

■ POUR LA SCIENCE

Janvier 2012 - n° 411

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Le père de l'homme moderne

Homo heidelbergensis,
parti à la conquête du monde
il y a 600 000 ans

La géométrie
de l'horizon

L'infini à portée
de compas

Hadronthérapie

Des ions accélérés
pour détruire des tumeurs

On a creusé sur Mars

La recherche de la vie relancée



M 02687 - 411 - F: 6,20 €



OFFREZ LES CLÉS DE LA SCIENCE !

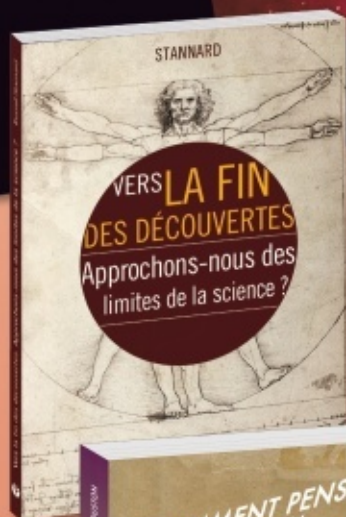


À LA DÉCOUVERTE DE L'UNIVERS

Les bases de l'astronomie et de l'astrophysique
Neil COMINS

« À la découverte de l'univers » propose une visite guidée, simple mais superbement illustrée, et très complète de l'univers depuis les recoins du système solaire jusqu'aux galaxies les plus lointaines.

568 pages - 49 € - Novembre 2011

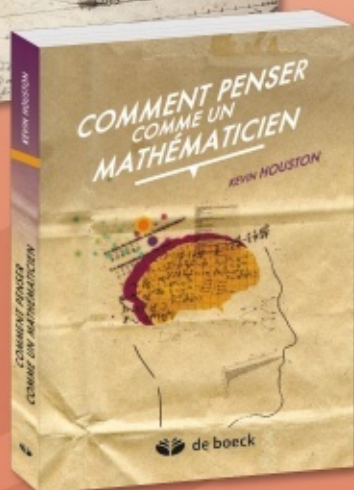


VERS LA FIN DES DÉCOUVERTES

Approchons-nous des limites de la science ?
Russell STANNARD

Une réflexion sur les progrès apportés par la science, avec ses limites, qui est censée éveiller un sens de profond respect face aux mystères de l'existence.

168 pages - 19 € - Août 2011



COMMENT PENSER COMME UN MATHÉMATICIEN

Comprendre, expliquer et étudier
Kevin HOUSTON

En chacun, il y a un mathématicien qui s'ignore. Ce livre vous aidera à révéler celui qui est en vous !

306 pages - 22 € - Juin 2011

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06
Standard : Tél. 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, Cécile Fourrage, Sean Bailly

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteurs : Sébastien Bohler et Bénédicte Salthun-Lassalle

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifédayo Fadoju

Marketing : Élise Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : 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 :

Michel Campillo, Georges Chapouthier, Françoise Combe,
Patrick Froissard, Évelyne Host-Platret, Anne Houdusse,
Vincent Laudet, Anne Masé, Dominique Mazier,
Christophe Pichon, Michel Zelveder.

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

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

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

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

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

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-oides - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFICAMERICAN Editor in chief: Mariette DiChristina. Editors: Ricky Rusing, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong. President: Steven Inchcoombe. Vice President: Frances Newburg.

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

Infini maîtrisé

Deux choses sont infinies : l'Univers et la bêtise humaine. Mais, en ce qui concerne l'Univers, je n'en ai pas encore acquis la certitude absolue.

Albert Einstein

Giard Desargues (1591-1661) consacra une partie de ses travaux à l'étude de la perspective, la représentation de l'infini. Il proposa que toutes les droites se croisent, même les parallèles. Il mit en évidence que de nombreuses propriétés des formes géométriques sont conservées par une projection. Bien qu'il ait inspiré le champ de la géométrie projective, il resta longtemps dans l'ombre, avant d'être redécouvert en 1822 par le général Jean-Victor Poncelet, mathématicien. Ses travaux permirent à plusieurs mathématiciens du XIX^e siècle d'élaborer une théorie générale des projections, laquelle inspirera les géométries non euclidiennes. Aujourd'hui, 350 ans après Desargues, les mathématiciens continuent à explorer les représentations de l'infini (voir *La géométrie des horizons*, page 38).

Autre figure de cette exploration, Giordano Bruno (1548-1600). Selon lui, l'Univers est infini, sans horizon ni limite. Dans son ouvrage *De l'im-*

Missions... infiniment difficiles.

mensité, il s'imagina faire un voyage dans les cieux et explorer le cosmos. A-t-il envisagé d'explorer Mars ? A-t-il rêvé d'y découvrir des traces de vie ? L'hypothèse a été relancée par la mission *Phoenix*, laquelle a mis en évidence, d'une part, la présence de glace d'eau sous la surface de la planète rouge et, d'autre part, que le site où la sonde s'est posée a été humide dans un passé récent... il y a au moins de deux milliards d'années (voir *On a creusé sur Mars*, page 28).

Retrouver une trace de vie sur Mars alors que les sondes en exploration de minuscules surfaces. Repérer l'épicentre d'un séisme et avertir les populations menacées assez vite pour qu'elles aient le temps de se mettre à l'abri (voir *Trente secondes avant le mégaséisme*, page 62). Retrouver l'endroit où des particules ont pris naissance, afin de vérifier qu'elles proviennent bien de la tumeur qu'il faut détruire (voir *Des ions relativistes pour détruire des tumeurs*, page 54). Missions... infiniment difficiles. Pourtant, des méthodes calculatoires permettent de détecter des particules issues de la destruction d'une tumeur ou encore de prévenir de l'arrivée imminente d'un séisme. Avec un nouveau défi : que ces calculs complexes ne durent pas infiniment !

1

ÉDITO

4

BLOC-NOTES

Didier Nordon

Actualités

6

Les lacs cachés d'Europe

9

Du plastique dur
refaçonnable à volonté

10

Le paludisme ciblé plus tôt

11

Fuites de carbone
dans les tourbières

... et bien d'autres sujets.

13

ON EN REPARLE

Opinions

14

POINT DE VUE

Jeunes et cancer :
mieux adapter la prise
en charge

Damien Dubois et Frédéric Scaërou

15

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Du social dans les écobilans

C. Macombe, M. Garrabé,
P. Feschet et D. Loeillet

18

VRAI OU FAUX

L'ophtalmologiste
doit-il examiner un bébé ?

Laurent Laloum

19

COURRIER DES LECTEURS

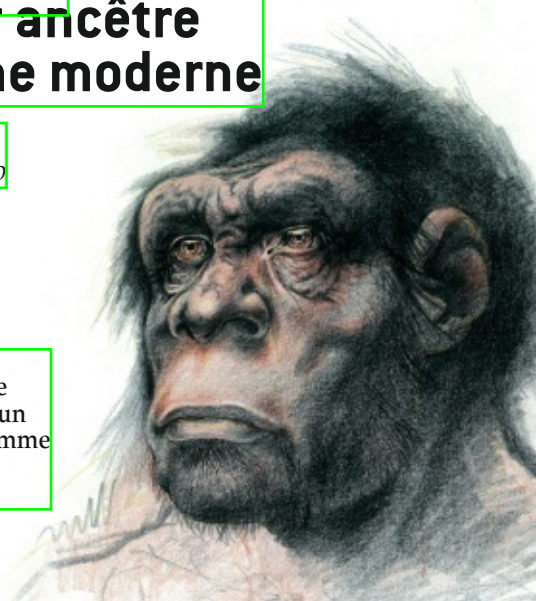
Ce numéro comporte une offre d'abonnement en page 17
et une sélection de livres Pour la Science/Belin/Le Pommier
avec bon de commande en page 76.
En couverture : © Carlo Ranzi

À LA UNE

20 PALÉONTOLOGIE HUMAINE

Le dernier ancêtre
de l'homme moderneGiorgio Manzi
et Fabio Di Vincenzo

Homo heidelbergensis,
un humain archaïque, semble
être le dernier ancêtre commun
à l'homme moderne et à l'homme
de Neandertal. Son origine
commence à s'éclaircir.



28 PLANÉTOLOGIE

On a creusé sur Mars

Peter Smith

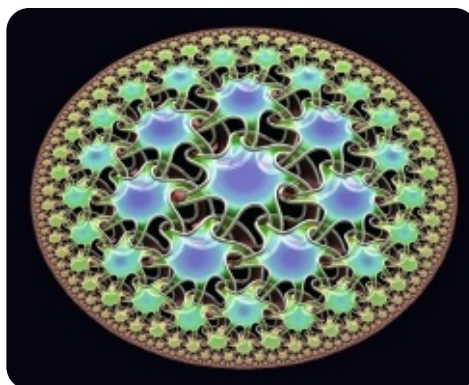
En découvrant de la glace d'eau
juste sous la surface et des composés propices
à la vie, la mission *Phoenix* a ravivé les espoirs
que la planète rouge soit habitable.

38 MATHÉMATIQUES

La géométrie des horizons

Françoise Dal'Bo-Milonet

Bien après l'invention de la perspective
en peinture, les mathématiciens ont conçu
des méthodes pour conférer un bord à un espace
géométrique infini. Cette construction d'un horizon
représente un outil mathématique puissant.



46 ENVIRONNEMENT**Nourrir et préserver la planète***Jonathan Foley*

Doubler la production alimentaire d'ici 2050 tout en réduisant la dégradation de l'environnement : selon une équipe internationale, cet objectif est accessible.

**54 PHYSIQUE****Des ions relativistes pour détruire les tumeurs***Cédric Ray*

L'hadronthérapie détruit des tumeurs avec des ions - carbone ou protons. La méthode présente des avantages par rapport à la radiothérapie classique, et de nouvelles améliorations en augmentent encore la fiabilité.

62 GÉOPHYSIQUE**Trente secondes avant le mégaséisme***Richard Allen*

Pour se préparer au *Big One*, le mégaséisme qu'elle attend, la Californie développe *Shake Alert*, un système d'alerte rapide capable d'avertir plusieurs dizaines de secondes à plusieurs minutes à l'avance qu'une violente secousse va se produire.

**68 BIOPHYSIQUE****Quand la mécanique s'inspire des protéines***Jerry Brown*

La protéomimétique est l'art de déduire, des structures des protéines, des principes simples applicables à l'ingénierie.

Regards**78****HISTOIRE DES SCIENCES****Les dinosaures nains de Transylvanie***Gareth Dyke*

Au début du XX^e siècle, le baron Nopcsa, un aristocrate hongrois, déduit de l'étude de fossiles transylvaniens des hypothèses sur l'évolution des dinosaures. Il était en avance sur son temps de plusieurs décennies.

82**LOGIQUE & CALCUL****L'autoréplication maîtrisée ?***Jean-Paul Delahaye*

Les astucieux travaux pour perfectionner et simplifier le modèle d'autoréplication de von Neumann nous font réfléchir à ce qu'est l'autoreproduction du vivant.

88**ART & SCIENCE****Léonard et la formule de l'arbre***Loïc Mangin***90****IDÉES DE PHYSIQUE****Bien glisser sur la neige***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik***93****SCIENCE & GASTRONOMIE****Un Noël de tendresse...***Hervé This***94****À LIRE**

Rendez-vous sur **SCIENCE.fr**

Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de 5 ans d'archives
- L'agenda des manifestations scientifiques

Les services en ligne

- Abonnez-vous et gérez votre abonnement en ligne
- Téléchargez les articles de votre choix
- Réagissez en direct
- Consultez les offres d'emploi

www.pourlascience.fr

→ À QUAND LA JOURNÉE DU PROBLÈME ?

Je suis le gagne-pain des médecins et des mathématiciens, des politiciens et des travailleurs sociaux, des économistes et des écologistes, des philosophes et des plombiers, et de bien d'autres encore : qui suis-je ?

Réponse : le problème.

Incroyablement protéiforme, le problème est présent dans toutes les activités humaines. Il y a des problèmes de santé et des problèmes de mathématiques, des problèmes politiques et des problèmes sociaux, des problèmes économiques et des problèmes écologiques, des problèmes philosophiques et des problèmes de robinets, etc. À eux tous, ils font vivre une énorme quantité de gens.

Mais la Fondation protectrice des problèmes, FPP, vient de lancer un cri d'alarme. Les problèmes sont en voie de disparition. À force de les résoudre, nous sommes guettés par une pénurie dont les conséquences seraient dramatiques. « Elle entraînerait, à l'échelle de la planète, une vague de chômage sans précédent, un véritable tsunami social », écrit la Fondation.

Pour sensibiliser la population à ce danger, il va falloir instituer une Journée mondiale du problème, sur le modèle de la Journée mondiale de l'eau (22 mars), de la Journée internationale de la paix (21 septembre), de la Journée mondiale de l'environnement (5 juin), etc. Trouver une date

pour cette nouvelle Journée sera difficile, car le calendrier est très encombré, mais on saura bien créer une commission chargée de résoudre ce problème.

→ LES MÉDIAS : NOUVEAUX SATANS ?

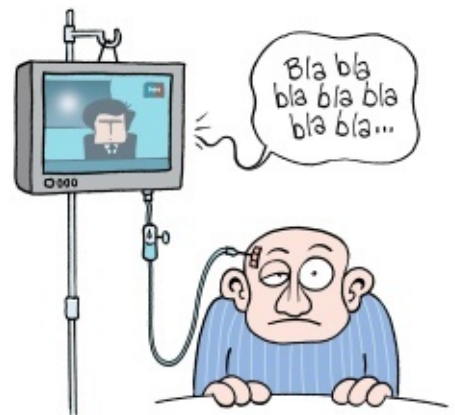
De nos jours, déclarer qu'on ne croit pas aux vertus de l'information est moins risqué que de se dire athée à l'époque classique, mais ce n'est pas mieux compris. La foi dans l'information remplace la foi en Dieu, la soumission devant les médias ressemble à celle devant l'Église. Nombreux sont les parallèles.

