-belin.fr]

■ POUR LA

SCIENCE

Autour de vous, nous avons créé le Centre Dauid Sciences, 630 avenue du Coeur d'Or, 44100 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@dauid.fr

Adresse:

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

Cryptogramme

Signature obligatoire

LOGIQUE & CALCUL

La persistance des nombres

Quand on multiplie les chiffres d'un nombre entier, on trouve un autre nombre entier, et l'on peut recommencer. Combien de fois ? Onze fois au plus... semble-t-il.

Jean-Paul DELAHAYE

Certains problèmes qu'on explique en quelques secondes semblent hors de portée des raisonnements abstraits et des capacités de calcul des plus puissants ordinateurs. Le problème de la persistance multiplicative des nombres en base 10, d'énoncé très simple, est l'une de ces redoutables énigmes où le blocage est total.

Considérons un nombre entier positif, par exemple 377. Multiplions ses chiffres : $3 \times 7 \times 7 = 147$. Opérons de même avec le résultat 147 : $1 \times 4 \times 7 = 28$. Recommencons : $2 \times 8 = 16$. Encore : $1 \times 6 = 6$. Arrivé à un nombre d'un seul chiffre, on ne peut plus rien faire : $377 \rightarrow 147 \rightarrow 28 \rightarrow 16 \rightarrow 6$.

Cette suite est la « suite multiplicative » de 377 et la « persistance multiplicative » p de 377 est le nombre de fois qu'il a fallu multiplier les chiffres avant d'arriver à un nombre à un seul chiffre : ici, $p = 4$.

Voici le tableau des persistance multiplicative (en rouge) des entiers inférieurs à 100 (chaque ligne représente une dizaine).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
4	1	1	2	2	2	3	3	2	3	3
5	1	1	2	2	3	3	2	3	3	3
6	1	1	2	2	2	3	2	3	3	3
7	1	1	2	3	3	2	4	3	3	3
8	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
9	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3

Parmi les entiers compris entre 0 et 100, 77 a la plus grande persistance : elle vaut 4.

La persistance multiplicative d'un entier ne peut pas être infinie. Ce n'est pas étonnant, mais démontrons-le, nous en tirerons une information plus fine sur la longueur des suites multiplicatives. Quand nous multiplions les chiffres d'un nombre $N = a_1 a_2 \dots a_c$ ayant c chiffres (avec $c \geq 2$), nous obtenons au plus $a_1 \times 9^{c-1}$, car chaque a_i vaut au plus 9. Ce maximum possible est strictement inférieur à N (car $N \geq a_1 \times 10^{c-1}$). La suite multiplicative de N , qui ne comporte que des entiers positifs ou nuls, est strictement décroissante et donc finie.

La persistance atteint-elle un maximum ?

Ce que nous venons de dire permet de majorer la persistance d'un nombre en fonction de son nombre de chiffres. En effet, puisque le produit des chiffres de $N = a_1 a_2 \dots a_c$ est inférieur ou égal à $a_1 \times 9^{c-1}$, le produit des chiffres d'un nombre N de c chiffres est inférieur à $N \times (9/10)^{c-1}$. Comme $(9/10)^{22} = 0,09847\dots < 1/10$, on en déduit que si N a 23 chiffres ou plus, le nombre de chiffres du produit des chiffres de N est strictement inférieur au nombre de chiffres de N . Il s'ensuit que la persistance de N est majorée par le nombre de chiffres de N plus une constante. Des calculs complémentaires montrent que la constante 2 convient jusqu'à 10^{23} , et

donc qu'elle convient aussi pour tout N : la persistance d'un entier N de c chiffres est toujours inférieure ou égale à $c + 2$.

Maintenant se posent les questions naturelles et élémentaires suivantes :

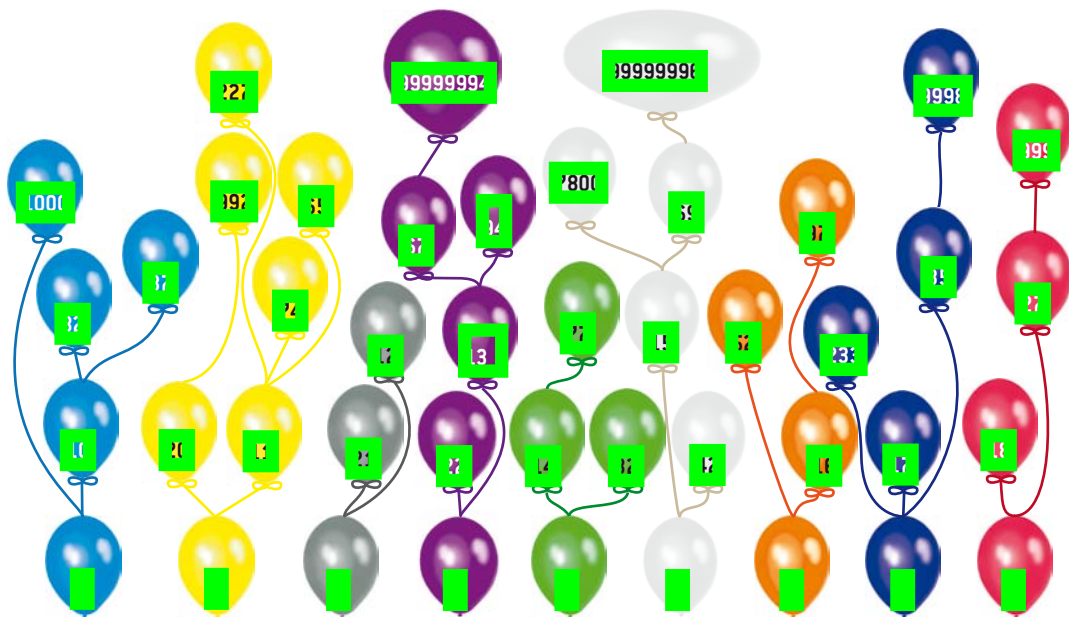
- La persistance d'un nombre peut-elle être d'importe quel entier ?
- Si ce n'est pas le cas, quelle est la persistance maximale d'un nombre ?

Ces questions paraissent faciles, dans la mesure où l'ordinateur peut suppléer à nos capacités limitées de manipulation des chiffres. L'expérience montre qu'il n'en est rien : jusqu'à présent, ni le raisonnement ni le calcul par ordinateur n'ont permis de trouver d'entiers ayant une persistance supérieure à 11 ! Et l'on désespère d'en découvrir, ainsi que de réussir à prouver que 11 est le maximum.

Voici le tableau des entiers N les plus petits ayant une persistance multiplicative p égale à 1, 2, 3, ..., 11 :

p	N
1	10
2	25
3	39
4	77
5	679
6	6788
7	68889
8	2677889
9	26888999
10	3778888999
11	277777788888899

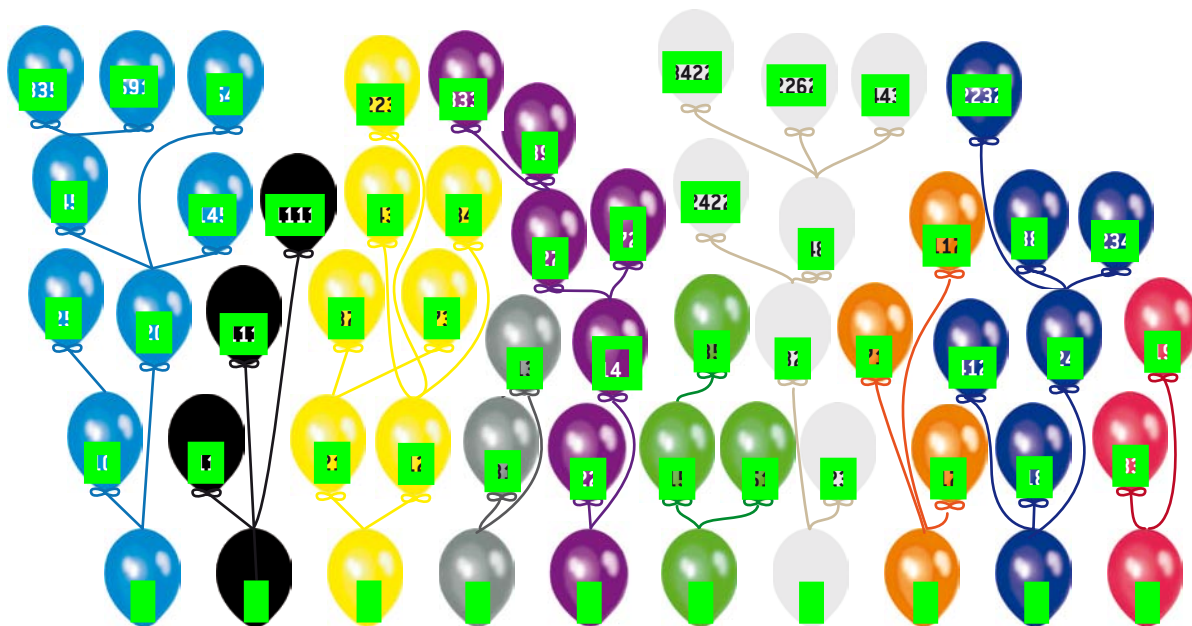
1. La persistance additive



On obtient la persistance additive en additionnant tous les chiffres d'un nombre à chaque étape : $32529 \rightarrow 3 + 2 + 5 + 2 + 9 = 21 \rightarrow 2 + 1 = 3$.
La persistance additive est 2, le nombre d'étapes, le chiffre final que l'on

rouve est utilisé depuis toujours dans les « preuves par 9 » : on démontre que le point final de N est le reste de la division de N par 9 (ici, 9 étant équivalent à 0). Des exemples sont indiqués pour les différents points finals.

2. La persistance multiplicative



Pour calculer la persistance multiplicative d'un nombre, on multiplie ses chiffres. Avec le nouveau nombre obtenu, on recommence l'opération, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on obtienne un nombre constitué d'un seul chiffre. Le nombre d'étapes de l'opération est la persistance multiplicative du nombre. Ainsi, en partant de 335, on passe à 45, puis

20, puis à 0; la persistance est égale à 3. Le dessin représente quelques nombres et les suites de nombres qu'on en déduit. On démontre sans calcul que la persistance additive est aussi grande que l'on veut; en revanche, on ne sait pas le démontrer pour la persistance multiplicative, qui semble ne jamais dépasser 11.