Les prêtres pouvaient commettre des erreurs, mais celles-ci ne pouvaient pas ternir l'image de Dieu. De même, les âneries et les manipulations des médias laissent intacte la noblesse de la mission d'informer. Accuser l'information d'avoir pour rôle principal de formater les esprits, non de les éclairer, choque aujourd'hui autant que mettre en doute la bonté de Dieu autrefois. La connivence entre médias et pouvoir vaut celle du passé entre Église et pouvoir. Quand les journalistes font leur *mea culpa* après avoir cédé à un « emballement médiatique », ils agissent comme Tartuffe : ils renchérissent sur les accusations dont ils sont l'objet.

Ces actes de contrition leur permettent de persévérer. Protégés des accusations par le fait qu'ils s'en adressent de pires, ils recommencent à la première occasion. Ils ne souffrent pas de se flageller ainsi, car la presse adore parler d'elle. Ses examens de conscience publics sont des moments heureux : elle y voit la confirmation que tout passe par elle. Quant à l'enfer, les journalistes en sont devenus les maîtres. Pour jeter le discrédit sur une idée ou un individu, ils plongent l'idée ou l'individu dans cet enfer des temps modernes qu'est le dénigrement méthodique par les médias.

Une nouveauté majeure, toutefois. Les démêlés entre science et religion sont une épopée de l'âge classique. À voir le désir de

tant de scientifiques actuels de faire parler d'eux dans les journaux, fût-ce au prix de scoops douteux ; à voir le nombre d'offices chargées de promouvoir la communication des institutions scientifiques, j'ai peur que notre temps ne soit celui où la science capitule devant l'information.



→ LE DISCOURS DE L'ANALYSE

Pour analyser l'impact des nouvelles technologies sur la société, on invente tous les jours des concepts inédits : fracture numérique, cyborgs, transhumanité, posthumanité, utilisation non standard d'éléments hybrides, futuribles activables, quasi-objets, etc.

Cependant, rien n'interdit d'analyser ce même impact en adaptant des idées anciennes. Par exemple, on peut considérer la fracture numérique comme l'expression actuelle de la domination des élites savantes sur les masses ; on peut voir le rôle dans nos vies des objets technologiques comme un avatar du rapport entre l'homme et l'outil ; on peut percevoir les luttes à propos de la gratuité sur Internet comme la forme prise aujourd'hui par le choc éternel entre utopies et réalités sociales, etc.

Forger des concepts inédits pour étudier la technologie, c'est avoir déjà conclu qu'elle constitue une rupture radicale : elle fait advenir un monde n'ayant rien de commun avec ce qui l'a précédé. L'étudier à l'aide d'idées anciennes, c'est privilégier



les permanences, donc avoir déjà conclu que la technologie n'apporte pas autant de nouveau sous le soleil qu'elle le croit.

On ne peut pas analyser sans avoir choisi ses méthodes, on ne peut pas choisir ses méthodes sans avoir analysé. Quiconque entreprend de penser la technologie devrait s'astreindre, avant toute chose, à expliquer comment il sort de ce cercle vicieux.

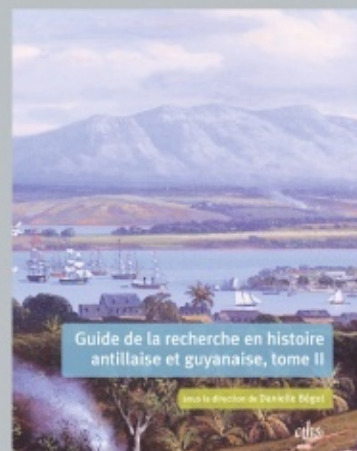
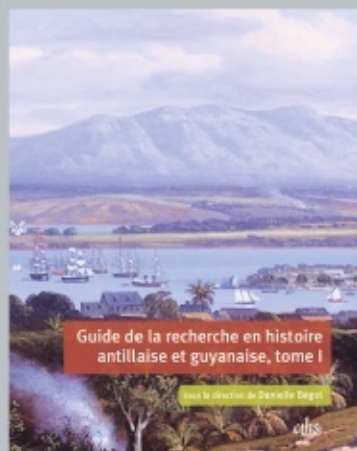
→ VIEILLES NOUVEAUTÉS

Cela ne va pas sans dégâts, mais on peut passer et repasser de la royauté à la république, de la république à l'empire, de l'empire à la royauté, etc. Rien de tel avec les révolutions techniques : une fois inventé le moteur, par exemple, on ne retourne plus à une société sans moteurs. Le progrès technique ne permet pas de revenir en arrière.

Reste à savoir si nous apprécions d'appartenir à une société où ce progrès tient tant de place, où nos vies sont cadrées par les nouveautés technologiques et la profusion de gadgets qu'elles engendrent. Dans toute société, je présume, ceux qui ont du pouvoir s'efforcent d'accréditer l'idée qu'il est vain de vouloir autre chose que ce qu'ils offrent. Je trouve tout de même, à coups de publicités, de promotions commerciales, de miracles promis par les inventeurs, d'évidences assénées et autres bourrages de crâne dans la presse, notre société porte trop loin l'art de nous faire prendre ses réalités pour nos désirs.

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

la plus importante collection d'instruments de travail
pour la recherche en sciences humaines



Guide de la recherche en histoire antillaise et guyanaise Guadeloupe, Martinique, Saint-Domingue, Guyane XVII^e-XXI^e siècle

sous la direction de Danielle Bégot

tome I : 680 p., tome II : 296 p., 17 x 22 cm

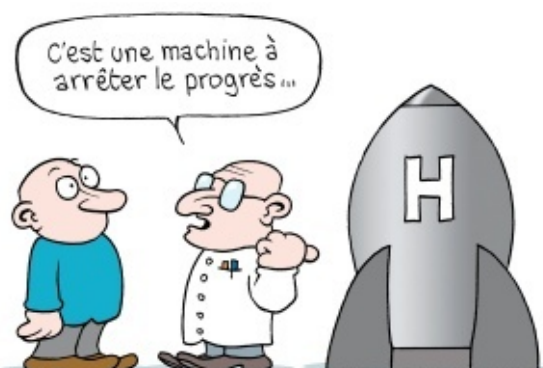
ISBN 978-2-7355-0763-4

55 €

Original et attendu, cet ouvrage porte sur une histoire en grande partie construite de façon récente et qui reste encore en cours d'élaboration. Périodisations et catégories utilisées pour d'autres lieux, en particulier les histoires européennes anciennement constituées, ne sont donc pas toujours opérationnelles, ou ne le sont qu'au risque d'une perte de sens. Plus encore, à la vision traditionnelle des terres coloniales d'Amérique perçues depuis la « métropole », s'est superposé depuis quelques années un déplacement du point de vue. Les thématiques, toujours traitées par des spécialistes de la question, répondent à une option dynamique, qui reflète les enrichissements successifs, les virages récents de cette histoire et ses enjeux. S'appuyant sur un important dépouillement de sources et d'études, insistant sur la méthodologie, cette vingtaine de contributions offre un état de la recherche, de ses acquis, de ses perspectives. Destiné aux étudiants, aux chercheurs, à tous ceux intéressés par le sujet, ce *Guide* constitue un préalable indispensable à tout travail et toute réflexion sur l'histoire antillaise et guyanaise.

Danielle Bégot, qui coordonne l'ouvrage, est professeure des universités. Fondatrice et longtemps directrice du laboratoire Archéologie industrielle, Histoire et Patrimoine à l'université des Antilles et de la Guyane, elle est secrétaire de la Société d'histoire de la Guadeloupe et ancienne présidente de l'Association des historiens de la Caraïbe.

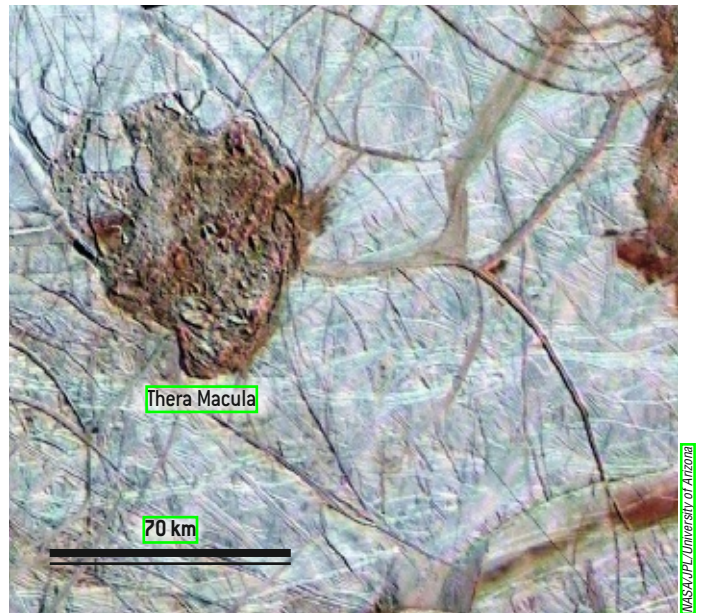
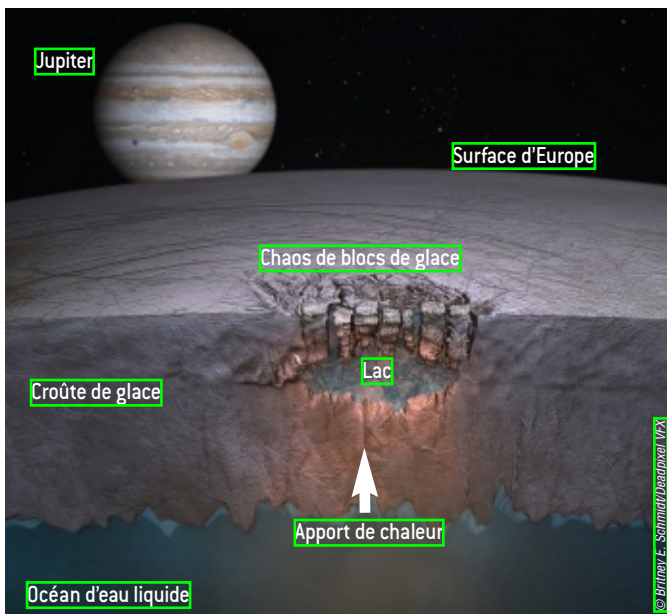
* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS *



Planétologie

Les lacs cachés d'Europe

Le satellite de Jupiter recèlerait de grands lacs d'eau liquide au sein de sa croûte de glace. Leur présence expliquerait les chaos observés en surface.



L'un des grands lacs d'Europe suggérés par les travaux de la géophysicienne Britney Schmidt et ses collègues serait situé sous le chaos de Thera Macula (à droite, cliché pris par Galileo). Il aurait été formé dans la croûte de glace par de la chaleur venant des profondeurs et serait à l'origine du chaos observé en surface (ci-dessus, vue d'artiste).

Lancée en 1989 par la NASA, la sonde spatiale *Galileo* avait pour objectif d'étudier Jupiter et ses satellites. Elle a transmis des photographies du satellite Europe, couvert d'une couche de glace, lisse mais craquelée, qui rappelle la banquise des régions polaires terrestres. Sous cette glace de plusieurs dizaines de kilomètres d'épaisseur se cacherait un océan d'eau liquide probablement dû aux effets de marée de Jupiter. *Galileo* a aussi photographié en surface des structures désordonnées nommées chaos. Ce sont des dômes ou des dépressions grossièrement circulaires constitués de blocs de glace. Britney Schmidt, de l'Institut de géophysique du Texas, et ses collègues proposent un scénario expliquant leur formation.

Les astrophysiciens américains se sont inspirés de phénomènes connus sur Terre pour expliquer les chaos d'Europe. Ils ont étudié le comportement de la glace recouvrant un volcan actif

en Islande, lequel provoque la fonte de la glace par en dessous et l'affaissement de la surface. Les glaciers de l'Antarctique leur ont également été utiles pour établir leur modèle : lorsque la banquise s'avance sur la mer, de l'eau salée s'infiltre dans des fissures et fragilise la glace, qui finit par se rompre et former des icebergs.

La formation des chaos d'Europe s'expliquerait par des phénomènes similaires. Dans un premier temps, un apport de chaleur en provenance des profondeurs d'Europe forme un lac à quelques kilomètres de la surface dans l'épaisseur de la croûte de glace. Ce lac a une forme lenticulaire de plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre pour quelques kilomètres d'épaisseur.

L'eau liquide occupant moins de volume que la glace, la formation du lac provoque l'affaissement de la glace située au-dessus et des fissures se forment. En s'infiltant dans ces fissures, l'eau fragilise la glace et entraîne la dislocation de blocs. Ces derniers s'ef-

fondrent en partie, voire se déplacent, d'où un certain désordre. Quand l'apport de chaleur cesse, la glace reprend en masse et forme alors un dôme incrusté de blocs désordonnés, un chaos quasi circulaire tel Conamara Chaos. Une autre structure, Thera Macula, forme une dépression.

Si le modèle est correct, Thera Macula serait à un stade plus précoce que Conamara Chaos et de l'eau liquide serait encore présente au-dessous. L'étude de la forme des blocs et la taille du chaos suggèrent que le lac se situe à une profondeur de trois kilomètres et qu'il contiendrait entre 20 000 et 60 000 kilomètres cubes d'eau liquide, un volume équivalent à celui des grands lacs d'Amérique du Nord. Un tel volume pourrait mettre jusqu'à un million d'années pour regeler complètement.