3. Une variante de John Conway

Le mathématicien britannique John Conway, inventeur du Jeu de la vie et de mille autres curiosités mathématiques, a proposé

en 2007 une énigme dont le principe ressemble à celui de la persistance multiplicative et qui conduit à une très étrange situation.

Partant d'un nombre N , par exemple 3 462, on calcule le successeur de N en écrivant ce nombre comme un « train de puissances » $3^4 6^2$ et en effectuant l'évaluation $3^4 6^2 = 2916$. Puis on recommence.

Ainsi, $2916 \rightarrow 2^9 1^6 = 512 \rightarrow 5^1 2 = 10 \rightarrow 1^0 = 1$ (quand N est composé d'un nombre impair de chiffres, le dernier chiffre n'a pas d'exposant. Quand c'est nécessaire, on utilise la convention $0^0 = 1$.)

La question posée par J. Conway est : existe-t-il des nombres indestructibles, c'est-à-dire dont le calcul par sa règle ne conduit pas à un nombre constitué d'un seul chiffre ?



Neil Sloane



John Conway

Il trouva le nombre indestructible 2592 :

$$2592 \rightarrow 2^5 9^2 = 2592$$

N'en trouvant aucun autre, il conjectura que c'était le seul nombre indestructible. Neil Sloane effectua une recherche plus approfondie et découvrit :

$$2454728428486656000000000 \rightarrow$$

$$2^4 5^4 7^2 8^4 2^8 4^8 6^6 5^6 0^0 0^0 0^0 0^0 =$$

$$2454728428486656000000000$$

N. Sloane conjecture maintenant qu'il n'en existe pas d'autres. La situation est assez étonnante. L'opération de calcul du « train de puissances » détruit tous les entiers, car ils sont rapidement réduits à un seul chiffre, sauf deux nombres, 2592 et 2454728428486656000000000. Qu'ont-ils donc de particulier ? Un lecteur essaiera-t-il de vérifier qu'il n'y a pas de troisième exception en prenant des nombres plus grands ?

Le plus ancien document sur la persistance des nombres est un article de 1973 écrit par Neil Sloane. Il indiquait qu'aucun nombre jusqu'à 10^{50} n'a de persistance supérieure à 11. N. Sloane formulait aussi la conjecture qu'il existe un nombre c (probablement 11) tel qu'aucun entier N n'a une persistance multiplicative supérieure à c .

La notion de persistance multiplicative a aussi un sens dans les autres bases de numération que 10. Sous sa forme générale, la conjecture énoncée par N. Sloane était que pour toute base de numération b , il existe une constante $p_{\max}(b)$ (dépendante de b), qui indique le maximum possible pour la persistance des entiers écrits en base b .

Vérifier jusqu'à 10^{500}

Dans le cas de la base 10, les calculs les plus avancés effectués en 2011 par Mark Diamond, en Australie, assurent qu'aucun nombre inférieur à 10^{333} n'a une persistance supérieure à 11. On conjecture donc de plus en plus fortement que $p_{\max}(10) = 11$: en base 10, aucun entier n'aurait une persistance multiplicative supérieure à 11.

Faire la vérification jusqu'à 10^{333} en prenant les entiers les uns après les autres est totalement impossible. Les calculs les plus longs, entrepris par exemple pour factoriser de grands entiers ou relever des défis cryptographiques, comportent environ 10^{21} opérations.

De tels calculs ont occupé des dizaines de machines assez puissantes pendant des semaines et leur coût est élevé. Mener un calcul demandant plus de 10^{21} opérations élémentaires (ou instructions) est peut-être envisageable, mais 10^{25} est une borne technologique qu'on ne dépassera pas avant plusieurs années. Bien sûr, 10^{333} risque d'être tout jamais inenvisageable.

Il est donc intéressant de comprendre comment on a pu aller jusqu'à 10^{333} . Cela illustre l'idée que dans la programmation d'un ordinateur même puissant, l'intelligence et les mathématiques sont utiles, et permettent de dépasser très largement les limites que la technologie fixe à celui qui se précipite bêtement. Tout se fonde sur une série de remarques impliquant chacune une économie de calcul. Ici, il n'est question que de la persistance multiplicative en base 10, que nous abrégons en « persistance ».

Remarque 1. Dès qu'un nombre comporte un chiffre 0, sa persistance est 1. Il n'est donc pas nécessaire de s'occuper des nombres comportant un ou plusieurs 0.

Remarque 2. En enlevant tous les chiffres 1 d'un nombre, on ne change pas sa persistance. Il est donc inutile de s'occuper des nombres comportant des 1.

Remarque 3. Si un nombre comporte un chiffre pair (2, 4, 6 ou 8) et un 5, sa persistance est au plus 2, car le produit de ses chiffres se termine par un 0. Il sera donc

inutile de considérer les nombres comportant à la fois un chiffre pair et un 5 (exemple : $28727995 \rightarrow 1111320 \rightarrow 0$).

Remarque 4. L'ordre des chiffres d'un nombre est sans importance pour le calcul de sa persistance. C'est évident, puisque le produit de ses chiffres ne dépend pas de l'ordre dans lequel ils sont écrits ; ainsi, 23477 et 77324 ont la même persistance. On pourra donc considérer uniquement les nombres dont les chiffres sont classés par ordre croissant, tel 222667779999. On n'oubliera aucun nombre en procédant ainsi ; par exemple, 772992 ne sera pas traité directement, mais le sera indirectement via le nombre 227799, qui est plus petit et de même persistance.

Remarque 5. En remplaçant les 8 d'un nombre N auquel on s'intéresse par 222, les 4 par 22, les 6 par 23, les 9 par 33 (par exemple, 3726793 devient 22272237333), on obtient un nombre ayant la même persistance que N , qu'on nommera *forme normalisée* de N . On pourra donc n'étudier que les nombres ne comportant que les chiffres premiers : 2, 3, 5 et 7.

En cumulant les cinq remarques, on en déduit que tout entier qui n'aboutit pas à 0 en deux étapes a la même persistance qu'un nombre de la forme 222...2333...3777...7 ou 333...3555...5777...7.

Dans un test entrepris en 2011, M. Diamond a effectivement calculé la persistance

de tous les nombres d'une des deux formes ci-dessus comportant jusqu'à 1 000 fois le chiffre 2, 1 000 fois le 3, 1 000 fois le 5, 1 000 fois le 7. Aucun nombre de persistance supérieure à 11 n'a été trouvé.

Remarquons que ce test n'a pas porté sur le nombre 88...8 comportant 334 fois le 8, car il n'est pas traité directement et que lorsqu'on le met sous la forme normalisée, il devient 222...2 avec 1 002 fois le 2, dont la persistance n'a pas été calculée par M. Diamond. Ce nombre 88...8 (334 fois le 8) est le plus petit ayant échappé au test, car les autres substitutions pour mettre un nombre sous forme normale (4 → 22, 5 → 23, 9 → 33) rallongent moins que la substitution 8 → 222. Il en résulte que tous les nombres de 333 chiffres ou moins ont été envisagés directement ou indirectement par le test réalisé en 2011 (qui en a traité d'autres, mais de manière non systématique, au-delà de 10^{333}).

Toujours pas de théorème

Le test de M. Diamond, qui couvre tous les entiers jusqu'à 10^{333} , a effectué environ deux milliards de calculs de persistance au total. En effet, il y a exactement $1001^3 = 1\,003\,003\,001$ nombres de la forme 222...2333...3777...7 où le 2 apparaît entre 0 et 1 000 fois, le 3 entre 0 et 1 000 fois, le 7 entre 0 et 1 000 fois. Il y a autant de nombres de la seconde forme 333...3555...5777...7, ce qui fait un total de 2 006 006 002 nombres passés directement par le test. Par rapport aux 10^{333} cas à traiter pour celui qui ne réfléchit pas, le gain est colossal ! En mai 2013, Francesco De Comité, au LIFL, a poussé la vérification jusqu'à 10^{500} .

Il est intéressant que la conjecture ait été testée aussi loin. Mais aux yeux du mathématicien, tant qu'un raisonnement n'aura pas été trouvé, on continuera de parler de conjecture et non de théorème.

Même si on ne peut aujourd'hui être certain que la persistance d'un entier est au plus 11, on peut se consoler avec le résultat suivant, qui donne la persistance en moyenne d'un nombre à l'infini : la persistance multiplicative moyenne

des nombres compris entre 1 et N tend vers 1 quand N tend vers l'infini (elle est donc largement inférieure à 11). Comme nous allons le voir, ce résultat (démontré) provient de l'étude des points finals des suites multiplicatives.

Chaque suite multiplicative en base 10 se termine par l'un des dix chiffres, son point final (parfois nommé *multiplicative digital root* en anglais). On en trouve une table sur <http://oeis.org/A031347>.

Cependant, tous les chiffres n'ont pas la même probabilité d'être un point final. Le calcul indique que pour N variant entre 1 et 100, on obtient 25 fois le 0 comme point final, seulement 2 fois le 1 et 23 fois le 8. Le tableau ci-dessous précise ce qui se passe quand N varie entre 1 et 100, puis entre 1 et 1 000, puis entre 1 et 10 000, etc.

On le voit, une majorité de plus en plus importante de nombres ont pour point final le chiffre 0. Il semble même que la proportion d'entiers positifs inférieurs à N dont le point final est 0 tend progressivement vers 100 %. Pour le démontrer, on remarque que lorsqu'on prend au hasard un nombre de c chiffres, la probabilité qu'il ne comporte aucun 0 est $(9/10)^c$ (son deuxième chiffre n'est pas un 0 neuf fois sur dix ; de même pour le troisième chiffre, etc.). Cette probabilité tend vers 0 quand c tend vers l'infini.

Puisqu'un nombre qui comporte un 0 a une persistance égale à 1 et que ceux qui n'ont pas la persistance 1 ont une persistance majorée par $c + 2$ (voir plus haut), il s'ensuit que la persistance multiplicative moyenne d'un entier inférieur à N tend vers 1 quand N tend vers l'infini.

Malheureusement, le fait de savoir que cette moyenne est égale à 1 ne permet pas

de savoir si 11 est le maximum : la moyenne ne dit rien sur les écarts à la moyenne !

A propos des points finals d'une suite multiplicative, une autre question pourtant simple reste non r solv e. On remarque qu'entre 1 et 10^n , le point final 1 est obtenu n fois exactement (voir la colonne sous le 1). Cela provient de ce que le produit des chiffres d'un entier vaut 1 si et seulement si cet entier ne comporte que des 1, c'est- dire si c'est un nombre parmi 1, 11, 111, 1 111, 11 111, etc. Entre 1 et 10^n , il y a donc au moins n nombres dont le point final est 1 (d'ailleurs atteint en une seule étape).

Points finals et rep-units

Pour prouver qu'entre 1 et 10^n , il y a exactement n entiers ayant pour point final le 1, il suffit donc de prouver que les nombres de la forme 111...1, dénommés *rep-units*, ont toujours un autre diviseur premier que 2, 3, 5 ou 7. En effet, si un *rep-unit* A n'avait comme facteurs premiers que 2, 3, 5 et 7, alors il existerait un nombre B (celui ayant les facteurs premiers de A comme chiffres) qui ne serait pas un *rep-unit*, mais qui en donnerait un par multiplication de ses chiffres, et aurait donc 1 comme point final. Du coup, il y aurait toujours, entre 1 et 10^n , plus de n entiers ayant le point final 1 pour n assez grand.

Les *rep-units* ont été étudiés. Des pages Internet leur sont consacrées, mais rien ne permet d'affirmer que tous ont un facteur premier supérieur à 9. Ceux déjà factorisés ont tous un facteur premier supérieur à 9 (voir http://homepage2.nifty.com/m_kamada/math/11111.htm), mais qu'en est-il des autres ? Personne, à ma

Répartition des nombres entre 1 et 10^n en fonction de leur « point final »										
Point final	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Entre 1 et 10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Entre 1 et 10	25	2	9	3	10	7	14	3	23	4
Entre 1 et 10	477	3	77	6	69	40	159	6	161	10
Entre 1 et 10	6 740	4	543	10	279	172	1 172	10	1 050	20
Entre 1 et 10	32 402	5	3 213	15	394	507	5 843	15	5 921	35

4. La variante de Paul Erdős

D'après Richard Guy, le mathématicien hongrois Paul Erdős a lui-même proposé une intéressante et très simple variante du problème de la persistance multiplicative. Trouvant peut-être trop facile la conjecture (pour l'instant non résolue...) affirmant que la persistance multiplicative de tout nombre en base 10 est au plus 11, il a proposé que d'une étape à l'autre, on ne calcule que le produit des chiffres non nuls : par exemple, $4570 \rightarrow 140 \rightarrow 4$.



Cette « persistance à la Erdős » (toujours au moins égale à la persistance usuelle) est encore plus mal connue. W. Schneider a en effet découvert les nombres suivants qui ont une persistance à la Erdős supérieure à 11 :

(a) Le nombre $N = 5_{(16)}7_{(13)}$ (le 5 répète 16 fois, suivi du 7 répété 13 fois) a une persistance à la Erdős de 12 : $555555555555557777777777777 \rightarrow 14784089722747802734375 \rightarrow 49962386718720 \rightarrow 438939648 \rightarrow 4478976 \rightarrow 338688 \rightarrow 27648 \rightarrow 688 \rightarrow 768 \rightarrow 336 \rightarrow 54 \rightarrow 20 \rightarrow 2$.

b) $7_{(42)}8_{(2)}9_{(14)}$ a une persistance à la Erdős de 13.
c) $2_{(1)}6_{(1)}7_{(130)}9_{(8)}$ a une persistance à la Erdős égale à 14.
Wilfred Whiteside et Phil Carmody ont été jusqu'à 17 (voir www.primepuzzles.net/puzzles/puzz_341.html) :

(d) $6_{(1)}7_{(157)}8_{(46)}9_{(25)}$ a une persistance à la Erdős de 15.

(e) $3_{(1)}7_{(54)}8_{(82)}9_{(353)}$ a une persistance à la Erdős de 16.

(f) $3_{(1)}7_{(27)}8_{(622)}9_{(399)}$ a une persistance à la Erdős de 17.

Comment être certain qu'on ne trouvera pas mieux ? Et même, comment savoir qu'un maximum sera atteint ? Erdős n'a pas répondu, mais il a proposé la conjecture suivante : pour toute base de numération b , il existe une constante $p'(b)$ donnant le maximum possible pour la persistance à la Erdős des nombres écrits dans cette base. Cette variante de la conjecture est plus ardue que l'énoncé initial. Il n'est d'ailleurs pas si probable que cela qu'elle soit vraie, puisque, aujourd'hui, nul ne semble avoir identifié ce maximum indépassable dont elle annonce l'existence, même dans le cas de la base 10 !

connaissance, n'a prouvé que c'était vrai pour tous les *rep-units*. Il est donc possible que la colonne sous le 1 du tableau des points finals, prolongée indéfiniment, ne soit pas, comme elle semble l'être, la suite régulière des entiers 1, 2, 3, 4, ... C'est peut-être le cas, mais l'affirmer, c'est énoncer une conjecture !

Dans le tableau des points finals, F. De Comité a remarqué trois autres colonnes.

— La colonne sous le 3 et la colonne sous le 7 contiennent toujours les mêmes nombres : il s'agit des nombres triangulaires, de la forme $n(n-1)/2$, qu'on trouve sur la troisième colonne du triangle de Pascal : 1, 3, 6, 10, 15, 21, ...

— La colonne sous le 9 contient les nombres de la quatrième colonne du triangle de Pascal, de la forme $n(n-1)(n-2)/6$: 1, 4, 10, 20, 35, 56, 84, 120, ...

Comme pour la colonne sous le 1, il est assez facile de démontrer que les nombres trouvés dans ces colonnes doivent au moins avoir ces valeurs, mais il est parfaitement possible que cela cesse d'être vrai si l'on va assez loin dans le tableau. Comme précédemment, cela dépend de conjectures difficiles sur la factorisation des entiers en nombres premiers.

Le mathématicien se comporte souvent comme le célèbre ivrogne qui, la nuit, cherche ses clefs sous un lampadaire. On lui

demande : « Êtes-vous certain d'avoir perdu vos clefs sous ce lampadaire ? ». « Non », répond-il, mais ici il y a de la lumière. » Ne réussissant pas à résoudre le problème fondamental de la persistance multiplicative des nombres en base 10 (est-elle au plus 11 ?), les mathématiciens se sont intéressés aux variantes du problème, qu'ils ont parfois résolues parce qu'elles se trouvaient sous le lampadaire.

Et dans les autres bases ?

La première idée de variante consiste à considérer d'autres bases de numération.

En base 2, le problème est particulièrement facile. Un nombre écrit en base 2 ne comporte que des 1 et des 0. S'il comporte un 0, sa persistance multiplicative en base 2 est 1 (et son point final est 0). S'il n'en comporte pas, c'est qu'il n'est fait que de 1, et donc sa persistance multiplicative en base 2 est aussi égale à 1 (et son point final est 1). Ainsi, il n'y a aucun mystère en base 2 : 0 et 1 ont la persistance 0, et les autres entiers sont de persistance 1.

En base 3, c'est déjà plus intéressant. Un entier s'y écrit avec des 0, des 1 et des 2. S'il comporte un 0, sa persistance est 1 et son point final 0. Sinon, les 1 n'ont pas d'importance et le produit de ses chiffres est une puissance de 2.

Il se trouve que toutes les puissances de 2 écrites en base 3, à l'exception de 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 et 2^{15} , semblent contenir un 0, ce qui arrête la suite multiplicative.

Le test pour savoir si toute puissance de 2 en base 3 comporte un 0 a été mené jusqu'à 2^{10000} et aucune autre exception que les cinq mentionnées n'a été découverte. Cela ne constitue pas une preuve et il semble malheureusement que la conjecture « Toutes les puissances de 2 à partir de 2^{16} comportent un 0 dans leur écriture en base 3 » soit difficile.

Domage, car si l'on admet cette conjecture, le problème de la persistance en base 3 est résolu :

(a) Si N comporte un 0, sa persistance multiplicative en base 3 est 1.

(b) Si N ne comporte que des 1, sa persistance multiplicative en base 3 est 1.

(c) Si $N = 2^1, 2^2, 2^3, 2^4$ ou 2^{15} , le calcul donne pour la persistance p (les indices désignent la base de numération utilisée) :

$2^1 = 2$, $p = 0$; $2^2 = 12_3 \rightarrow 2$, $p = 1$; $2^3 = 22_3 \rightarrow 41_3 \rightarrow 1$, $p = 2$; $2^4 = 121_3 \rightarrow 2$, $p = 1$; $2^{15} = 221122221_3 \rightarrow 1012_3 \rightarrow 0$, $p = 2$.

(d) Si N comporte uniquement des 1 et des 2 avec 1, 2, 3, 4 ou 15 fois le 2, on est ramené en une étape au cas (c). La persistance est alors 1, 2, 3, 2, 3 selon le cas. Par exemple, $1121122_3 \rightarrow 22_3 \rightarrow 11_3 \rightarrow 1$.

(e) Si N ne comporte que des 1 et des 2

et que le nombre de 2 n'est pas 1, 2, 3, 4 ou 15, alors (sous réserve de la conjecture concernant les puissances de 2) la persistance est 2, puisque N donne un nombre comportant un 0, qui donne 0 à l'étape de calcul suivante.

La persistance multiplicative maximale en base 3 serait donc 3, et le plus petit nombre ayant cette persistance serait $26_{10} = 2 \times 3^2 + 2 \times 3 + 2$ qui, en base 3, donne la suite multiplicative $26 = 22_3 \rightarrow 22_3 \rightarrow 11_3 \rightarrow 1$.

Des propriétés sont connues pour les autres bases, mais aucune n'élucide la question de la persistance maximale.

Des bases à pas variable

Les bases de numération à pas variable conduisent à des cas où le problème de la persistance multiplicative est complètement résolu : enfin, un bon lampadaire !

En base 10, la suite de chiffres 322201 représente le nombre :

$3 \times 10^5 + 2 \times 10^4 + 2 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 0 \times 10 + 1$. Dans la base à pas variable $B = (b_1, b_2, \dots, b_n, \dots)$, 322201 représente l'entier :

$3 \times b_5 \times b_4 \times b_3 \times b_2 \times b_1 + 2 \times b_4 \times b_3 \times b_2 \times b_1 + 2 \times b_3 \times b_2 \times b_1 + 2 \times b_2 \times b_1 + 0 \times b_1 + 1$.