Reste que seul un sondage radar par une future mission d'exploration permettra de confirmer l'existence de ces lacs sous glace.

→ Sean Baillly

Nature, vol. 479, pp. 502-505, 2011

Entomologie

L'anti-aphrodisiaque des punaises



Chez les punaises *Lygus hesperus*, le mâle (en bas) décourage les partenaires ultérieurs de la femelle (en haut) grâce à un composé anaphrodisiaque transmis avec ses spermatozoïdes.

La corne de rhinocéros ainsi que de nombreuses plantes auraient des vertus aphrodisiaques. À l'inverse, certains produits sont des anaphrodisiaques, des tue-l'amour en quelque sorte, tel le bromure. Ce type de produits n'est pas réservé aux seuls humains ! Colin Brent et John Byers, du Département américain de l'agriculture, ont mis en évidence l'usage d'un anaphrodisiaque chez les punaises *Lygus hesperus*. Quand, lors d'un accouplement, un mâle transfère un tel produit à une femelle, elle devient beaucoup moins attractive pour d'autres mâles. Le premier favorise donc sa descendance. De fait, un nouveau mâle qui s'approche d'une femelle ayant déjà eu un partenaire la palpe avec ses antennes, puis s'enfuit au lieu d'entamer le rituel de cour. Le répulsif est administré avec le spermatophore, la poche qui contient les spermatozoïdes. Une analyse chimique a révélé que le composé est l'acétate de myristyle. Selon les deux entomologistes, ce mécanisme de castration chimique serait présent chez au moins deux autres espèces de punaises.

→ Loïc Mangin

C. S. Brent et J. A. Byers, *Animal Behaviour*, vol. 82(5), pp. 937-943, 2011

En bref

L'EMPATHIE DES RATS

Une expérience sur les rats réalisée à l'Université de Chicago montre que les primates ne sont pas les seuls animaux doués d'empathie. Confrontés à des congénères mis en cages, les rats reconnaissent la détresse des prisonniers. Sans avoir eu de contact préalable et sans chercher de récompense, ils apprennent rapidement à les libérer, allant jusqu'à partager leur nourriture. Et les femelles semblent plus empathiques : elles libèrent plus souvent les autres rats.

LE SURSAUT DE NOËL

Les sursauts gamma, bouffées cosmiques de rayons gamma, durent au plus quelques minutes. Or le sursaut GRB 101225A, repéré le jour de Noël 2010, a duré près d'une demi-heure ! Deux équipes viennent de proposer des modèles mettant en jeu une étoile à neutrons, un objet compact vestige d'une supernova. Le premier modèle fait intervenir la fusion de l'étoile à neutrons avec le cœur d'une étoile géante. Le second suppose l'impact d'une comète. Faute de connaître la distance du sursaut gamma, les deux scénarios sont plausibles...

UNE PUCE EN MOLYBDÈNE

Andras Kis et ses collègues, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, ont réalisé le premier circuit intégré fondé sur une monocouche de disulfure de molybdène (MoS_2). On s'est rendu compte récemment que ce matériau a des propriétés semi-conductrices qui lui permettent de rivaliser avec le silicium. Avec un avantage... de taille : contrairement à ce matériau classique de l'électronique, le disulfure de molybdène est opérationnel en couches ultraminces, épaisses de seulement trois atomes.

Archéologie

Fosse septique... mais vrai trésor

Une fosse septique est-elle un trésor ? C'est ce que pense l'équipe d'Andrew Wallace-Hadrill, du projet anglais pour la préservation de Herculaneum, qui vient de passer plusieurs années à étudier le contenu d'une fosse septique romaine en excellent état de conservation...

Les archéologues sont tombés sur cette fosse sous l'une des rues de Herculaneum, ville romaine détruite par l'éruption du Vésuve en 79 de notre ère. Là, un tunnel long de 86 mètres et haut de 3,6 mètres était rempli d'un sédiment inodore ressemblant à du compost. L'étude a montré qu'il s'agissait du produit des latrines d'un immeuble romain à appartements, une *insula*. Pour le moment, seulement 70 des 750 sacs recueillis ont été tamisés, et les résultats analysés.

Il apparaît ainsi qu'à l'époque romaine, comme aujourd'hui, nombre d'objets finissaient par inadvertance dans les toilettes. En témoignent les 60 pièces de monnaies, les perles ou encore la bague en or sortie d'une émeraude



Ce tunnel était une fosse septique d'une *insula* où vivaient quelque 150 personnes. Ci-dessous, des témoignages de leur régime alimentaire et une bague trouvés dans le contenu de la fosse.

qui y ont été retrouvées. Les quelque 150 habitants de l'*insula* y rejetaient non seulement ce qui passait par leurs chaises percées, mais aussi restes de nourriture, verres, cratères, poteries et autres poêles usagées, aiguilles d'os, etc.

Les archéologues ont été surpris par la diversité du régime alimentaire des habitants de l'*insula*. Outre le pain et les viandes de mouton et de porc habituels, il était riche en fibres végétales, fruits, légumes et produits de la mer, ce

qui se traduit par la présence de pépins de figes ou de raisin, de noyaux de cerises ou d'olives, de restes de poissons et d'oursins, d'œufs, de noix – en somme, le régime méditerranéen reconnu pour ses bienfaits. Avec le temps, il est certain que cette incomparable banque de données sur les habitudes alimentaires romaines sera exploitée. « On peut y passer sa vie ! », avertit cependant A. Wallace-Hadrill...

→ François Savatier

Biologie animale

Cache-cache de poulpe

Entre 600 et 1 000 mètres de profondeur, en pleine eau, comment se dissimuler sans cachette ni décor dans lequel se fondre ? Deux céphalopodes ont trouvé la solution : ils alternent entre la transparence et une pigmentation brune, ont découvert deux biologistes de l'Université Duke, aux États-Unis.

Dans la partie supérieure de la zone, où la lumière parvient encore, la transparence est un bon stratagème : les proies sont quasi invisibles aux yeux des prédateurs qui chassent en repérant l'ombre d'une victime. À plus grande profondeur, des prédateurs chassent en émettant une lumière dont ils détectent la réflexion par une proie potentielle. Dans ce cas, une parade consiste à absorber la lumière : les pigments bruns ou noirs sont alors privilégiés.

Transparents ou bruns, le poulpe *Japetella heathi* et le calmar *Onychoteuthis banksii* associent les deux méthodes : le changement est autorisé par l'expansion et la contraction de cellules pigmentées nommées chromatophores. Ainsi, ces deux espèces pallient les inconvénients des deux méthodes pour une meilleure protection !

→ L. M.

S. Zylinski et S. Johnsen, *Current Biology*, vol. 21, pp. 1937-1941, 2011

S. Zylinski et S. Johnsen

Le poulpe *Japetella heathi* dans sa version transparente (à gauche) et pigmentée (à droite).

Écologie

Des loups suivis par GPS

Il existe aujourd'hui 19 meutes de loups en France et 12 en Allemagne. Depuis 2009, l'Agence fédérale allemande pour la conservation de la nature suit par satellite six jeunes loups de la frontière germano-polonaise. Elle a fait d'intéressantes découvertes.

Il est ainsi apparu que le comportement des jeunes loups varie énormément : tandis qu'une jeune femelle n'a quitté sa famille qu'au bout de deux ans, un mâle de 12 mois a parcouru 1 500 kilomètres pour aller à la rencontre d'une louve biélorusse... Les chercheurs ont été encore plus étonnés de voir les jeunes loups se risquer facilement sur des terrains découverts, telles les landes, et de constater qu'ils ne répugnent pas à séjourner longtemps près d'une route bruyante, une jeune louve allant jusqu'à creuser sa tanière à 500 mètres d'une grande artère.

« Les loups sont capables de se multiplier très vite dans les milieux structurés par l'homme », souligne Beate Jessel, directrice de l'Agence fédérale pour la conservation de la nature. Pas de doute : en Allemagne aussi, il faut se préparer à gérer la cohabitation entre *Canis lupus* et *Homo sapiens*...

→ F. S.

http://www.bfn.de/0401_pressearchiv.html

Astrophysique

La naissance de Cygnus X-1

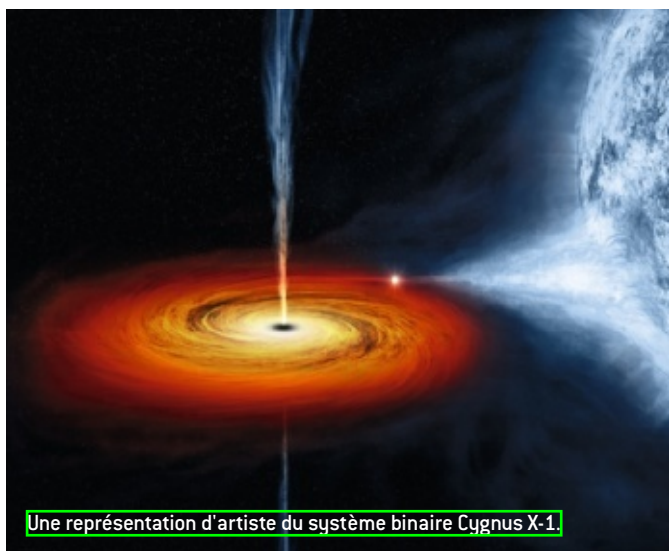
Cygnus X-1 est devenu célèbre en 1988 avec la parution du livre *Une brève histoire du temps*. Le physicien Stephen Hawking y racontait comment il avait parié avec un collègue en 1974 que le système binaire Cygnus X-1 ne contenait pas de trou noir. Mais en 1990, les nombreuses observations conduisirent S. Hawking à admettre que Cygnus X-1 en contenait très probablement un.

Que sait-on sur ce trou noir ? Il émet intensément dans le domaine des rayons X et se nourrit de la matière de son étoile compagnon. Pour mesurer ses caractéristiques, il faut connaître la distance précise qui nous sépare du système binaire. En utilisant le réseau de télescopes VLBA, Mark Reid et son équipe du Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, aux États-Unis, ont mesuré cette distance. Ils ont également estimé la masse du trou noir, sa vitesse de rotation ainsi que sa vitesse de déplacement dans notre Galaxie. Ces informations permettent d'entrevoir les origines du trou noir de Cygnus X-1.

Pour déterminer la distance de Cygnus X-1, M. Reid et ses collègues ont utilisé la technique de la parallaxe trigonométrique.

→ S. B.

The Astrophysical Journal, vol. 742(2), articles 83, 84 et 85, 2011



Une représentation d'artiste du système binaire Cygnus X-1.

NASA/CXC/M. Weiss

Physico-chimie

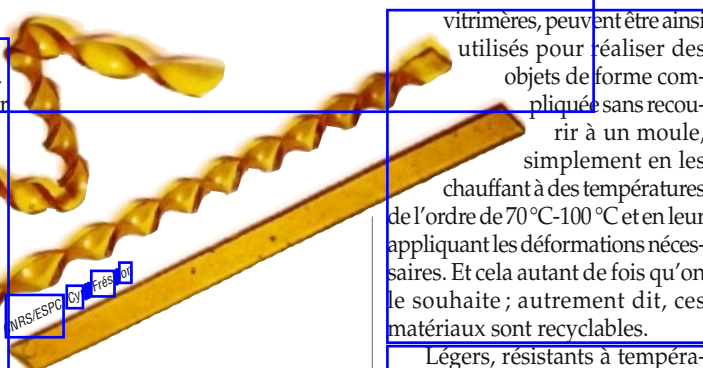
Du plastique dur refaçonnable à volonté

Jusqu'ici, il n'existait pas de matériaux organiques résistants qui, une fois durcis, peuvent être refaçonnés pour prendre n'importe quelle forme voulue, à l'instar du verre. Mais l'équipe parisienne de Ludwik Leibler (CNRS et ESPCI ParisTech) vient de mettre au point de tels matériaux, et les industriels ne devraient pas tarder à en profiter.

Les plastiques rigides existants sont essentiellement de deux types. Les matériaux thermodurcissables, tels que la bakélite, sont obtenus par polymérisation d'un liquide dans un moule. La réaction de polymérisation crée un réseau où de nombreuses liaisons chimiques covalentes (des liaisons robustes) relient les chaînes de molécules, ce qui produit des solides résistants à la chaleur et aux solvants. Mais, une fois la polymérisation effectuée, il est impossible de refaçonner ces résines par chauffage ou par l'utilisation de solvants.

Les thermoplastiques, eux, sont des matériaux polymères dont la structure moléculaire ne met pas en jeu de liaisons covalentes croisées. De ce fait, l'assemblage moléculaire est seulement enchevêtré et donc beaucoup plus lâche. Ils peuvent être refondus et refaçonnés à volonté, mais n'offrent pas une très bonne résistance mécanique, thermique et chimique.

Les nouveaux matériaux élaborés par L. Leibler et ses collègues combinent les atouts des résines thermodurcissables et des thermoplastiques, sans leurs inconvénients. L'idée est de concevoir des matériaux où, à haute température, les liaisons covalentes croisées qui sont proches peuvent s'échanger et ainsi modifier la topologie du réseau moléculaire (voir le schéma). Cette possibilité de réarrangement se traduit d'un point de vue macroscopique par la malléabilité du matériau, obtenue par chauffage.



Trois formes différentes d'un même ruban de vitrimère, la nouvelle classe de matériaux polymères, obtenues l'une à partir de l'autre en chauffant le matériau avec de l'air chaud et en lui appliquant les déformations appropriées.