Si chaque b_i est supérieur ou égal à 2, tout entier a au moins une écriture en base B . Si, de plus, on impose au chiffre placé en i -ème position à partir de la droite d'être strictement inférieur à b_i , l'écriture en base B d'un entier est unique. On impose donc cette condition aux chiffres d'un nombre écrit en base B .

Les bases à pas variable sont la généralisation naturelle de la notion de base de numération à pas constant. Elles permettent en particulier de rendre compte simplement des systèmes de mesure inégaux : 1 écu = 3 livres ; 1 livre = 20 sous ; 1 sou = 12 deniers.

La base de numération « factorielle » est particulièrement prisée des mathématiciens ; elle consiste à prendre $b_i = i + 1$. Ainsi, en base factorielle, le nombre s'écrivant 322201_F (l'indice F signifie qu'il s'agit de l'écriture en base factorielle) vaut : $3 \times 6! + 2 \times 5! + 2 \times 4! + 2 \times 3! + 0 \times 2! + 1 = 3 \times 720 + 2 \times 120 + 2 \times 24 + 2 \times 6 + 0 \times 2 + 1 = 2461_{10}$.

Bien évidemment, la notion de persistance a un sens en base factorielle : pour passer d'un entier N au suivant dans la suite multiplicative, on fait le produit des chiffres de son écriture en base factorielle, et on écrit le résultat en base factorielle. La conjecture généralisée de la persistance en base factorielle est bien évidemment qu'il existe une persistance maximale p_{Fmax} .

M. Diamond et Daniel Reidpath ont montré que cette conjecture en base factorielle est fautive. Leur méthode vaut aussi pour la « persistance à la Erdős » (on ne multiplie que les chiffres non nuls), qui, en base factorielle, est elle aussi résolue par la négative.

Voici le raisonnement de M. Diamond et D. Reidpath. En base 10, les chiffres utilisables sont 0, 1, ..., 9. En base factorielle, les chiffres utilisables pour le n -ième chiffre à partir de la droite sont les nombres de 0 à n (le chiffre le plus à droite est un 0 ou un 1, à côté c'est un 0, un 1 ou un 2, etc.).

De cette remarque, il s'ensuit que tout nombre N a un antécédent M (un nombre M dont le produit des chiffres de l'écriture en base factorielle est N) ne comportant aucun 0. C'est le nombre $M = N11...1_F$ avec $N - 1$ fois le 1, qui est bien une écriture correcte d'un nombre dans la base factorielle, puisque son N -ième chiffre à partir de la droite est compris entre 0 et N . Si tout nombre a un antécédent, il ne peut avoir de maximum à la persistance en base factorielle : on part de $A_1 = 11_F = 3_{10}$ (dont la persistance est 1), on considère son antécédent $A_2 = 311_F$, puis l'antécédent A_3 de A_2 , etc. Par construction, le nombre A_N possède la persistance N . Il n'y a pas de persistance maximale.

En fait, la méthode décrite fonctionne pour toutes les bases à pas variable où les pas b_i ne sont pas bornés. Cela suggère une nouvelle et dernière conjecture (plus difficile que toutes les autres !) que je propose ici pour la première fois :

— Pour toute base à pas variable dont les b_i sont bornés par une constante, la persistance multiplicative (simple ou à la Erdős) est elle aussi bornée.

Il est peu probable que nous soyons là sous un lampadaire !

L'AUTEUR



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

BIBLIOGRAPHIE

Persistence of a number, Wikipedia, 2013 : http://en.wikipedia.org/wiki/Persistence_of_a_number

E. Weisstein, Multiplicative Persistence, 2013 : <http://mathworld.wolfram.com/MultiplicativePersistence.html>

J. Rivera, Problems & Puzzles, www.primepuzzles.net/puzzles/puzz_022.htm et www.primepuzzles.net/puzzles/puzz_341.htm

N. Sloane, The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences, 2013 : <http://oeis.org/search?q=persistence&language=french&go=Chercher>

M. R. Diamond, Multiplicative persistence base 10 : some new null results, 2011 : www.markdiamond.com.au/download/10pus-3-1-1.pdf

A. Bellos, Here's Looking at Euclid : A Surprising Excursion through the Astonishing World of Math, Free Press, 2010 [p. 126].

M. R. Diamond et D. Reidpath, A counterexample to a conjecture of Sloane and Erdős, J. Recreational Math., vol. 29(2), pp. 89-92, 1998.

SCIENCE & FICTION

Armures à toute épreuve

Les armures qui protègent les héros de science-fiction sont inspirées des carapaces et autres protections dont sont équipées diverses espèces, tant animales que végétales.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCO

Les armures de la science-fiction sont nombreuses et rivalisent d'ingéniosité ; de l'armure d'Iron Man à la combinaison pare-balles de Batman, en passant par les carapaces d'insectes géants, elles sont souvent inspirées de structures naturelles ou des dernières innovations techniques. À quoi servent-elles ? Protègent-elles parfaitement ceux qui les portent ?

La fonction première d'une armure ou d'une carapace est de protéger contre les coups portés par un éventuel agresseur. Que ce soit une armure ou un gilet pare-balles, ils servent à dissiper l'essentiel de l'énergie d'un choc dû à une épée ou une balle, de sorte que l'impact ne cause pas de graves dégâts. Cela implique bien sûr des contraintes de composition et de poids : l'armure métallique d'Iron Man, par exemple, arrête les balles, mais doit, par conséquent, être épaisse.

Sachant qu'une balle tirée à bonne distance peut s'enfoncer de plusieurs centimètres dans le métal, protéger ne serait-ce que le torse de Tony Stark, son porteur, nécessiterait de porter une plaque métallique pesant plus de 100 kilogrammes ! On comprend mieux pourquoi Iron Man a une armure motorisée. Notons que cette armure n'est pas constituée de fer, contrairement à ce que suggère le nom du superhéros, mais qu'elle est faite d'un alliage métallique dont seul Stark a le secret. Son prototype fut confectionné en secret, au fond d'une prison et à partir de métaux recyclés.

Le concepteur d'Iron Man s'est-il inspiré d'une espèce naturelle ? Ce recyclage d'armure évoque le bernard-l'hermite, crustacé qui s'abrite dans des coquilles de mollusques



1. LA CARAPACE D'IRON MAN est constituée de plaques d'un alliage dont seul le héros a le secret. C'est une armure articulée et même motorisée étant donné son poids !

abandonnées par leurs précédents locataires. Dans le monde vivant, les carapaces, armures et autres coquilles sont variées. Sélectionnées par les mécanismes de l'évolution, elles protègent leurs occupants contre les dents, griffes ou pinces des éventuels prédateurs. Si elle recouvre tout le corps, l'armure est souvent articulée pour assurer une certaine mobilité. Mais les articulations deviennent rapidement des points faibles : c'est ce que les fourmis attaquent en premier lorsqu'un insecte plus gros s'aventure trop près de la fourmilière.

Carapace articulée ou d'un seul bloc ?

Les arthropodes (insectes, mais aussi crustacés, araignées, scorpions, etc.) portent une carapace qui a beaucoup inspiré la science-fiction au cinéma, de *Starship Troopers* à *District 9*. Elle est composée de chitine, dont il faut souligner que c'est le polymère le plus produit dans le monde vivant après la cellulose. Cette carapace, dérivée du squelette externe, ou exosquelette, est constituée de plaques articulées, stratégie de défense passive qui se retrouve aussi chez de nombreux vertébrés, des « poissons » cuirassés du Paléozoïque (les placodermes) aux tatous ou pangolins actuels, en passant par les dinosaures stégosaures ou ankylosaures, par exemple.

Chez ces animaux, les plaques osseuses qualifiées d'ostéodermes se forment dans le derme et sont composées de carbonate de calcium et de kératine. Mais comme le montrent certaines tortues, toutes les carapaces ne sont pas forcément articulées : elles



2. L'ARMURE DES AMMONITES, des céphalopodes fossiles cousins du Nautilé, présentait des cloisons intérieures qui permettaient vraisemblablement à l'animal de résister à la pression régnant aux grandes profondeurs.

peuvent aussi protéger le corps en formant un seul bloc. La stratégie de la « formation de la tortue » était d'ailleurs pratiquée par des légionnaires romains qui se regroupaient sous leurs boucliers. En science-fiction, le crâne de Predator présente une sorte de casque ressemblant à une carapace de tortue. Dans *Heroic Fantasy*, les meilleures armures et boucliers sont faits d'écailles de dragon qui ressemblent à des ostéodermes.

En termes de résistance aux chocs et autres agressions extérieures (jet d'acides, chute de pierres, etc.), les plantes supplantent les animaux. La coque de certains fruits ou graines est composée de lignine, autre polymère ultrarésistant : broyée, elle est utilisée comme abrasif en aéronautique et entre même dans la composition de résines ignifuges qui protègent les navettes spatiales. Mieux encore, les spores et pollens, transportés sur de très longues distances, ainsi que certaines algues, sont dotés d'une paroi de sporopollénine : ce composé organique (un corps gras dont on ignore encore la composition exacte) résiste à la chaleur, au froid, à la pression et à la plupart des attaques chimiques ! La carapace d'Alien, qui contient un « sang » jaunâtre hypercorrosif, est-elle faite de sporopollénine ?

En matière de dureté (mais aussi de fragilité), la silice (qui compose le verre)

est utilisée, tant chez les éponges pour leur squelette interne (des aiguilles nommées spicules) que chez des algues (les diatomées), pour leur paroi externe. Si la nature et la composition des armures varient selon les espèces et les milieux, les techniques de construction sont elles aussi hétéroclites : secrétées par l'organisme ou « maçonnées » par les larves des phryganes, des insectes, les arthropodes construisent de petits fourreaux de boue dans lesquels elles se métamorphosent), certaines protections sont extraites de l'environnement (plusieurs ethnies africaines ont utilisé de la peau de rhinocéros pour en faire des boucliers).

Résister à la pression, au chaud, au froid... à tout !