Pour obtenir de tels matériaux, l'équipe de L. Leibler a utilisé une réaction bien connue nommée transestérification (voir le schéma). Elle l'a mise en œuvre sur des réseaux de polymères synthétisés par des méthodes classiques, la cinétique de la réaction de transestérification étant contrôlée à l'aide de catalyseurs à base de zinc. Les physico-chimistes parisiens obtiennent ainsi des matériaux qui sont durs à température ambiante et qui se ramollissent progressivement dans une certaine gamme de températures, jusqu'à devenir fluides. Ces nouveaux matériaux, que leurs inventeurs nomment

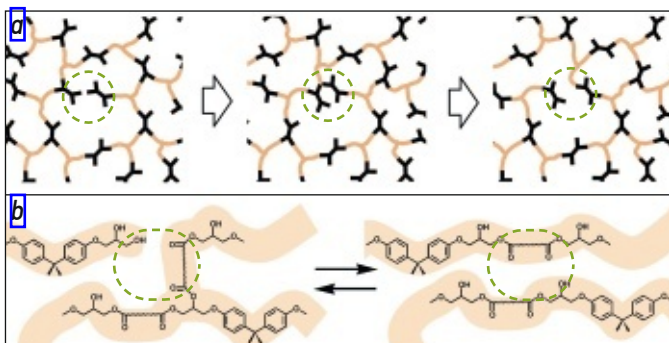
vitrimères, peuvent être ainsi utilisés pour réaliser des objets de forme complexe sans recourir à un moule, simplement en les chauffant à des températures de l'ordre de 70°C-100°C et en leur appliquant les déformations nécessaires. Et cela autant de fois qu'on le souhaite ; autrement dit, ces matériaux sont recyclables.

Légers, résistants à température ambiante, facilement malléables, réparables et recyclables, peu coûteux à produire, les vitrimères cumulent des avantages qui les rendront utiles dans de nombreux secteurs industriels : aéronautique, automobile, électronique, construction, etc.

Sur le plan fondamental, précisent L. Leibler et ses collègues, l'étude expérimentale et théorique de ces réseaux de polymères à liaisons échangeables aiderait à mieux comprendre la physique des verres. La transition entre l'état solide et l'état fluide des réseaux de polymères a en effet de nombreux points communs avec la transition vitreuse – avec l'avantage que, pour les réseaux polymères, la dynamique de cette transition peut être contrôlée à l'aide d'un catalyseur.

→ Maurice Mashaal

D. Montarnal et al., Science, vol. 334, pp. 965-968, 2011



Schémas d'un réarrangement topologique dans un réseau de polymères, dû à une réaction d'échange (transestérification) entre deux liaisons covalentes voisines (a), et d'une réaction d'échange par transestérification dans un réseau hydroxy-ester (b).

En bref

GUÉPES RECONNAISSANTES

Michael Sheehan et Elisabeth Tibbetts, de l'Université du Michigan, ont montré que la guêpe *Polistes fuscatus* est capable de mémoriser la face de ses semblables et les identifier. Ces qualités sont essentielles pour cette espèce sociale chez qui plusieurs reines établissent des nids en commun tout en cherchant à imposer une hiérarchie stricte entre les communautés. La reconnaissance d'un individu permet de savoir rapidement si celui-ci a déjà été vaincu et diminue ainsi le nombre de rencontres agressives.

L'ŒUR GALACTIQUE

L'émission de l'hydrogène ionisé de notre propre Galaxie, indicateur de la formation stellaire, était jusqu'ici impossible à observer, car noyée dans une lueur diffuse de même longueur d'onde interne au Système solaire. Rosine Lallement, de l'Observatoire de Paris, et ses collègues viennent pourtant d'obtenir la première cartographie de l'émission galactique en analysant les données des deux sondes *Voyager*. Celles-ci ont en effet atteint la frontière du Système solaire, où la lueur parasite devient négligeable.

TEMPS ET BOSSE DES MATHS

Vous évaluez correctement les durées ? Alors il y a de bonnes chances que vous soyez également bon en mathématiques. Telle est, en substance, la conclusion à laquelle sont parvenus Peter Kramer et deux collègues, à l'Université de Padoue en Italie. Des tests réalisés sur 202 étudiants ont montré que les sujets qui estimaient le mieux les durées de sons brefs étaient aussi, en moyenne, ceux qui répondaient le mieux à des questions d'arithmétique.

Biologie animale

Toile d'araignée empoisonnée

Les araignées tissent des toiles pour capturer leurs proies. Mais toutes les espèces ne sont pas les bienvenues ! De fait, certaines araignées sont victimes de fourmis. Shichang Zhang, de l'Université de Singapour, a mis en évidence le stratagème de l'araignée *Nephila antipodiana* pour éviter cette menace : la toile empoisonnée !

Les entomologistes ont d'abord été étonnés de voir les fourmis passer au large des toiles de l'araignée, alors que la tisseuse est un mets de choix, copieux de par sa taille. L'explication de cette répulsion réside dans le dépôt d'un produit sur les fils de soie, la 2-pyrrolidone. Toutefois, cette molécule n'est fabriquée que par les araignées adultes et les jeunes déjà grands. Les petits n'en produisent pas, car leurs fils sont trop fins pour le poids d'une fourmi. Il s'agit bien d'une arme de dissuasion sélectionnée par l'évolution à cet effet, plutôt qu'un produit secondaire du processus d'élaboration de la soie. Selon S. Zhang, le produit agirait en produisant chez les fourmis une sensation désagréable au contact de leurs antennes.

→ L. M.

S. Zhang et al., *Proc. R. Soc. B*, en ligne, 23 novembre 2011Une araignée *Nephila antipodiana* sur sa toile vénéneuse.

© J. M. HENRI

Environnement

Enzymes mutées contre PCB

Les PCB, ou polychlorobiphényles, sont des composés organiques de synthèse dangereux pour la santé, dont la production est interdite en France depuis 1987. Comment détruire ces molécules très résistantes, stockées dans des réserves, voire présentes dans l'environnement ? Les rares méthodes disponibles aujourd'hui sont peu efficaces, mais Michel Sylvestre, de l'Institut québécois Armand-Frappier à Laval, et ses collègues proposent une nouvelle approche : la modification génétique de bactéries qui produisent naturellement des enzymes capables de dégrader certains PCB.

M. Sylvestre et ses collègues ont modifié, en agissant génétiquement sur les bactéries, certains acides aminés de la chaîne protéique des enzymes afin d'assouplir cette dernière. Dans ces conditions, le site actif des enzymes peut recevoir des substrats plus volumineux et donc un plus grand nombre de types de PCB ; l'efficacité de la dégradation de ces molécules en ressort augmentée. Reste à montrer que ces bactéries génétiquement modifiées seront utilisables pour traiter des sols contaminés.

→ S. B.

M. Mohammadi et al., *The Journal of Biological Chemistry*, vol. 286, pp. 27612-27621, 2011

Médecine

Le paludisme ciblé plus tôt

Un obstacle à l'éradication du paludisme réside dans la capacité de certaines espèces du parasite, tel *Plasmodium vivax*, à entrer en dormance dans le foie des individus infectés. En passant au crible près de 6000 molécules connues pour agir au stade « sanguin » de la maladie, une équipe internationale a isolé une famille de composés, les imidazolepipérazines, qui bloquent le développement dans le foie d'un parasite des rongeurs, *Plasmodium yoelii*.

Pour se développer, le parasite injecté par un moustique infecté migre via la circulation sanguine jusqu'au foie de l'hôte. Il se multiplie dans une cellule hépatique (du foie) jusqu'à éclatement de celle-ci, puis est libéré dans le sang, où il continue à se multiplier. La recherche de molécules actives se concentre surtout sur ce stade sanguin, où apparaissent les symptômes de la maladie. Pourtant, intervenir à l'étape précoce, dans le foie, permettrait de prévenir l'apparition des symptômes et la transmission du parasite.

Cibler cette étape est particulièrement important dans le cas de *Plasmodium vivax*. Répandue sous les tropiques, cette espèce cause de fortes fièvres, une anémie sévère et des difficultés respiratoires. Surtout, sa capacité de dormance dans le foie entraîne de nombreuses rechutes longtemps après la piqûre

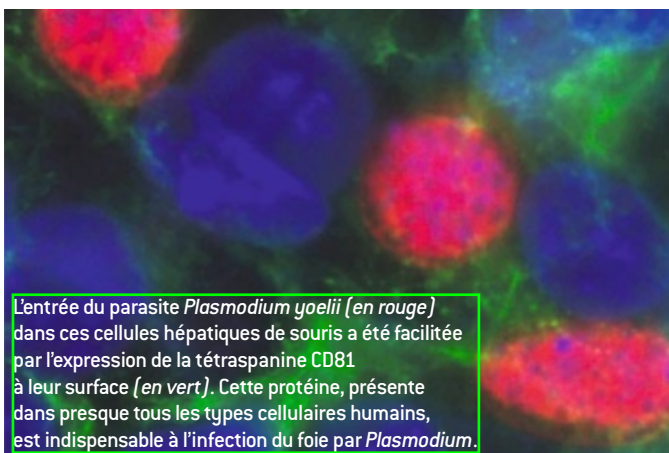
infectante. À ce jour, un seul médicament, la primaquine, élimine dans le foie les parasites au stade dormant. Toutefois, le parasite développe des résistances contre ce médicament, et son utilisation se révèle dangereuse chez certains individus. Déjà commercialisées et administrables oralement, les imidazolepipérazines pourraient offrir une alternative avantageuse.

Pour effectuer leur test, les biologistes, sous la direction d'Elizabeth Winzeler, de l'Institut de recherche Scripps et de l'Institut de génomique de la fondation Novartis pour la recherche, en Californie, ont infecté avec le parasite murin *Plasmodium yoelii* une lignée stable de cellules hépatiques où l'entrée du parasite est facilitée. Puis ils ont évalué le nombre de cellules infectées en présence de chacune des 5 697 molécules testées.

Non seulement les imidazolepipérazines empêchent le développement du parasite *in vitro* dans les cellules, mais, *in vivo* chez la souris, elles préviennent l'apparition de la phase sanguine.

Si elles se révèlent efficaces aussi sur *Plasmodium vivax*, ces molécules pourraient être prescrites dès l'apparition des symptômes pour bloquer à la fois les phases sanguine et hépatique, et éviter ainsi symptômes et récidives.

→ Marie-Neige Cordonnier

S. Meister et al., *Scienceexpress*, 17 novembre 2011

L'entrée du parasite *Plasmodium yoelii* (en rouge) dans ces cellules hépatiques de souris a été facilitée par l'expression de la tétraspanine CD81 à leur surface (en vert). Cette protéine, présente dans presque tous les types cellulaires humains, est indispensable à l'infection du foie par *Plasmodium*.

© J. M. HENRI

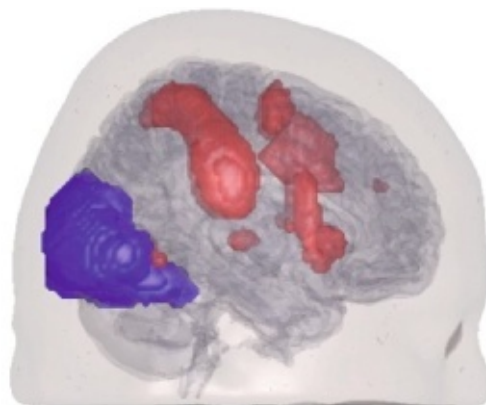
Neurobiologie

Le cerveau stressé

Le stress est une réaction physiologique naturelle qui permet à l'organisme de réagir vite face à une situation dangereuse : la tension artérielle et la fréquence cardiaque augmentent et la respiration s'amplifie pour mieux alimenter le cerveau et les muscles en oxygène et en nutriments. Le corps se prépare ainsi à la fuite ou au combat. Le cerveau aussi voit son état modifié, selon Emo Hermans, de l'Université de Nimègue aux Pays-Bas, et ses collègues, qui ont déterminé pour la première fois le réseau neuronal alors actif.

En cas de stress, l'hypothalamus, au centre du cerveau, envoie un signal à la médullosurrénale, la partie centrale de la glande surrénale (au-dessus des reins). Cette glande libère une hormone du stress, l'adrénaline, qui prépare l'organisme à une réaction rapide *via* notamment une accélération du rythme cardiaque et de la respiration. Puis l'hypothalamus et l'hypophyse (une glande cérébrale située en dessous de l'hypothalamus) libèrent d'autres hormones, ce qui aboutit à la sécrétion de cortisol par la corticosurrénale (la région périphérique de la surrénale). Cette hormone stimule à nouveau l'action de l'adrénaline et celle de la noradrénaline (un analogue de l'adrénaline dans le cerveau et un neuromodulateur).

Ces substances changeraient les propriétés de certains réseaux neuronaux. Pour le confirmer, E. Hermans et ses collègues ont montré à 80 volontaires des extraits de films soit très violents, soit non vio-



Un réseau de plusieurs aires cérébrales s'active quand une personne est soumise à un stress intense.

lents, en étudiant leur activité cérébrale grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Ainsi, quand les participants sont exposés à des scènes violentes, l'activité de certaines régions cérébrales impliquées dans l'attention, l'éveil et le système neuro-endocrinien, de même que celle des connexions entre ces régions, augmentent, et ce d'autant plus que le stress est intense. Ce vaste réseau comprend des aires corticales et sous-corticales (l'amygdale, le thalamus, l'hypothalamus et le mésencéphale). Les chercheurs ont ensuite montré que c'est la noradrénaline qui active certaines aires de ce réseau tout en inhibant d'autres. Elle serait en grande partie responsable du « mode cérébral de survie ».

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

E. Hermans et al., *Science*, vol. 334, pp. 1151-1153, 25 novembre 2011

En bref

UN NOYAU PEU OXYGÈNE

Le noyau terrestre est composé en majorité de fer (Fe) et de quelques éléments légers tels le soufre (S), le silicium (Si), et l'oxygène (O) en faibles proportions. En comparant des mesures de laboratoire sur des matériaux modèles avec des données sismologiques, des géophysiciens chinois ont conclu que la composition la plus proche de celle du noyau liquide est $\text{Fe}_{90}\text{O}_{0,5}\text{S}_{9,5}$. Le noyau liquide serait ainsi presque dépourvu d'oxygène, ce qui suggère que la Terre se serait formée en conditions réductrices.

TROUS NOIRS HYPERMASSIFS

Au moins 9,7 milliards de masses solaires : c'est la masse des deux plus gros trous noirs jamais découverts. Ils résident dans deux galaxies voisines, NGC 3842 et NGC 4889, situées à quelque 330 millions d'années-lumière de nous. À côté de ces monstres, le trou noir central de notre galaxie fait office de microbe, puisqu'il n'atteint que 3,7 millions de masses solaires. Le précédent record était le trou noir central de la galaxie M87, avec 6,3 milliards de masses solaires.

Environnement

Fuites de carbone dans les tourbières

Les tourbières acides sont des milieux humides où de la matière organique d'origine végétale s'est accumulée sans se décomposer. Ce sont donc des réservoirs naturels de carbone. Nathalie Fenner et Chris Freeman, du Laboratoire Wolfson d'étude de la capture du carbone par les tourbières, au pays de Galles, ont montré que la sécheresse amorce dans les tourbières une chaîne de réactions aboutissant à la décomposition de la matière organique et à la libération de dioxyde de carbone piégé.

Dans certains milieux humides, les sphagnum, des sortes de

mousses, prolifèrent. Or les sphagnum acidifient le milieu, ce qui entrave leur propre décomposition ainsi que celle de la matière organique qui s'y accumule. L'accumulation de matière organique conduit à la formation des tourbières. Outre l'acidité du milieu, des composés phénoliques présents dans la matière organique inhibent sa décomposition par des enzymes bactériennes dites hydrolases.

Cependant, en période de sécheresse, le dioxygène de l'air pénètre dans la tourbe et autorise le développement de certaines bactéries dont des enzymes détruisent les composés phé-

liques. Dès lors, les hydrolases, dont l'action n'est plus inhibée, peuvent décomposer la matière organique. L'activité d'autres enzymes bactériennes produit du dioxyde de carbone qui s'échappe de la tourbière. À la fin de la sécheresse, le retour aux conditions initiales n'est pas immédiat et l'on constate même que l'émission de dioxyde de carbone est renforcée. L'augmentation de la fréquence des sécheresses risque donc de modifier le rôle joué jusqu'à présent par les tourbières dans le cycle du carbone.

→ S. B.

Nature Geoscience, vol. 4, pp. 895-900, 2011



Le rôle de réservoir de carbone des tourbières pourrait être perturbé par la sécheresse.

Physique

Le gel de l'eau superfroide

L'eau peut rester liquide jusqu'à... -48°C . C'est ce qu'indique la modélisation du gel de l'eau superfroide effectuée par Emily Moore et Valeria Molinero, du Département de chimie de l'Université de l'Utah, aux États-Unis. On savait que l'eau, si elle est très pure, peut rester liquide jusqu'à -41°C , mais, en dessous, la cristallisation est trop rapide pour être observée. La modélisation permet enfin d'accéder à ce *no man's land* qui intéresse tant les chimistes que les climatologues. Les deux chimistes ont assimilé chaque molécule d'eau (un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène) à une particule soumise à des interactions anisotropes de faible portée imitant les liaisons hydrogène qui lient les molécules d'eau en phase liquide. Lorsqu'on baisse la température dans ce modèle, les particules forment quatre à quatre des tétraèdres. Cette phase constitue un état intermédiaire entre liquide et glace, dont la vitesse maximale de cristallisation est obtenue à -48°C . Les tétraèdres s'assemblent alors pour former une structure vitreuse : la glace.

→ M.-N. C.

E. Moore et V. Molinero, *Nature*, vol. 479, pp. 506-508, 2011

Ethologie

Le couple invisible

Les éthologues doivent notamment identifier des couples dans un groupe pour étudier l'organisation sociale d'une espèce. Chez les singes, pas de problème, mais comment distinguer des couples dans un banc de quelque 2 500 poissons indiscernables ? Tetsumi Takahashi, de l'Université de Kyoto, au Japon, et ses collègues ont résolu le problème. Les cyclidés *Xenotilapia rotundiventralis* vivent dans le lac Tanganyika, en Zambie. On y observe des adultes incubant des alevins dans leur bouche et des études avaient montré que les femelles transmettent une partie de leur progéniture à un mâle quand les jeunes grandissent. Cependant, le mâle en question est-il le père des poissons qu'il transporte ou le premier venu ? Des analyses génétiques ont montré que les poissons protégés par un mâle sont « très probablement » ses enfants. Ainsi, la transmission se fait bien au sein d'un couple qui dure, bien que celui-ci reste indétectable à nos yeux !

→ L. M.

T. Takahashi, *Biol. Lett.*, en ligne, 23 novembre 2011

Géophysique

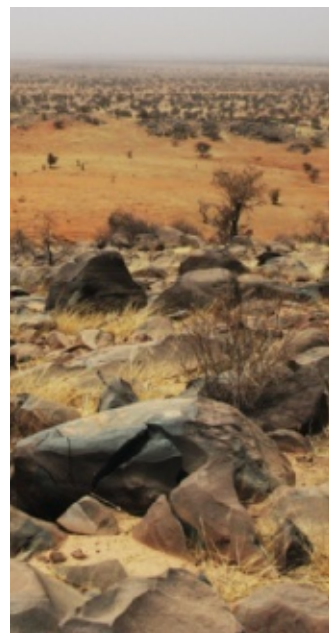
Une très vieille tectonique

On pensait que l'avènement de la tectonique des plaques, sous la forme qu'on lui connaît, datait d'environ 900 millions d'années. Mais Jérôme Ganne et ses collègues, de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et du Laboratoire Géoscience-Environnement Toulouse (GET), ont découvert en Afrique de l'Ouest des roches métamorphiques formées il y a plus de deux milliards d'années à grande profondeur, dans des zones de subduction (là où une plaque glisse sous une autre) très similaires à celles observées aujourd'hui. Cette découverte fait reculer de plus d'un milliard d'années les débuts de la tectonique des plaques moderne.

Du Sénégal oriental jusqu'au Niger occidental s'étendent des bassins de roches volcaniques et sédimentaires d'aspect vert, âgées d'environ 2 à 2,2 milliards d'années. Ce sont des roches métamorphiques (c'est-à-dire transformées sous l'action de fortes pressions ou températures), riches en chlorites et phengites, qui leur donnent une couleur verte. À l'aide de nouvelles modélisations informatiques portant sur le comportement des minéraux en fonction de la pression et de la température, les géologues ont établi que ces roches se sont formées à basse température (inférieure à 450°C) et haute pression (supérieure à 10^9 pascals). Ces conditions étant similaires à celles identifiées

dans des zones actuelles de subduction, J. Ganne et ses collègues en déduisent que les processus modernes de la tectonique des plaques existaient déjà il y a deux milliards d'années. Selon eux, il devrait exister ailleurs dans le monde beaucoup d'autres roches anciennes ayant subi ce type de métamorphisme.

→ Cécile Fourrage

J. Ganne et al., *Nature Geoscience*, en ligne, 20 novembre 2011

Un bassin de roches vertes métamorphiques dans la région d'Essakane, au Nord-Est du Burkina Faso.

DERNIÈRE minute ...

LES PLUS VIEUX MATELAS DU MONDE

À un jeune lecteur demandant qui avait inventé le lit, un magazine de bandes dessinées a répondu : « Probablement quelqu'un qui en avait assez des histoires à dormir debout. » L'origine de cette belle invention s'éclaircit pourtant. Lyn Wadley, de l'Université du Witwatersrand, en Afrique du Sud, et ses collègues ont découvert à Sibudi, un abri rocheux sud-africain, des matelas vieux

de 77 000 ans. Ils sont constitués de couches végétales, notamment de *Cryptocarya* dont les feuilles écrasées sont insectifuges.

LES EFFETS BIEN TANGIBLES DE LA PEUR

Les prédateurs ne font pas que tuer directement leurs proies. La peur qu'ils inspirent a aussi un impact important sur les populations. Des expériences de l'équipe canadienne de Liana Zanette

sur un passereau, le bruant chanteur, l'ont montré : la simple perception du risque (via des cris enregistrés) diminue le nombre annuel de naissances de 40 pour cent !



Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur

www.pourlascience.fr



Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ APRÈS ADAM, VOICI EUREQA

Adam est un prototype de robot scientifique développé par Ross King et ses collègues de l'Université de d'Aberystwyth au pays de Galles. Véritable laboratoire scientifique, Adam émet des hypothèses, réalise des expériences et évalue les résultats pour en tirer des conclusions – sans l'intervention de l'homme (voir *Les robots font de la science*, Pour la Science, octobre 2011, www.pourlascience.fr/u.php?s=plsoer408). John Wikswo, de l'Institut Vanderbilt à Nashville aux États-Unis, et ses collègues espèrent utiliser un autre logiciel, Eureqa, pour fabriquer un robot capable d'analyser des expériences biologiques et d'en déduire les équations qui décrivent l'évolution du système (*Physical Biology*, octobre 2011). En 2009, Eureqa avait retrouvé les équations du mouvement d'un pendule double en quelques heures en analysant ses positions successives. Les scientifiques américains ont appliqué ce logiciel à un système biologique complexe, la glycolyse, un ensemble de réactions chimiques qui permet à une cellule de produire de l'énergie. Ils lui ont fourni des données d'expériences, par exemple l'évolution des concentrations des différentes molécules chimiques, et Eureqa a retrouvé rapidement toutes les équations décrivant le système. En intégrant Eureqa à un laboratoire automatisé, tel Adam, les scientifiques obtiendront un robot biologiste capable de déterminer certaines lois de la nature à partir d'observations expérimentales.

→ DU BISPHÉNOL A IN UTERO

Le bisphénol A représente deux pour cent des produits chimiques en termes de volume de production, et il est présent dans la plupart des plastiques en polycarbonates. Il est désormais interdit dans les biberons et le sera en 2013 dans tous les plastiques destinés aux enfants de moins de trois ans. En effet, c'est un perturbateur endocrinien : plusieurs études scientifiques ont montré qu'il altère les fonc-

→ VOIR DES GALAXIES PRIMITIVES

Les sursauts gamma sont les phénomènes les plus violents de l'Univers : ces bouffées de rayons gamma libèrent en quelques secondes autant d'énergie qu'une étoile comme le Soleil en dix milliards d'années. Les sursauts les plus longs correspondent à la mort d'une étoile massive ; ils s'accompagnent d'une émission rémanente de lumière visible et infrarouge et renseignent « en différé » sur la composition des galaxies qu'ils ont traversées (voir *Les sursauts gamma*, Pour la Science, avril 2002, www.pourlascience.fr/u.php?s=plsoer294). Une équipe internationale d'astronomes vient d'étudier un sursaut gamma grâce au télescope VLT de l'Observatoire européen austral (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2 novembre 2011). La lumière intense émise lors de cet événement a traversé deux galaxies (qui apparaissent telles qu'elles étaient il y a 12 milliards d'années), celle où s'est produit le sursaut gamma et une autre située à proximité. En étudiant les raies d'absorption présentes dans son spectre, les astronomes ont montré que ces galaxies, pourtant très jeunes, sont riches en éléments lourds. Or dans une galaxie, la quantité d'éléments lourds augmente à mesure que les générations d'étoiles se succèdent. Une explication possible à cette observation est que les galaxies forment une grande quantité d'étoiles rapidement, ce qui suggère qu'elles sont en train de fusionner (quand les nuages de gaz entrent en collision, la formation des étoiles est accélérée). Les sursauts gamma permettent donc d'observer la formation rapide d'étoiles et la fusion des galaxies.



Vue d'artiste de deux galaxies sur le point de fusionner. L'explosion brillante sur la gauche est le sursaut gamma ; la lumière qu'il émet traverse les deux galaxies avant d'atteindre la Terre (non visible sur la droite). L'analyse de cette lumière a montré que ces deux galaxies sont riches en éléments chimiques lourds.

tions des hormones dans l'organisme et aurait des conséquences sur la reproduction et le développement cérébral (voir *Le bisphénol A : un danger pour la santé ?*, Pour la Science, octobre 2010, www.pourlascience.fr/u.php?s=plsoer396). Toutefois, la plupart des résultats scientifiques concernaient l'animal de laboratoire. Des chercheurs en santé environnementale, de l'Université Harvard aux États-Unis, ont montré que des filles exposées *in utero* au bisphénol A souffrent davantage de troubles comportementaux – agressivité, anxiété, hyperactivité et dépression – à l'âge de trois ans (*Pediatrics*, 4 novembre 2011).