Une solution pour se protéger consiste aussi à changer de forme. C'est ce que font de nombreux champignons, animaux et plantes qui s'enkystent : lorsque les conditions de vie deviennent trop difficiles, ces organismes s'entourent d'une coque résistante, leurs fonctions vitales s'arrêtent et ils entrent dans un état de dormance – la cryptobiose. C'est le cas des tardigrades, de microscopiques « oursons d'eau » cousins des arthropodes, qui sont capables de supporter des conditions

extrêmes de température, de pression, de rayonnement ou de toxicité. Ils survivent même à une exposition au vide spatial ! Les artémies sont des crustacés également connus pour leurs kystes, capables de résister à ces conditions extrêmes pendant plusieurs années. Quand les conditions de vie redeviennent favorables, ces arthropodes se transforment en petites larves et reviennent à la vie.

Ainsi, totale, partielle ou temporaire, l'armure idéale consiste en un compromis entre poids, résistance et souplesse. La combinaison de Spiderman intègre-t-elle de la soie d'araignée élastique et robuste ? Celle de Batman est-elle, comme les gilets pare-balles, formée d'une couche de céramique enveloppant un tissage de fibres synthétiques de type kevlar ? Cette couche externe très résistante ralentit les balles qui finissent leur course dans la toile de fibres imbriquées, le poids ne dépassant pas huit kilogrammes. Encore plus efficace que l'armure d'Iron Man !

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

ART & SCIENCE

L'art quantique se tisse

Comment rendre compte de l'étrange réalité du monde quantique ? Un physicien devenu sculpteur répond avec plusieurs œuvres, notamment une série illustrant le spin des particules.

Loïc MANGIN

En 1999, l'équipe d'Anton Zeilinger, de l'Université de Vienne, met en évidence des figures d'interférences obtenues avec de grosses molécules, des fullerènes C_{60} . C'est, à cette époque, le plus gros objet présentant une dualité onde-corpuscule, propriété initialement attribuée aux photons, puis étendue à la matière par Louis de Broglie. Jusqu'aux travaux du groupe autrichien, seuls les électrons, les atomes d'hydrogène et de toutes petites molécules avaient montré ce comportement quantique. Le record est détenu depuis 2012 par la molécule $C_{48}H_{26}F_{24}N_8O_8$, un dérivé de la phtalocyanine (un colorant bleu-vert synthétique).

Julian Voss-Andreae était l'un des auteurs de cette percée. Il a depuis quitté les laboratoires pour se tourner vers la sculpture et s'est installé aux États-Unis. Il est aujourd'hui sollicité par de nombreuses institutions. Par exemple, deux projets sont en cours, l'un pour le nouveau bâtiment de physique et de nanotechnologie de l'Université du Minnesota, à Minneapolis, l'autre à l'Université Rutgers, dans le New Jersey.

En 2009, il a organisé l'exposition *Quantum objects* au Centre américain pour la physique, à College Park, dans le Maryland. L'idée sous-jacente était que « l'art est plus approprié que la science pour donner à voir certaines facettes de la réalité. » On pouvait notamment y voir *Quantum Corral*, une sculpture en bois représentant la densité d'électrons autour d'un anneau d'atomes de fer déposés sur une surface en cuivre.

Attardons-nous sur une œuvre, la série *Spin family* (voir la figure a).

Ces objets ont été conçus pour illustrer la notion de spin, une propriété quantique des particules. Le spin a été proposé en 1924 par Wolfgang Pauli, à propos de l'électron, pour expliquer un résultat expérimental, l'effet Zeeman anormal, qui décrit l'influence des champs magnétiques sur la lumière émise par les atomes.

Le spin correspond au moment cinétique intrinsèque d'une particule. Il ne s'agit pas de la proprement parler d'une rotation : le spin est une propriété purement quantique qui n'a pas d'équivalent en physique classique.

Les sculptures de *Spin family* illustrent les deux grandes familles de particules élémentaires, les fermions et les bosons, qui se distinguent par les valeurs du spin. J. Voss-Andreae met en parallèle cette distinction avec celle qui sépare les deux genres (masculin et féminin) en utilisant deux couleurs.

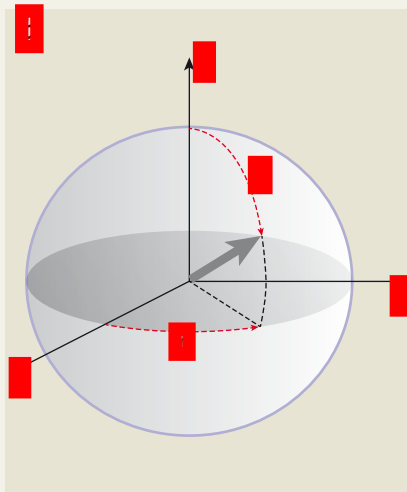
Les fermions, en bleu, sont les constituants de la matière : ce sont les leptons (l'électron, le muon, le neutrino...), ainsi que les six quarks (u, d, s, c, b et t). Seuls les seconds sont soumis à l'interaction forte, l'une des quatre forces fondamentales de la nature. Les fermions ont un spin demi-entier ($1/2, 3/2, 5/2$), par exemple $1/2$ pour l'électron.

Les bosons, en rose, sont les vecteurs des forces fondamentales. On connaît le photon, les gluons, les bosons Z , W^- et W^+ , ainsi que le boson de Higgs, dont l'existence a été confirmée en juillet 2012. Le spin d'un



Le boson est un entier $\{0, 1, 2, \dots\}$. Par exemple, le boson de Higgs a un spin égal à zéro.

Comment représenter un spin ? En projection sur un axe donné, un spin J ne peut prendre que les $2J + 1$ valeurs $-J, -J + 1, \dots, J - 1, J$. Cela correspond à certaines orientations, que l'on peut figurer sur une sphère dite de Bloch (voir la figure b, où les angles θ et φ définissent l'orientation). S'en inspirant, J. Voss-Andreae a tissé un fil de soie bleu ou rose sur une structure à cercles. Les cônes ainsi formés illustrent les états possibles d'un spin donné. Les objets roses (les bosons) ont un disque plan, qui correspond à une projection de spin égale à zéro, alors que les objets bleus (les fermions) en sont dépourvus.



Qu'en est-il de l'attribution des sexes ? Deux fermions identiques ne peuvent coexister dans le même état quantique, car ils sont soumis au principe d'exclusion de Pauli. Ces particules, « rivales pour une même place », seraient donc masculines. La distinction entre deux sexes serait-elle d'origine quantique ?

Les paradoxes de la matière,
Dossier Pour la Science, n° 79, avril-juin 2013.
J. Voss-Andreae, Quantum sculpture : art inspired by the deeper nature of reality,
Leonardo, vol. 44(1), pp. 14-20, 2011.
P. Ball, Quantum objects on show, Nature,
vol. 426, p. 416, 2009.
M. Arndt et al., Wave-particle duality of molecules, Nature, vol. 401, pp. 680-682, 1999.
www.JulianVossAndreae.com



Spin 1/2

Spin 2

Spin 5/2

IDÉES DE PHYSIQUE

Des bateaux qui décollent

Pour faire gagner de la vitesse à un bateau, il suffit de faire sortir sa coque hors de l'eau : c'est le rôle des hydrofoils.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Quel est le point commun des voiliers titulaires de records de vitesse comme l'*Hydroptère* (95 kilomètres par heure) ou le *Prestas Sailrocket 2* (109 kilomètres par heure) ? À pleine vitesse, l'essentiel de leur coque est hors de l'eau !

Les concepteurs de bateaux rapides se sont en effet rendu compte que si la coque est, au repos, indispensable pour flotter (grâce à la poussée d'Archimède), elle devient une gêne à grande vitesse à cause de sa traînée hydrodynamique. S'inspirant alors des techniques aéronautiques, ils ont conçu des bateaux qui se soulèvent hors de l'eau en gagnant de la vitesse, sustentés par des sortes d'ailerons immergées : les hydrofoils.

L'étrave d'un navire qui avance déplace de l'eau et crée des vagues. En s'éloignant, ces dernières emportent avec elles de l'énergie fournie par le navire et, finalement, la dissipent dans le vaste océan. Elles constituent la première source de freinage.

L'origine de la vague principale créée par le bateau est visible le long de la coque : à l'avant du navire, l'eau, chassée par l'étrave, s'élève plus haut que la surface libre (voir la figure 1a). Cette surélévation se prolonge ensuite en ondulations successives le long de la coque du bateau.

Avancer dans l'eau plutôt que sur l'eau

Plus le bateau avance vite, plus cette vague grossit en amplitude (sa hauteur) et en longueur d'onde (la distance entre deux crêtes consécutives). On s'aperçoit que cette vague devient un obstacle presque infranchissable lorsque sa longueur d'onde est comparable à la taille du bateau : ce dernier atteint alors sa vitesse limite.

Comment voguer plus vite ? En réduisant le freinage par les vagues. C'est possible avec une coque très effilée, qui fend l'eau, comme celle des bateaux conçus pour les courses d'aviron. Cette coque est instable

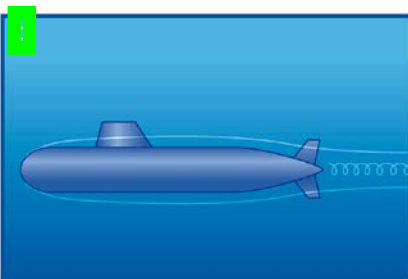
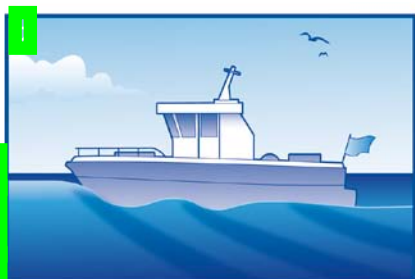
latéralement, mais en reliant deux coques de ce type, on réalise un catamaran, structure stable bien adaptée à la voile. Malgré cela, le volume immergé de l'étrave reste important, car il faut bien compenser par la poussée d'Archimède le poids toujours considérable du voilier et de son équipage.

On peut aussi tenter d'éviter la création d'une vague. Pour cela, il faut aller sous l'eau. Un sous-marin en plongée, par exemple, ne crée pas de vagues : la résistance au mouvement provient des turbulences qu'il produit et des frottements visqueux le long de sa surface (voir la figure 1b).