Les scientifiques ont mesuré les concentrations urinaires en bisphénol A de 244 mères à 16, 26 semaines de grossesse et à la naissance, ainsi que celles des enfants à l'âge de un, deux et trois ans. Ils ont

aussi fait remplir aux parents des questionnaires sur le comportement de leur enfant. Ainsi, plus de 97 pour cent des échantillons d'urine contiennent du bisphénol A, ceux des mères ayant des concentrations moyennes de 2 microgrammes par litre, ceux des enfants de 4,1 (ces chiffres sont inférieurs aux doses considérées comme toxiques par la réglementation européenne). Plus ces concentrations sont élevées pendant la grossesse, plus l'enfant a des risques de souffrir de troubles comportementaux... s'il s'agit d'une fille. Cette corrélation n'a pas été observée pour les garçons, peut-être parce que le bisphénol A est un analogue des estrogènes, des hormones sexuelles davantage présentes chez les filles. Reste à confirmer ce résultat avec un plus grand nombre de mères et d'enfants.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

POINT DE VUE

Jeunes et cancer : mieux adapter la prise en charge

Il est impératif de développer, pour les jeunes atteints de cancer, des modes de prise en charge prenant en compte leurs besoins spécifiques.

Damien DUBOIS et Frédéric SCAËROU

Chaque année en France, environ 2 000 nouveaux cas de cancers sont diagnostiqués chez les jeunes âgés de 12 à 25 ans. Le cancer touche donc moins de deux jeunes sur 10 000, mais il représente, dans cette tranche d'âge, la troisième cause de mortalité après les accidents et les suicides. Actuellement, le système de soins ne propose pas de prise en charge spécifique des adolescents et des jeunes adultes : ils sont en général accueillis au sein de services pédiatriques jusqu'à environ 16 ans, puis, au-delà de cet âge, orientés vers les services pour adultes. Il s'ensuit des différences de prise en charge médicale selon le service (type de traitement ou dose utilisée) et un mal-être des jeunes, qui ne reçoivent pas toujours un accompagnement psychologique adapté à leur âge. Si quelques essais sont en cours pour répondre à leurs besoins, il est temps de considérer la question dans son ensemble et de prendre à grande échelle des mesures volontaristes et coordonnées au plan tant médical que psychologique et social.

Les tumeurs des adolescents et des jeunes adultes sont diverses, constituées de cancers pédiatriques tardifs et de cancers adultes précoces. On observe une prédominance de lymphomes, leucémies, tumeurs du système nerveux central, des testicules ou des ovaires. On détecte aussi des tumeurs de type adulte, voire des tumeurs dites embryonnaires.

Le taux de guérison des adolescents et des jeunes adultes est élevé (plus de 80 pour cent tous types de cancer confondus). Toutefois, dans certaines pathologies, les taux de survie observés sont inférieurs à ceux des enfants. Des études récentes montrent en outre que l'amélioration de ces taux de survie est moins rapide chez ces jeunes patients que pour les autres tranches d'âge.

Ce constat médical est accompagné d'un constat psychologique et social. Au-delà de l'épreuve physique associée aux soins lourds,

CE QUI LEUR MANQUE LE PLUS, ce sont les échanges avec des personnes vivant ou ayant vécu la même situation.

les répercussions de la maladie interviennent à un moment critique où le corps et l'esprit sont confrontés à des transformations majeures, et où l'on s'apprête à entrer dans la vie professionnelle et dans la vie amoureuse. Or ces particularités ne sont pas encore suffisamment intégrées dans le système de santé français. Qu'ils aient été accueillis dans un service pédiatrique ou dans un service pour adultes, les jeunes patients ne se sentent pas à leur place. Ce qui leur manque le plus, expliquent certains, ce sont les échanges avec des personnes vivant ou ayant vécu la même situation, et des circonstances qui leur permettraient de dépasser la pudeur d'en parler. Un environnement uniquement adulte inquiète, et l'environnement pédiatrique ne

s'y prête pas. Cet aspect n'est pas la seule difficulté : comment suivre une scolarité normale, affronter les discriminations, s'insérer professionnellement, trouver les soutiens financiers, préserver sa fertilité ?

Plusieurs solutions seraient possibles pour améliorer la prise en charge. D'un point de vue médical, il faut promouvoir la surveillance épidémiologique des cancers des adolescents et jeunes adultes afin de mieux identifier leurs caractéristiques propres (type de cancer, incidence, survie). L'amélioration des délais de diagnostic, par une meilleure information des médecins sur les symptômes du cancer chez les jeunes, est un autre enjeu : toute douleur unilatérale des jambes chez un adolescent, par exemple, devrait conduire à une consultation spécialisée. Enfin, une harmonisation des soins offerts aux jeunes patients est nécessaire. Elle ne sera possible que si les services adultes et pédiatriques en oncologie collaborent étroitement.

D'un point de vue humain, un accompagnement personnalisé pendant les traitements et après est nécessaire en termes de soutien scolaire, d'aides psychologiques (pour les jeunes et leurs proches), de qualité de vie, de maintien du lien social, de contacts avec leurs pairs, mais aussi pour les aider à construire leur identité, à envisager l'avenir, ou simplement à effectuer leurs démarches administratives. La préparation de l'après-cancer doit aussi être envisagée dès le début de la maladie pour anticiper les séquelles

éventuelles, telle la perte de fertilité, et proposer au jeune patient, par exemple, de préserver un échantillon de ses spermatozoïdes/ovules avant le traitement.

Quelques prises en charge spécifiques ont déjà été mises en place dans certains services de cancérologie. Ainsi, à l'Institut Gustave Roussy à Villejuif, depuis 2002, une unité de dix lits propose une prise en charge globale du patient, tant médicale que psycho-sociale. Les dossiers des patients sont étudiés lors de réunions pluridisciplinaires en présence d'oncologues pour adultes et de pédiatres. Les patients bénéficient en outre de l'intervention d'une psychologue, d'une psychomotricienne, d'une équipe pédagogique de l'Éducation nationale et d'une socio-esthéticienne. Ouverte en 2010, l'unité d'hématologie dédiée aux jeunes de 15 à 30 ans de l'Hôpital Saint-Louis, à

Paris, s'engage sur cette même voie. À l'Institut Curie, à Paris, les patients sont hospitalisés en oncologie adulte ou pédiatrique, mais bénéficient d'une prise en charge spécifique par une équipe mobile. La Ligue contre le cancer, enfin, expérimente la mise en place de lieux dédiés aux adolescents et jeunes adultes dans deux centres hospitalo-universitaires, à Nantes et à Strasbourg. Ces *Espaces Jeunes* offriront aux jeunes patients un lieu convivial où ils pourront rencontrer des intervenants psycho-sociaux et d'anciens patients.

En outre, depuis plus de dix ans, les associations dédiées aux jeunes patients, telle *Jeunes solidarité cancer*, travaillent en lien étroit avec les professionnels de la cancérologie et les institutionnels, notamment l'Institut national du cancer. À l'heure où le temps d'hospitalisation se réduit, ces associa-

tions constituent un relais indispensable pour aider les jeunes à reprendre une vie normale.

La mesure 23.5 du plan Cancer 2009-2013 insiste sur l'importance de structurer « une offre de soins spécifiques pour les adolescents atteints de cancer ». Un appel à projets de l'Institut national du cancer est en cours d'évaluation. Pour aider ces jeunes confrontés à une maladie grave alors qu'ils sortent à peine de l'enfance, la volonté politique doit se faire claire, précise et efficace. ■

Damien DUBOIS est cofondateur et président de l'association *Jeunes solidarité cancer*. **Frédéric SCAËROU** est délégué à la recherche de la Ligue contre le cancer.

www.jeunes-solidarite-cancer.org
www.ligue-cancer.net



Réagissez en direct à cet article sur www.pourlascience.fr

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Du social dans les écobilans

Pour compléter un écobilan, une « analyse de cycle de vie sociale » vise à quantifier les impacts sociaux de la fabrication d'un produit, de son usage et de son recyclage.

Catherine MACOMBE, Michel GARRABÉ, Pauline FESCHET et Denis LOEILLET

Pour tous les spécialistes du climat ou presque, les émissions d'origine humaine de gaz à effet de serre sont responsables d'un réchauffement climatique en cours. Pour tenter de remédier à la situation, des bilans de ces émissions sont indispensables. Or il est impossible de surveiller toutes les sources d'émission, extrêmement nombreuses. Les ingénieurs ont donc inventé des méthodes indirectes.

L'analyse chimique de n'importe quel combustible révèle combien sa combustion relâchera de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Si l'on archive ces indications, et que l'on connaît la quantité de combustible utilisée pour élaborer chaque matériau, on

déduira la quantité de gaz à effet de serre engendrée par la fabrication de tel ou tel produit. Un tel calcul peut être effectué depuis la pousse du pied de tomate au champ et l'extraction de l'aluminium dans la mine, jusqu'à la boîte de concentré de tomates au supermarché. Et ce qui est fait pour les gaz à effet de serre peut l'être pour d'autres molécules. Un tel calcul est nommé analyse du cycle de vie (ACV), ou encore écobilan.

L'analyse du cycle de vie concerne la fabrication, l'usage et le recyclage d'un produit, et consiste à calculer plusieurs impacts environnementaux. Elle montre aussi les éventuels transferts d'effets qui surviendraient si l'on passait d'un scénario à un autre. L'une des premières études portait

ainsi sur le moyen de nettoyer la graisse des moteurs automobiles : est-il écologiquement préférable d'utiliser un chiffon lavable ou un papier qui sera incinéré ?

Malgré leur coût élevé et leur complexité, les évaluations sérieuses bénéficient d'une réelle reconnaissance. Le label écologique européen, qui ressemble à une petite fleur, est ainsi accordé aux produits les plus verts de leur catégorie, sur la foi d'une étude par analyse du cycle de vie.

Mais d'autres effets sont dignes d'intérêt. Benito Müller, spécialiste des questions d'énergie et environnement à Oxford, a ainsi écrit que c'était un devoir moral de consommer des fraises africaines en hiver, en dépit des dommages environnementaux



→ pouirlascience.naturejobs.com

Nouveau service d'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.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

causés par leur transport vers l'Europe, parce que cette culture fait vivre de nombreuses familles pauvres.

Ainsi est née l'idée d'élaborer une méthode comparable à l'analyse du cycle de vie, cette fois pour estimer uniquement les effets sociaux de la fabrication, l'usage et le recyclage d'un produit. Tel est le but d'une analyse du cycle de vie sociale (ACVS), terme forgé dans les années 1995 avant même d'avoir un réel contenu. Mais les difficultés, en particulier méthodologiques, ne manquent pas.

Les recherches se sont développées dans deux directions. Dans la plus courante, on cherche à caractériser les performances sociales de filières existantes. Les critères sont souvent issus de ceux utilisés par les entreprises pour prouver leur bon comportement social, comme attester l'absence de travail fourni par des enfants. Mais le choix des critères est ouvert, et il dépend aussi des intérêts des commanditaires ! Par exemple, une étude récente a montré qu'un fort pourcentage des heures de travail d'une filière de tomates sous serre au Canada provient de petites et moyennes entreprises, pourvoyeuses d'emploi local. D'autres travaux recensent les pratiques en matière de conditions de travail dans différents pays. Un entrepreneur intéressé par des fournisseurs du Yémen connaîtra ainsi les risques que ces derniers enfreignent les lois internationales du travail.

La plupart des critères n'ont pas la même signification quand on change de contexte. Ainsi, le recours au travail des enfants peut être une véritable plaie dans certains contextes, et un moindre mal dans d'autres. Il existe cependant d'autres critères plus consensuels, tels que le nombre d'heures travaillées dans la semaine.

À partir de 2006, des chercheurs ont proposé une nouvelle approche, qui permettra à terme de prévoir les effets sociaux d'une activité future. Il s'agit d'établir des relations mathématiques entre une variable dont le niveau dépend du cycle de vie, et un effet social intéressant. Certaines études ont par exemple utilisé le lien connu entre le niveau d'une activité économique (engendrée localement par le cycle de vie d'un produit) et

l'amélioration de la santé des populations pauvres locales, ou la baisse de la mortalité infantile. L'ensemble des relations mathématiques et leurs conditions d'usage permettent d'effectuer de véritables prévisions sous hypothèses, et donc de comparer les effets sociaux de différents scénarios.

Les travaux de notre groupe de recherche « ELSA ACV sociale », à Montpellier, s'inscrivent dans cette démarche. Nous avons ainsi récemment précisé le lien entre la production d'une filière banane et la variation de l'espérance de vie de la population. Et d'autres travaux de terrain sont en cours.

L'ABSENCE DE BANQUES DE DONNÉES pertinentes et le temps considérable nécessaire à la collecte des informations rendent la tâche ardue.

Certaines analyses environnementales du cycle de vie traitent déjà des effets nocifs de la pollution sur la santé en général. L'analyse du cycle de vie sociale a pour but de les compléter par la prévision d'autres effets sociaux, négatifs aussi bien que positifs, sur tous les groupes de personnes touchées par le cycle de vie d'un produit.

L'absence de banques de données pertinentes et le temps considérable nécessaire à la collecte des informations comptables et sociales rendent la tâche ardue. Demeure également un problème méthodologique de fond : la théorie du « monde social » que l'on se donne. Par exemple, quel modèle de développement retient-on ? Qu'est-ce qui compte dans le social ? En l'absence de cette théorie, la nature des impacts sociaux étudiés semble souvent choisie de façon arbitraire.

Les analyses de cycle de vie sociales devraient être fort utiles pour de nombreux agents (décideurs publics et privés, prévisionnistes, gestionnaires, etc.). Mais beaucoup reste encore à faire pour qu'elles deviennent des outils routiniers et consensuels. ■

Catherine MACOMBE travaille à l'IRSTEA (ex-CEMAGREF), Michel GARRABÉ à l'Université Montpellier 1, et Pauline FESCHET et Denis LOEILLET au CIRAD, à Montpellier. Ils ont organisé le 2nd séminaire international sur l'ACV sociale, tenu à Montpellier en mai 2011 (<http://social-lca-2011.cirad.fr/presentation>).

Première bonne résolution 2012 : je m'abonne à **SCIENCE** !



1 an • 12 n^{os}

56 €



Recevez chaque mois votre magazine en version papier et consultez sa version numérique en format PDF sur **www.pourlascience.fr**

BULLETIN D'ABONNEMENT

A retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

☐ Oui, je m'abonne au magazine **Pour la Science** :

☐ 1 an • 12 n^{os} • **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 n^{os} • **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 €.

Pour 20 € de plus, découvrez les *Dossiers Pour la Science* tous les trimestres !

☐ Oui, je préfère m'abonner à **Pour la Science + les Dossiers Pour la Science**

☐ 1 an • 16 n^{os} • **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 n^{os} • **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 €.

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

Je choisis mon mode de règlement :

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

☐ Par carte bancaire

Numero de carte _____

Date d'expiration _____ Signature obligatoire _____

☐ Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante :

_____ @ _____

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 ☐.



VRAI OU FAUX

L'ophtalmologiste doit-il examiner un bébé ?

Oui. C'est parfois nécessaire, par exemple si les parents souffrent d'une forte anomalie visuelle. Un défaut non corrigé peut perturber le développement de la vision.

Laurent LALLOUM

Peut-on savoir si un bébé de moins de un an voit correctement ? Et si ce n'est pas le cas, doit-on dès cet âge corriger les troubles visuels ? Oui, certaines pathologies de la vision sont détectables très tôt, et si elles ne sont pas corrigées, elles peuvent entraîner des anomalies plus graves.

La vision d'un nouveau-né n'est pas nette, car le système visuel se développe encore après la naissance. Un bébé naît avec une acuité visuelle – la capacité à distinguer des objets – faible. En effet, les fibres nerveuses transmettant les images de l'œil au cerveau ne sont pas encore en ordre. L'acuité et le champ de vision s'améliorent avec le développement et l'organisation de ces fibres : c'est la maturation des voies optiques, une étape nécessaire à la mise en place d'une vision correcte. Si des troubles visuels existent à la naissance, mieux vaut les corriger pour que cette maturation se fasse correctement.

À la naissance, l'ophtalmologiste peut vérifier que l'anatomie de l'œil est correcte, c'est-à-dire que les milieux optiques (la cornée et le cristallin) sont bien transparents et que la rétine de chaque œil, là où se forment les images, et les nerfs optiques, qui transmettent ces images au cerveau, sont normaux. À cet âge, le but est surtout de rassurer les parents, car peu d'anomalies visuelles nécessitent une prise en charge si précoce.

À l'âge de deux mois, l'ophtalmologiste peut contrôler avec les appareils dont il dispose si l'œil est capable de faire la mise au point pour que les images soient nettes. Un défaut de mise au point (ou amétropie) important justifie une correction et le port de lunettes. Celles-ci permettent d'éviter une

mauvaise maturation des voies optiques et l'apparition de pathologies plus graves tels un strabisme et une amblyopie. Définissons ces troubles visuels.

Il existe trois types d'amétropie. La myopie entraîne une mauvaise vue des objets éloignés, car l'œil est trop long : l'image ne se projette pas sur la rétine, mais en avant. Au contraire, dans le cas d'une hypermétropie, l'œil est trop court et la focalisation de l'image se fait derrière la rétine. L'hypermétrope a des difficultés pour voir de près et, parfois, pour distinguer des objets éloignés. Quant à l'astigmatisme, il provoque une vision floue des objets, de près et de loin.

L'enfant louche-t-il ?

Le strabisme est un défaut de parallélisme des axes des deux yeux, en convergence (un œil est dévié vers le nez) ou en divergence (un œil est dévié vers la tempe). Il entraîne notamment une mauvaise vision du relief. Dans l'amblyopie fonctionnelle (traitable jusqu'à l'âge de six à huit ans), la vision est imparfaite même avec des lunettes. Elle a plusieurs causes possibles, en particulier la non-correction d'une amétropie importante ou d'un strabisme (le cerveau « neutralise » les informations issues de l'œil qui voit mal). Souvent, il est nécessaire de gêner la vision de l'œil qui voit bien (par un pansement par exemple) pour « forcer » l'œil amblyope à travailler.

Ainsi, l'examen du bébé est utile avant un an, notamment si ses parents ou frères et sœurs souffrent de troubles visuels importants. Prenons par exemple deux versions d'une même histoire. Première version : le petit Louis louchait de temps en temps depuis l'âge de trois mois, mais, à six mois, le stra-



Cet enfant souffre d'un strabisme, ce que confirme le reflet du flash sur l'œil gauche qui n'est pas au centre de la pupille.

bisme est devenu permanent. Quand Louis a sept mois, l'ophtalmologiste constate une forte hypermétropie (comme sa mère). La correction de ce défaut améliore le strabisme, sans le faire disparaître. À l'âge de six ans, Louis est opéré de son strabisme qui ne se remarque plus, mais sa vision du relief reste mauvaise. Seconde version : avant d'être enceinte, la maman de Louis voit un ophtalmologiste, qui lui conseille de faire examiner ses futurs bébés dès l'âge de deux mois, à cause de sa forte hypermétropie. Louis naît. Quand il a deux mois, un ophtalmologiste constate une forte hypermétropie et prescrit des lunettes. À six ans, Louis ne présente pas de strabisme et a une bonne vision du relief.

Un ophtalmologiste peut examiner un bébé pour d'autres raisons ; s'il souffre de nystagmus (même quand le bébé fixe le regard, ses yeux bougent anormalement), d'une anomalie des mouvements oculaires ou s'il présente une tache blanche dans la pupille, toujours au même endroit (ce peut être une cataracte, ou très rarement une lésion rétinienne urgente à traiter). Et un test renseigne bien l'ophtalmologiste : si le bébé proteste toujours quand il lui cache le même œil, cela signifie que l'autre œil voit mal. Reste à trouver l'anomalie et à la traiter si possible. ■

Laurent LALLOUM est neuro-ophtalmologiste et strabologue à Paris.



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ ROBOTS SCIENTIFIQUES

Concernant *Les robots font de la science* (*Pour la Science* n° 408, octobre 2011, http://bit.ly/408_robots_science), peut-on envisager que le robot Adam, ayant mémorisé l'état exhaustif des connaissances dans un domaine bien délimité, parvienne à formuler non seulement les hypothèses relatives à une question, mais les questions pertinentes elles-mêmes ?

Noël Barbichon

sans pile et sans que l'on ait besoin de les illuminer. S'agit-il d'un des deux phénomènes de photoluminescence décrits dans l'article ?

Mary Snow

→ RÉPONSE DE BERNARD VALEUR

La plupart des montres et réveils qui permettent de lire l'heure la nuit mettent à profit le phénomène de phosphorescence, avec des composés dont l'intensité décline en quelques heures. En revanche, les montres dont les chiffres et aiguilles restent lumineux en permanence, sans qu'il soit besoin de les illuminer, font appel à la radioluminescence, c'est-à-dire l'émission de lumière consécutive à l'irradiation par des rayons X ou un rayonnement radioactif. Certaines montres lumineuses utilisent en effet du tritium dont l'émission radioactive β excite en continu des luminophores (en général des composés phosphorescents, à base de sulfure de zinc par exemple). La période radioactive du tritium étant de 12,4 ans, les chiffres et aiguilles restent visibles dans l'obscurité pendant au moins 20 ans.

Les premières montres lumineuses fondées sur ce principe employaient des sels de radium, mais l'usage en a été interdit dans les années 1960. Le tritium est pour sa part sans danger : il est confiné (sous forme gazeuse) dans des microcapsules en verre tapissées du luminophore. Or le rayonnement β du tritium ne peut franchir le verre !

Pour en savoir plus sur la radioluminescence, vous pouvez consulter l'ouvrage *Lumière et luminescence* (Belin, 2004).

✓ PHOTOGRAPHIE COMPUTATIONNELLE

L'article *Juste une mise au point* (*Pour la Science* n° 408, octobre 2011, http://bit.ly/408_idphys), vulgarise comme toujours dans la chronique *Idées de Physique* un problème intéressant de façon claire ; ici, les appareils photo plénoptiques, présentés comme révolutionnaires. Je me dois d'apporter certaines précisions : cette technique intéressante mais un peu « naïve » est extrêmement consommatrice en capteurs et demande un gros calcul d'inversion.

Or cette piste n'est pas la seule, comme pourrait le suggérer cet article. La « photographie computationnelle » est un domaine scientifique en plein essor. Le problème de changement ou d'élimination de la profondeur de champ, ainsi que celui du flou de bougé, ont été étudiés dans de nombreux articles scientifiques récents, sur la base d'une seule lentille et d'un capteur traditionnel. Cela passe par des calculs du même ordre de complexité qu'ici, revenant à une division de spectre, avec diverses hypothèses et méthodes pour rendre cette opération stable et bien posée, voire en changeant la réponse impulsienne de l'optique avec des masques structurés.

Fabrice Neyret

✓ DOULEURS DORSALES

La conclusion de l'article *Des douleurs dorsales peuvent-elles être dues à des défauts aux dents ?*

(*Pour la Science* n° 409, novembre 2011, http://bit.ly/409_douleurs) laisse entendre que la question des douleurs chroniques mériterait d'être mieux prise en compte par la recherche. Mais l'auteur réduit pourtant cette question scientifique à une polémique. Ne devrait-il pas nous informer de l'état de la controverse au sein des cliniciens ?

Noël Barbichon

→ RÉPONSE DE LA RÉDACTION

Il y a polémique au sein du grand public, alors même qu'il n'existe pas de controverse chez les cliniciens. Aucune des études réalisées n'a mis en évidence de lien entre mauvaises occlusions et douleurs généralisées : la réponse à la question posée par l'article est donc « non » ! Cette conclusion est confirmée par le chirurgien-dentiste, psychologue et spécialiste de la douleur orofaciale cité, Paul Pionchon. Ce dernier a néanmoins suggéré d'évoquer que de vraies pathologies souvent méconnues, telle la fibromyalgie, peuvent entraîner des douleurs inexplicables. Cela pourrait en effet expliquer pourquoi persiste l'idée erronée que des douleurs dorsales sont dues à des malocclusions.

✓ MONTRE AU TRITIUM

L'article sur *L'énigme de la photoluminescence* (*Pour la Science* n° 410, décembre 2011, http://bit.ly/410_photoluminescence) m'a fait penser à une observation intrigante : les chiffres et les aiguilles de certaines montres restent lumineux plusieurs semaines, voire des mois,

Le dernier ancêtre de l'homme moderne

Giorgio Manzi et Fabio Di Vincenzo

Homo heidelbergensis, un humain archaïque, semble être le dernier ancêtre commun à l'homme moderne et à l'homme de Neandertal. Son origine commence à s'éclaircir.

Depuis 1987, on sait que l'homme moderne, *Homo sapiens*, est une espèce née en Afrique, il y a environ 200 000 ans. Cette conclusion, issue des études sur la diversité génétique de notre espèce, a fait pencher la balance en faveur de la théorie d'une origine africaine de l'homme moderne, au détriment de la théorie alternative, le modèle de l'évolution multirégionale. Ce dernier supposait une évolution continue au sein d'une même espèce humaine ayant une vaste aire de répartition, et prévoyait une origine bien plus ancienne de la variabilité humaine actuelle.

En 1997, une autre donnée génétique surprenante a éclairé un événement plus ancien de l'évolution de l'homme moderne: le moment où notre lignée évolutive s'est séparée de celle des Néandertaliens. On est parvenu pour la première fois à extraire des fragments d'ADN des os fossilisés du squelette néandertalien le plus emblématique: celui qui avait été découvert en 1856 dans la vallée allemande du Neander (*Neandertal*, en allemand) et qui avait donné son nom à ce cousin de l'homme moderne. Ici aussi l'ancienneté de la séparation des

L'ESSENTIEL

✓ Les lignées de l'homme moderne et de l'homme de Neandertal se sont séparées il y a environ 500 000 ans.

✓ Un ensemble d'indices suggère que le dernier ancêtre commun à l'homme moderne et à l'homme de Neandertal était *Homo heidelbergensis*.

✓ D'après l'analyse de fossiles découverts à Denisova, en Sibérie, *Homo heidelbergensis* serait apparu il y a plus de 500 000 ans. Par ailleurs, un crâne mis au jour à Ceprano, en Italie, représenterait la forme ancestrale de cette espèce.

Giorgio Manzi

deux lignées suggérée par les données génétiques était en accord avec ce que proposaient une partie des paléoanthropologues: 500 000 ans environ.

Pour comprendre les origines de notre espèce, nous devons tenir compte non seulement de son apparition il y a quelque 200 000 ans, mais aussi d'événements antérieurs, qui se perdent dans les racines du genre *Homo* et qui concernent principalement la séparation entre notre lignée et celle des Néandertaliens, il y a un demi-million d'années. On peut dans ce contexte se demander quand le dernier ancêtre commun à *Homo sapiens* et à *Homo neanderthalensis* a fait son apparition, puis s'est étendu géographiquement.

C'est ici qu'entre en jeu un troisième nom latin d'espèce et une nouvelle frontière pour la recherche paléoanthropologique: *Homo heidelbergensis*. Comme nous allons le voir, l'étude de certains restes fossiles, tels que le crâne de Ceprano, en Italie, et la phalange de Denisova, dans le Sud de la Sibérie, fournit des indications sur le lointain passé de l'homme et montre que *Homo heidelbergensis*, un hominidé qui était présent dans tout l'Ancien Monde,



1. L'HOMME DE CEPRANO, dont le crâne a été découvert en 1994, ressemblait probablement à cet ancêtre hypothétique dépeint au début des années 1980 par l'illustrateur italien Carlo Ranzi.

est vraisemblablement l'ancêtre commun à l'homme moderne et à l'homme de Neandertal. Mais auparavant, faisons un rapide bilan des connaissances paléontologiques ayant conduit à cette hypothèse sur l'ancêtre commun.