Comme cette résistance n'a pas le caractère infranchissable du « mur de la vague », on a tout intérêt à placer sous l'eau, et non à sa surface, les structures nécessaires à la sustentation du navire. Et plutôt que d'immerger de gros flotteurs qui engendrent la poussée d'Archimède adéquate, utilisons la force de portance s'exerçant sur des sortes d'ailerons immergés et convenablement orientés. Autrement dit, au lieu d'un dirigeable, choisissons l'avion ! C'est l'idée des hydrofoils, inventés et testés par l'ingénieur italien Enrico Forlanini en 1906 sur le lac Majeur (68 kilomètres par heure tout de même).

Des foils immergés en T..

On ajoute ainsi sous le bateau des appendices verticaux qui se terminent par les foils, éléments plats ayant la forme et le profil d'une aile d'avion. À l'arrêt, rien ne distingue un tel bateau d'un autre : il flotte grâce à sa coque. En revanche, dès qu'il gagne de la



1. L'AVANCEE D'UN BATEAU SUR L'EAU CREE DES VAGUES, notamment une à l'avant qu'il doit continuellement « graver » (a). Ces vagues emportent de l'énergie et freinent le bateau. Pour un sous-marin en plongée (b), il n'y a pas de vagues ; ce sont les turbulences créées à l'arrière et les frottements visqueux entre le liquide et la surface du vaisseau qui freinent ce dernier.



2. LES KAYAKS A FOILS, OU FLYAKS, sont bien plus rapides que les kayaks classiques. Grâce à la portance exercée sur les ailettes des foils en T, la coque se soulève hors de l'eau, ce qui réduit considérablement la traînée hydrodynamique.



3. LES CATAMARANS DU TYPE HYDROPTÈRE sont équipés de foils inclinés à 45 degrés et qui traversent la surface de l'eau. La portance varie avec la profondeur d'immersion et l'inclinaison du bateau, de telle sorte que la stabilité verticale et latérale est assurée d'emblée.

à vitesse, l'écoulement de l'eau autour du foil crée une force de portance dirigée vers le haut. La coque se soulève progressivement et sort entièrement de l'eau à partir d'une certaine vitesse (voir la figure 2).

Dans cette situation, seules les tiges profilées qui relient la coque au foil traversent la surface de l'eau ; les vagues sont quasiment supprimées et la surface au contact de l'eau considérablement réduite. Il ne subsiste que la force de traînée, à laquelle est soumise toute aile. Cette force étant bien plus faible que la traînée d'une coque partiellement immergée, le bateau avance plus vite, à force propulsive égale.

Ce dispositif a récemment été utilisé avec un kayak pour en faire un « flyak », c'est-à-dire un kayak à foils. Deux petits foils situés sous la coque, à l'avant et à l'arrière, soulèvent l'embarcation dès que sa vitesse dépasse 10 kilomètres par heure et lui permettent d'atteindre près de 30 kilomètres par heure, allure qui a suffi pour battre le K4 de l'équipe nationale norvégienne en 2006 ! Notons par ailleurs que le foil est plus efficace qu'un patin ou qu'un ski glissant à la surface de l'eau : un ski ou un patin font des vagues et ont, en outre, une surface bien plus importante que le foil. D'ailleurs, des skis nautiques, surfs ou planches à voile munis de foils ont été réalisés et testés avec succès.

Ce type de foils en T reste toutefois délicat à mettre en œuvre, car il déstabilise les embarcations. La difficulté est d'abord d'assurer une stabilisation en hauteur. Si la portance des ailettes devient supérieure au poids, le bateau monte jusqu'à ce que les foils arrivent à la surface de l'eau. À ce stade, ils ne peuvent alors plus fonctionner comme des ailes, à cause des turbulences provoquées à l'interface eau-air devenue trop proche : les foils perdent de l'efficacité et de la portance, et le bateau redescend brusquement. Il y a par ailleurs des problèmes de stabilité latérale, avec le risque que le bateau verse sur le côté. Il faut donc lui associer une stabilisation active, qui peut être assurée par le pagayeur du flyak ou par des moteurs ajustant l'inclinaison des foils.

...ou des foils traversants en V

Il existe cependant une meilleure idée : celle des foils en V et traversant la surface de l'eau. C'est la solution retenue pour le voilier *Hydroptère* développé par le navigateur français Alain Thébault. Sa structure est celle d'un catamaran. Les deux foils principaux, fixés chacun à l'un des deux flotteurs, sont des surfaces profilées descendant sous l'eau et inclinées à 45 degrés en direction de l'axe central du bateau (voir la figure 3).

LES AUTEURS



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

www.bouillascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

J. Vellinga,
Hydrofoils : Design, Build, Fly,
Peacock Hill Publishing, 2009

Lorsque le bateau commence à prendre de la vitesse, la somme des portances des deux foils est verticale et devient supérieure au poids. Le navire s'élève et, ce faisant, les foils émergent progressivement. La portance diminue alors jusqu'à ce qu'elle équilibre exactement le poids. La stabilité latérale est aussi garantie : si le navire s'incline, le foil du côté le plus bas sera plus enfoncé et sera plus horizontal que l'autre, d'où une force de portance plus importante et un couple ramenant le navire à l'horizontale.

Le prix à payer est une forte augmentation des contraintes mécaniques. La mise au point de l'*Hydroptère* a demandé de nombreuses années et les compétences de spécialistes des matériaux issus de l'aéronautique, notamment avec des amortisseurs conçus par Airbus. Même si la surface portante traverse l'interface air-eau, la diminu-

tion de la traînée reste très importante, car les vagues créées demeurent modestes. Cela permettra-t-il à l'*Hydroptère*, barré par Jean Le Cam et Yves Parlier, de battre cet été le record de la *Transpacifique* entre Los Angeles et Honolulu ?

En attendant, les concepteurs des catamarans AC72 qui vont participer à la prochaine *America's Cup*, en septembre 2013, ne s'y sont pas trompés. Un certain nombre de contraintes avaient été mises au règlement de cette course pour empêcher l'utilisation d'hydrofoils. Mais les concepteurs ont réussi à les contourner en modifiant la forme des dérives, par exemple en S, ce qui leur confère une force de portance. Ils ont ainsi pu faire déjauger complètement leurs navires – au prix d'une plus grande instabilité, qui a déjà causé deux accidents spectaculaires et la mort d'un équipier.

Offrez ou offrez-vous le livre *Les sens trompés*



Cet ouvrage est un recueil des articles que le neurologue Patrick Verstichel a publiés dans la rubrique « Le cas clinique » du magazine *Cerveau & Psycho*. En tant que médecin clinicien, il est confronté à des personnes qui présentent des symptômes inquiétants, surprenants, souvent inexpliqués. Après un examen clinique minutieux et les indispensables scanners IRM, il pose son diagnostic et propose une prise en charge adaptée.

Patrick Verstichel mène ses enquêtes médicales et scientifiques avec perspicacité. En nous présentant ces patients et leurs maladies sous forme de petites histoires, il nous fait comprendre comment fonctionne le cerveau, et pourquoi, parfois, il dysfonctionne. Un voyage étonnant au cœur du cerveau !

60 pages • 25 euros • ISBN 978-2-84245-111-1

Disponible en librairie ou sur www.cerveauetpsycho.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Devoirs de vacances

Si la matière enseignée est appétissante, les « devoirs » sont des plaisirs. Profitons de l'été pour explorer les précisions culinaires.

Hervé THIS



Au cours des « séminaires de gastronomie moléculaire », ouverts au public depuis plus de dix ans, nous explorons expérimentalement les précisions culinaires, c'est-à-dire les dictons, on-dit, trucs, astuces, proverbes, maximes... relatifs à la cuisine.

Les précisions se comptent par dizaines de milliers, rien que pour la cuisine française, et, comme beaucoup sont fausses, il semble utile de ne pas les transmettre à nos successeurs sans examen critique. Des expérimentations sont nécessaires.

Lors des derniers séminaires, nous avons ainsi considéré les bouillons, les simples bouillons de bœuf, pour lesquels les questions abondent. Par exemple, nous avons comparé des bouillons qui étaient écumés et des bouillons qui étaient portés à ébullition sans soin particulier. La question s'impose, parce que, dans les restaurants du monde entier, la première chose que font les cuisiniers, le matin en arrivant au travail, est de mettre de la viande dans de l'eau et de chauffer doucement, afin de produire les bouillons qui serviront à « mouiller » les mets (l'eau est rarement utilisée par les professionnels : elle n'a pas beaucoup de goût).

Or les bouillons troubles sont comme les coulures sur le travail d'un peintre en bâtiment : le signe d'un travail médiocre ; de sorte que l'on voit des cuisiniers, armés d'une louche, qui passent de très longs moments à écumer, à retirer patiemment les matières qui flottent à la surface des bouillons, afin d'obtenir des bouillons clairs.

L'opération est-elle efficace ? Nous avons testé la pratique, en comparant des bouillons préparés à partir de la même casserole, de la même eau, de la même viande, chauffés de la même façon, avec un seul paramètre modifié : le fait que l'on écume ou non. Et nous avons vérifié qu'il y a un effet, mais un effet insuffisant : les bouillons écumés soigneusement sont plus clairs que des bouillons non écumés, mais ils restent légèrement turbides.

Dans un autre séminaire, nous avons voulu savoir si la nature de l'eau changeait le goût des bouillons. Cette fois, nous avons comparé quatre eaux : l'eau du robinet, l'eau de Volvic, l'eau de Vittel, l'eau Cristalline.

Pour commencer, nous avons organisé un « test triangulaire » pour savoir si les eaux étaient distinguées par les dégustateurs. On donne à ces derniers trois verres dont deux contiennent une même eau, et le troisième une autre eau. Les verres sont rendus anonymes, donnés dans un ordre tiré au hasard, et l'on demande aux dégustateurs quels sont les deux verres qui contiennent la même eau. Deux participants n'ont pas été capables de distinguer les eaux, mais les trois autres ont parfaitement reconnu les eaux différentes et ils étaient même capables de décrire les différences.

Revenons à nos bouillons préparés dans les mêmes conditions, mais avec des eaux différentes. On obtient le même type de résultat : la nature de l'eau détermine la qualité du bouillon. Non pas que certains bouillons soient « meilleurs » que d'autres, puisque le « bon », le « meilleur », est une question personnelle...

A propos de ce simple bouillon, de nombreuses questions demeurent, que les participants des séminaires ont décidé d'étudier pendant l'été. Ainsi, des bouillons faits à partir d'un seul gros morceau ou à partir d'un morceau finement divisé ont-ils des goûts différents ?

De telles questions étant peu appropriées aux chaleurs estivales, nous avons proposé des tests plus de saison. Par exemple, quand on ébouillante des pêches (avant de les mettre dans l'eau glacée pour les refroidir avant de les peler), puis qu'on les poche dans un sirop pendant une dizaine de minutes, un papier sulfurisé posé au-dessus de la casserole prévient-il le noircissement des fruits, certains auteurs recommandant cette procédure ? Autre exemple : une feuille de figuier ajoutée à une daube accélère-t-elle la cuisson, attendrissant la viande ?

Dans ces deux cas, on pourrait chercher des explications... mais ne vaut-il pas mieux faire les tests ? Des devoirs de vacances sont ainsi transformés en plaisirs de vacances, une façon d'éviter que les vacances n'aient la même étymologie que « vacuité ».



Hervé THIS est physico-chimiste dans le Groupe INRA de la gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de l'Ifstis sur

www.bouillonscience.fr

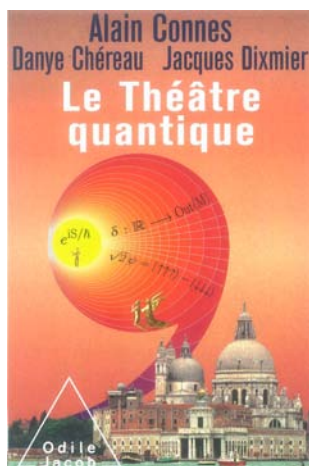


→ SCIENCE & LITTÉRATURE

Le Théâtre quantique

Alain Connes, Danye Chéreau
et Jacques Dixmier

Odile Jacob, 2013
[214 pages, 20,90 euros]



Dans ce livre, la mécanique quantique accomplit mieux qu'un crime parfait : un assassinat sans mort. Et si vous ne comprenez pas le concept de l'« assassinat sans mort », vous êtes sur la bonne voie, puisque, depuis Feynman, chacun sait que si vous croyez comprendre la mécanique quantique, c'est que vous ne la comprenez pas». Donc, si vous croyez ne pas la comprendre, c'est que...

L'auteur principal, le mathématicien Alain Connes, met en scène sa réflexion sur l'émergence du temps quand on passe du niveau quantique au niveau macroscopique : elle est causée par le caractère non commutatif des opérateurs représentant les grandeurs physiques. Le livre, au style vif et sans apprêt, est une espèce d'expérience de pensée ludique, menée avec plus d'âpreté que de développements scientifiques...

Le cadre de l'histoire ne surprend pas : ce sont les lieux fréquentés par les chercheurs de premier plan. Le CERN à Genève, l'IHES à Bures-sur-Yvette. La mécanique quantique préoccupe les personnages au point de s'introduire dans leurs propos d'alcôve. La seule scène chaude du livre est la seule où il y a des équations... Les allusions culturelles, explicites ou en clin d'œil, abondent, de Giorgione et Monteverdi à Maurizio Cattelan, en passant par un certain Albert Gomme, abbé de son état (l'abbé Gomme, vous y êtes ?). Ce dernier a laissé un gros héritage à l'héroïne, Charlotte Dempierre. Le lecteur s'attend à un montant de cinq cents

millions mais – souci d'originalité ou de vraisemblance ? – les auteurs précisent qu'il est de douze millions d'euros.

Bref, auteurs, lecteurs, personnages, nous sommes entre gens bien. Et c'est dans ce milieu distingué que se produit un meurtre. Meurtre d'autant plus navrant que la victime est Charlotte Dempierre, jeune physicienne brillante et l'avenir prometteur, riche depuis son héritage, et si belle qu'elle n'a que l'embarras du choix de ses amants. On la retrouve morte au CERN, dans le LHC (*Large Hadron Collider*). Le policier venu enquêter est condamné à échouer : les « cerveaux élargis » qu'il interroge ne lui répondent pas, car il ne comprendrait pas. Le lecteur connaît pourtant le fin mot de l'affaire, dans lequel interviennent les paradoxes de la mécanique quantique et la simulation des fonctions cérébrales. Toutefois, l'usage interdit que l'on révèle la solution d'une énigme policière à qui n'a pas lu le livre. Usage heureux, en l'occurrence, étant donné que l'intrigue est « une voie d'accès rapide à la mécanique quantique ». Toutefois, si je me hasardais à la résumer, la mécanique quantique n'y retrouverait plus ses petits !

Didier Nordot

→ MATHÉMATIQUES

Les mathématiques du vivant

Ian Stewart

Flammarion, 2013
[474 pages, 22 euros]

Ce livre illustre une nouvelle fois tout le talent d'Ian Stewart pour le difficile exercice qu'est la vulgarisation. Sa force est de ne pas cliver le grand public et les scientifiques, comme s'il y avait deux catégories de science, avec des exigences et des enthousiasmes différents. En ce sens, le sous-titre accrocheur ne rend pas justice à ce livre, qui séduira tout autant le professionnel que l'amateur de par sa présentation accessible mais substantielle des applications des mathématiques à la biologie des 50 dernières années.

Souvent, les modèles que l'auteur qualifie de « mathématiques » pourraient autant être qualifiés de physiques, par exemple les équations de réaction-diffusion rendant compte de la formation de motifs, le paysage énergétique expliquant le repliement d'une protéine ou les modèles de champs décrivant la propagation d'ondes dans le cortex visuel. À la différence de la physique, les mathématiques ne sont pas contraintes par le réel. L'étape de modélisation relève ainsi davantage de la physique, surtout lorsqu'il s'agit d'intégrer les différents niveaux d'organisation et les différentes échelles d'un organisme. La difficulté majeure face à la complexité des systèmes biologiques est d'abord de formaliser la question. C'est seulement ensuite que vient l'analyse mathématique.

Toutefois, établir une délimitation n'est guère intéressant, car tous les concepts et outils théoriques méritent d'être convo-

qués s'ils aident à répondre aux questions biologiques. Beaucoup d'exemples détaillés par l'auteur relèvent ainsi de domaines hybrides entre mathématiques et physique, telle la mécanique céleste, les systèmes dynamiques ou la science des réseaux. Ce livre est ainsi un plaidoyer pour une biologie théorique, qu'elle s'appuie sur les mathématiques, la physique, l'informatique ou une conjonction de méthodes et de concepts à inventer, par-delà les disciplines d'aujourd'hui.

L'auteur précise le rôle des mathématiques dans cette approche interdisciplinaire du vivant. Les mathématiques ne se réduisent pas au calcul et aux statistiques : elles sont aussi affaire de logique, de structures, de géométrie, de symétries. Il faut lire la préface : tout est posé, tout est dit. L'idée me paraît réellement révolutionnaire, dépassant largement l'utilisation ponctuelle de notions et outils mathématiques pour décrire tel ou tel aspect d'un système biologique. Après avoir compris en physique les symétries associées aux lois de conservation, la géométrie des évolutions chaotiques, l'émergence de comportements macroscopiques simples découlant de la loi des grands nombres, ou l'omniprésence



les distributions gaussiennes découlant du théorème limite central des probabilités, il s'agit maintenant de comprendre les structures mathématiques et les contraintes logiques du vivant, en particulier celles découlant de l'évolution par sélection naturelle. Ce livre lance un formidable défi aux mathématiciens!

→ **Annick Lesne**
CNRS, Paris

→ ARCHEOLOGIE

Les armes dans les eaux

Alain Testart
France, 2013
400 pages, 49 euros

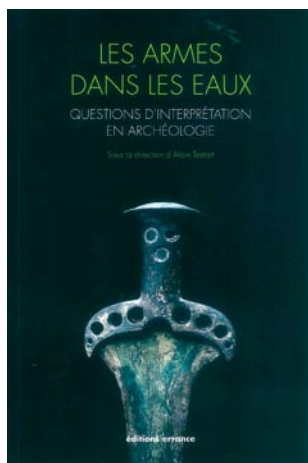
Rédigé par divers savants, ce pavé *a priori* austère et disparate répond pourtant à une bonne question : qu'en faisaient faire sous l'eau les armes que les archéologues y trouvent ?

En effet, des rivières, des lacs et des marais en ont livré en quantité, et elles datent d'une période qui va du Néolithique à la fin de l'Antiquité. En France, ce sont surtout les gués de la Saône, en particulier à hauteur de Chalon, qui ont été explorés, mais pas uniquement. En plus, des épées dites « sacrifiées » ont été retrouvées : pliées en trois ou quatre, devenues inutilisables, elles auraient, dit-on, été rendues aux dieux par les humains pour servir d'offrandes. Il est certes tentant de tout ramener à la religion : ces armes auraient été déposées là à l'intention des divinités des eaux ; mais cette explication ne paraît pas satisfaisante ; elle suppose que les dieux concernés étaient à la fois dieux des eaux et dieux des armes. C'est beaucoup à la fois.

En réalité, la réponse au problème n'est pas unique ; il faut faire intervenir diverses explications.

variables suivant les moments et les lieux. La plus simple est l'accident, autrement dit la perte due au hasard par un personnage embarrassé au moment de traverser un cours d'eau. La catastrophe naturelle, sans doute assez rare, ne doit pas non plus être écartée ; une ruée exceptionnelle ou une marée tout aussi peu banale expliquent peut-être les découvertes du gué aux Piles de la Saône ou de Flagfen dans l'Est de l'Angleterre ; l'eau aurait tout emporté, y compris les armes.

Il y a mieux. Comparaison n'est pas raison, dira-t-on, mais les recherches du côté de l'ethnographie et des structures sociales apportent parfois des explications ; l'aspect culturel doit être pris en compte. Car ce qui semble le plus important, ce sont les motifs militaires. En effet, les cours d'eau avaient une importante valeur tactique dans les combats anciens et les vaincus étaient souvent repoussés vers ces milieux aquatiques.



où ils espéraient fuir, souvent vain au demeurant. Mais il ne faut pas confondre le culturel et le religieux, et la religion a également joué, certainement moins qu'on ne l'a cru dans le passé. Des armes ont pu être jetées dans l'eau soit en hommage à un mort, soit en remerciement aux dieux. Il appert

outefois que ces cas ont dû être moins courants.