Deux vagues de peuplement

Si l'on considère le continent européen, il semble qu'il y ait eu au moins deux vagues d'immigration du genre *Homo* dans la période allant du Pléistocène inférieur tardif, il y a 1,2 million d'années, jusqu'au milieu du Pléistocène moyen, il y a environ 600 000 ans. La première vague est attestée par la présence, jusqu'à ce jour constatée uniquement sur le territoire espagnol, de l'espèce *Homo antecessor*. Des restes fossiles de cet hominidé ont été trouvés sur deux sites de la Sierra de Atapuerca près de Burgos, dans le Nord de la péninsule Ibérique; il s'agit du niveau TE9 de la Sima del Elefante, daté à environ 1,2 million d'années, et du niveau TD6 de la Gran Dolina, qui remonte à quelque 780 000 ans. L'établissement de *Homo antecessor* sur le continent européen semble avoir marqué un coup



2. LES RAISONS DU SUCCÈS ÉVOLUTIF de *Homo heidelbergensis* résidaient peut-être dans la capacité de cet hominidé à construire des bifaces et d'autres outils de style acheuléen.

d'arrêt il y a environ 600 000 ans, en raison de changements climatiques marqués, en particulier la glaciation dite « stade isotopique 16 » (nommée ainsi car son existence a été déduite de la variation du rapport d'isotopes de l'oxygène dans des sédiments marins).

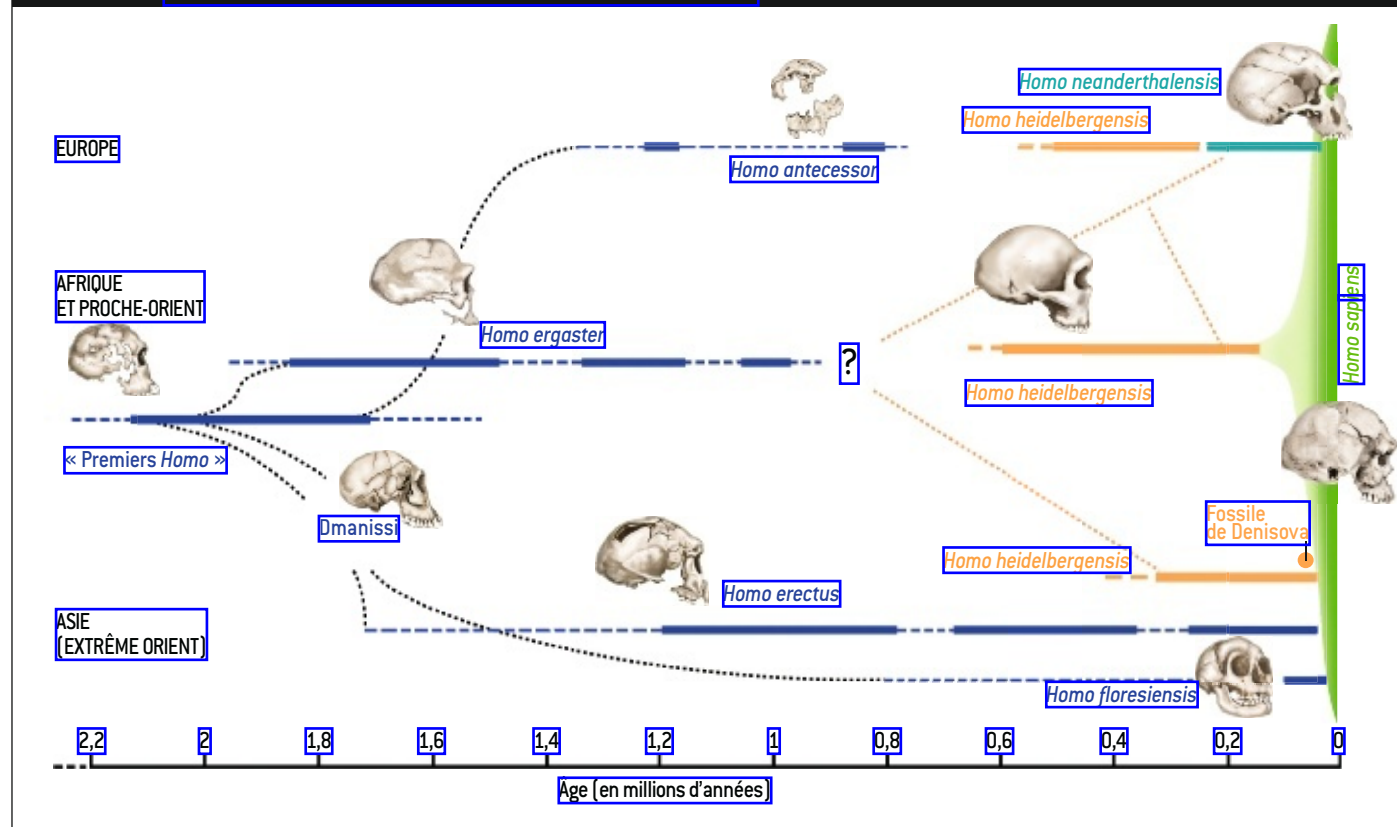
On trouve ensuite dans toute l'Europe des signes d'une seconde vague de peuplement. Cette fois, elle est l'œuvre de formes humaines différentes et plus évoluées du point de vue de la morphologie

squelettique, avec des signes évidents d'encéphalisation (c'est-à-dire d'augmentation du volume du cerveau). On attribue généralement ces restes à l'espèce *Homo heidelbergensis*, qui est le plus souvent associée à des objets caractéristiques de l'Acheuléen (un style de taille des pierres typique d'une grande partie du Paléolithique, de 1,76 à 0,3 million d'années avant le présent).

Les représentants les plus importants de cette seconde vague proviennent d'un autre site de la Sierra de Atapuerca, nommé Sima de los Huesos (« Gouffre aux os »). On y a découvert des fossiles décomposés mais bien conservés d'une trentaine d'individus, datant d'environ 400 000 à 300 000 ans. La morphologie du squelette, et en particulier du crâne, permet de décrire cette forme humaine comme anténéandertalienne, dans le sens où non seulement elle précède les Néandertaliens sur leur propre territoire, mais où elle en anticipe aussi de nombreux caractères morphologiques.

Homo antecessor et *Homo heidelbergensis* sont donc candidats pour occuper la même position dans l'arbre de l'évolution humaine, suivant des modèles opposés. Selon un premier modèle, les paléontologues espagnols qui travaillent sur le site

L'ARBRE ÉVOLUTIF DU GENRE *HOMO*



d'Atapuerca considèrent *Homo antecessor* comme l'espèce ancestrale qui a conduit, d'une part, à l'évolution du Néandertalien en Europe et, d'autre part, à l'apparition de notre espèce en Afrique, en postulant une migration de *Homo antecessor* à partir de l'Afrique qui reste à démontrer.

C'est un autre modèle qui a notre faveur : nous pensons que *Homo antecessor* s'est éteint à la suite de la glaciation du « stade isotopique 16 », et que le rôle crucial du dernier ancêtre commun revient ainsi à *Homo heidelbergensis*.

Dans un certain sens, les sites d'Atapuerca peuvent offrir les indices nécessaires pour résoudre cette ambivalence, puisqu'ils ont permis de découvrir des échantillons fossiles importants des deux espèces. Toutefois, il faut souligner que d'après les restes de la Sima de los Huecos, *Homo heidelbergensis* semble avoir une forte identité régionale (européenne), avec une morphologie qui anticipe celle des Néandertaliens, mais qui ne permet pas d'assumer aussi le rôle d'ancêtre de la lignée évolutive africaine ayant donné naissance à *Homo sapiens*.

Il existe cependant en Europe d'autres fossiles (tel le crâne de Ceprano, dans le

Sud du Latium) qui, bien qu'il soient contemporains des restes d'Atapuerca, selon les datations récentes, ne présentent pas de traits morphologiques allant dans le sens néandertalien ; ils pourraient au contraire représenter le type morphologique ancestral de *Homo heidelbergensis*, qui aurait été le dernier ancêtre commun avant la divergence entre la lignée évolutive des Néandertaliens (en Europe) et celle de l'homme moderne (en Afrique).

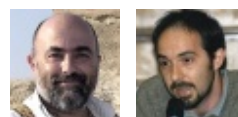
Une lacune entre 900 000 et 600 000 ans

Si l'on se tourne vers l'Afrique, on remarque que des fossiles vieux d'environ un million d'années, tels ceux originaires principalement de la Corne de l'Afrique (à Bouri en Éthiopie et à Buya en Érythrée), présentent encore plus de ressemblances avec *Homo ergaster*, l'hominidé archaïque de ce continent. Dans ces mêmes régions d'Afrique orientale (Bodo en Éthiopie, Kabwe en Zambie et d'autres), certains fossiles datant de quelque 600 000 ans peuvent en revanche constituer une variété africaine du même *Homo heidelbergensis* que nous trouvons en Europe, même si, à la différence de leurs contemporains européens, les fossiles africains de cette phase sont dépourvus de caractères néandertaliens.

Il existe toutefois une lacune dans le registre fossile : entre 900 000 et 600 000 ans, c'est-à-dire entre les derniers *Homo ergaster* et les premiers *Homo heidelbergensis* africains, les restes fossiles humains dans toute l'Afrique subsaharienne sont peu nombreux ou absents. Nous ignorons donc quand, comment et où sont apparues les différences entre les dernières populations de *Homo ergaster*, antérieures à 900 000 ans, et celles de *Homo heidelbergensis*, postérieures à 600 000 ans. Pourraient-elles indiquer une origine non africaine de cette dernière espèce ?

Quoi qu'il en soit, un phénomène crucial pour l'évolution du genre *Homo* s'est produit il y a entre un million d'années et 500 000 ans. Ce phénomène présente un caractère général. Il peut être observé en dehors de l'Afrique, en Eurasie, où l'on retrouve des différences chez les derniers représentants des formes humaines les plus archaïques, filles de la première migration hors d'Afrique, à savoir *Homo erectus* en Asie et *Homo antecessor* en Europe, d'une part, et l'espèce humaine

LES AUTEURS



Giorgio MANZI enseigne la paléanthropologie au Département de biologie environnementale de l'Université La Sapienza de Rome, où il dirige le Musée d'anthropologie Giuseppe Sergi.

Fabio DI VINCENZO, naturaliste et paléontologue, est doctorant en biologie animale à l'Université La Sapienza de Rome.

L'histoire du genre *Homo* avant l'apparition de l'homme moderne, *Homo sapiens*, survenue en Afrique subsaharienne il y a environ 200 000 ans, est caractérisée par au moins deux différentes radiations adaptatives qui se sont combinées avec autant d'expansions géographiques. La première de ces radiations, connue sous le nom de *Out of Africa 1*, est celle qui pourrait avoir été à l'origine du premier peuplement d'Europe (*Homo antecessor*), de l'évolution en Afrique de *Homo ergaster* et en Asie de *Homo erectus*, sans négliger le cas très particulier des « hobbits » de l'île de Flores, dans l'archipel de la Sonde, en Indonésie (*Homo floresiensis*).

On peut en revanche interpréter la seconde radiation comme l'expansion d'une espèce unique (*Homo heidelbergensis*), dont les populations en Europe, Afrique et Asie continentale se sont différenciées au fil du temps, jusqu'à l'apparition en Europe des Néandertaliens (*Homo neanderthalensis*) et, en Afrique, de notre espèce. Les fossiles découverts dans divers sites clés (par exemple Dmanissi dans le Caucase et Denisova en Sibérie) permettent de dénouer quelque peu les fils de cet enchevêtrement compliqué, grâce à leur morphologie, leur datation et leur situation géographique (dans le cas de Dmanissi) ou grâce aux inférences fondées sur l'analyse de l'ADN extrait des restes fossiles (dans le cas de Denisova).

JESSE BOYD

BIBLIOGRAPHIE

G. Manzi, Before the emergence of *Homo sapiens* : Overview on the Early-to-Middle Pleistocene fossil record (with a proposal about *Homo heidelbergensis* at the subspecific level), *International Journal of Evolutionary Biology*, vol. 2011, article 582678, 2011.

A. Mounier et al., The stem species of our species : A place for the archaic human cranium from Ceprano, Italy, *PLoS ONE*, vol. 6(4), e18821, 2011.

G. Manzi et al., The new chronology of the Ceprano calvarium (Italy), *Journal of Human Evolution*, vol. 59, pp. 580-585, 2010.

H. de Lumley, La grande histoire des premiers hommes européens, Odile Jacob, 2007.

P. Rightmire, The human cranium from Bodo : evidence for speciation in the Middle Pleistocene ?, *Journal of Human Evolution*, vol. 31, pp. 21-39, 1996.

dérivée morphologiquement qui leur succède, *Homo heidelbergensis*. (On laisse de côté les cas particuliers tels que celui des «hobbits» de l'île de Flores, en Indonésie.)

Ainsi, la chronologie, la position phylogénétique et la dynamique évolutive liées à *Homo heidelbergensis*, vu comme une espèce unique à vaste répartition, restent obscures. Un possible éclairage figure dans les résultats obtenus récemment par l'analyse de l'ADN mitochondrial (ADN circulaire constituant le génome des mitochondries des cellules) extrait d'une phalange humaine isolée provenant de la grotte de Denisova, sur les monts Altaï, dans le Sud de la Sibérie.

Cette phalange est beaucoup