Le plus important, au total, relève de la méthodologie : la présence de ces objets, jadis pris pour des offrandes aux dieux, s'explique par des causes diverses et variées (y compris religieuses). Conclusion que nous approuvons !

→ **Yann Le Bohec**
Professeur émérite à l'Université Paris IV-Sorbonne

→ BIOGRAPHIE

Sept vies en une

Christian de Duve
Odile Jacob, 2013
336 pages, 25,90 euros

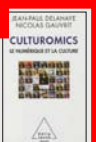
Prix Nobel de médecine en 1974 pour ses travaux sur l'insuline, le glucagon, le métabolisme glucidique et pour les percées décisives auxquelles il a largement contribué en chimie moléculaire, Christian de Duve, disparu tout récemment, livre une autobiographie qui n'aurait qu'un intérêt factuel et anecdotique si elle ne recouvrait une période essentielle en matière d'explosion des connaissances scientifiques.

Né au lendemain de la Première Guerre mondiale dans une Belgique wallonne, catholique et conservatrice, il fait des études de médecine au cours desquelles il goûte, de façon fortuite mais irréversible, aux joies de la recherche ; au lendemain de la guerre, en pleine maturité scientifique, il enchaîne enseignement et recherche, voyages et séjours à l'étranger. Il intègre dès lors un réseau de chercheurs prestigieux, nobélisés pour certains, devenus de vrais amis pour beaucoup, travaillant au sein de laboratoires internationaux réputés. Ces liens seront le socle de collaborations déterminantes à l'origine de découvertes

Brèves

Culturomics

Jean-Paul Delahaye et Nicolas Gauvrit
Odile Jacob, 2013
224 pages, 22,90 euros



Google a numérisé plus de cinq millions de livres, parus du XVI^e siècle à nos jours, ce qui ouvre la voie à une nouvelle forme d'investigation : la « culturomique ». Le grand corpus collecté permet notamment de mesurer les fréquences d'occurrence des termes dans les livres, ce qui indique les sujets auxquels on s'intéresse dans la société. Cela ouvre des perspectives nouvelles. Thème par thème, chaque chapitre de ce livre expose des résultats ainsi obtenus sur les lois de la psychologie, l'aléatoire mesure de la notoriété de quelqu'un, les mutations éducatives, etc.

Expériences sur l'obéissance et la désobéissance à l'autorité

Stanley Milgram
Belfond, 2013
96 pages, 11,50 euros



N'importe quel individu peut se transformer en bourreau dès qu'il est placé sous la coupe d'une autorité qui lui semble légitime. Voici la traduction de l'article où le psychologue américain Stanley Milgram publia cette terrible conclusion en 1965. Une préface et une postface bienvenues accompagnent ce texte essentiel sur une expérience imaginée par Milgram en 1961, en plein procès Eichmann. Il fit beaucoup pour expliquer la banalité du mal, théorisée ensuite par Hannah Arendt.

La Horde d'Or

Svetoslav Lebedinsky
France, 2013
171 pages, 28 euros



De la seconde moitié du XIII^e siècle à 1480, un empire d'origine mongole, mais en fait tatare, donc turc, a existé au-delà de la mer Noire : la Horde d'Or. Spécialiste de l'histoire slave et centre-asiatique, l'auteur nous conte ses deux siècles et demi d'histoire, passant en revue les structures politiques, les techniques guerrières et les principales évolutions de cette puissance, notamment son islamisation. À l'origine des peuples tatars, mélanges de Turcs, de Mongols et de Slaves, la Horde d'Or exerça une influence marquante en Europe de l'Est, qui justifie la lecture de ce livre.

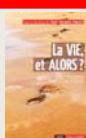
Brèves

La vie, et alors ?

Jean-Jacques Kupiec
(sous la dir.)

Belin, 2013
416 pages, 22 euros).

La vie, le gène, l'organisme, la fonction biologique, le programme génétique, l'écosystème, le soi immunitaire : ces notions sont couramment employées en biologie et dans les débats sociétaux ayant trait au vivant. Pourtant, leur définition fait toujours l'objet de discussions. Quinze biologistes, historiens et philosophes des sciences présentent le fruit de sept années de rencontres sur ce thème, offrant à la fois une histoire critique de ces concepts et des clés pour comprendre les débats qui les entourent.

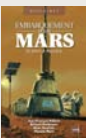


Embarquement pour Mars

J.-F. Pellerin, R. Heidmann
et A. Souchier (sous la dir.)

2C medias, 2013
220 pages, 20 euros).

Les hommes iront-ils un jour sur Mars ? Les auteurs de ce livre en sont convaincus. Astronautes, ingénieurs, biologistes, psychologues et sociologues, tous impliqués dans la recherche spatiale, abordent point par point les défis à relever pour concrétiser le rêve martien : le vol pour y aller, bien sûr, mais aussi la vie des astronautes à bord et sur Mars, la gestion de la nourriture et des déchets, la biosécurité, la mobilité sur Mars, la communication, l'exploration, le budget... Mars la Rouge en devient presque accessible.



Un autre Iran

Christian Bromberger

Armand Colin, 2013
256 pages, 27,50 euros).

L'Iran est loin de se résumer à son régime répressif, ses radicaux religieux, la course écrète à l'armement nucléaire, les intellectuels et artistes rebelles ou les merveilles archéologiques. L'auteur, anthropologue de l'Université d'Aix-Marseille, le prouve dans cet ouvrage. Depuis le début des années 1970, il étudie le Gilân, province iranienne qui longe la mer Caspienne, au Nord du pays, et ses habitants, allant même jusqu'à partager la vie d'une famille en 1982. Mêlant souvenirs personnels et exposé savant, son récit, illustré de nombreuses photographies, dépeint par petites touches l'histoire, le quotidien, le folklore, les rituels et les ressentis d'une autre société iranienne.



scientifiques majeures : entre autres, l'identification d'un certain nombre de composants cellulaires, description des mécanismes de la phosphorylation, etc. L'un des mérites essentiels de l'auteur aura été de s'immerger, avec une curiosité et un appétit jamais démentis, dans ce qui a fondé la biologie moderne. La consécration par le prix Nobel qui ouvre les portes du Rockefeller Institut de New-York et lui permit ainsi de partager son temps avec la création puis la direction de son « institut de recherche, l'ICP de Louvain. Si cette nomination est l'occasion d'une réflexion sur la concurrence entre laboratoires et chercheurs et son cortège sentiments contradictoires faits de fierté, désillusions, jalousies et amertume, on retiendra surtout que dans un microcosme de spécialistes, tous liés les uns aux autres par l'interdépendance de leurs découvertes.

Christian de Duve

SEPT VIES EN UNE

MÉMOIRES D'UN PRIX NOBEL



respectives, il n'y a de trajectoire humaine et scientifique exceptionnelle que grâce à beaucoup d'intuition et de chances, en acceptant la richesse de la confrontation d'idées et de la remise en cause de ses hypothèses, en tirant parti de ses échecs comme de ses succès et... en avant de l'ambition !

→ Bernard Schmitt
CERNh - Lorient

ÉCOLOGIE

Démographie et écologie

Jacques Véron

La Découverte, 2013
126 pages, 10 euros).

L'humanité vit sur Terre. Les relations entre l'homme et son environnement physique devaient dans son problème central du fonctionnement de nos sociétés. Pourtant, la variable démographique est souvent considérée comme seconde dans les débats économiques et écologiques : tout le mérite de cet ouvrage est de la remettre au centre et d'inventorier toutes les relations entre population et écologie.

J. Véron nous rappelle d'abord que Cantillon, Malthus, John Stuart Mill, entre autres, avaient déjà posé la question de la croissance démographique et de ses limites éventuelles. Mais le débat a été fortement réactivé à partir des années 1960 avec la naissance des mouvements écologiques et les alarmes lancées par des auteurs tels que Ehrlich, Meadows ou le Club de Rome. Les grands concepts écologiques sont passés en revue : la capacité de charge, l'équation « IPAT », l'empreinte écologique, cette dernière un peu rapidement : le calcul de « l'empreinte » est en fait complexe et repose sur des « équivalences » qui méritent discussion). Le troisième chapitre contient un historique des grandes conférences internationales sur le sujet depuis 1972, bilan qu'on pourra trouver assez triste au vu des résultats obtenus... Les prévisions démographiques mondiales et certains aspects du développement



durable sont ensuite présentés. L'auteur insiste particulièrement, avec raison, sur le problème de l'alimentation, mais évoque aussi l'eau, l'énergie, la gestion des déchets, et l'apparition de nouveaux risques naturels et sociétaux.

Le lecteur devra se souvenir que l'ouvrage traite d'écologie et non de développement durable. Les deux thématiques se recouvrent fortement, mais quand l'auteur conclut que, de son analyse « des liens entre population, environnement et développement, il ressort que les variables démographiques jouent un rôle majeur dans les dynamiques en jeu », il sous-estime le fait que les effets sur l'environnement de la hausse de la consommation par tête (époussement des ressources naturelles, pollution, création de déchets...) excèdent largement ceux résultant de la seule croissance démographique. C'est surtout en matière alimentaire que la croissance démographique reste primordiale. Un très bon ouvrage.

→ Henri Leridon
INED, Paris

Retrouvez l'intégralité de votre magazine

et plus d'informations sur
www.pourlascience.fr



L'information scientifique de référence maintenant sur tablette et smartphone !



Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
Le 1^{er} numéro de *Pour la Science* est offert !



Disponible sur
App Store

DISPONIBLE SUR
Google play



Scannez ce QR code
avec votre mobile
ou votre tablette
pour télécharger
immédiatement
l'application.

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 5,49 € et son hors-série trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,99 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.



Decouvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver le magazine *Cerveau & Psycho* et son hors-série *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

Et si nous choisissiez la stabilité du long terme
plutôt que la fragilité du court terme ?



Quand une banque partage les valeurs de ses Sociétaires,
leur confiance est réciproque et durable. Depuis 60 ans, la CASDEN s'engage,
au quotidien, à leurs côtés afin qu'ils réalisent leurs projets en toute sécurité et aux meilleures
conditions. Être une banque coopérative, c'est protéger avant tout les intérêts de ses Sociétaires.

Rejoignez-nous sur casden.fr ou contactez-nous au 0826 824 400



L'offre CASDEN est disponible
en Délégations Départementales et
également dans le Réseau Banque Populaire

casden

BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture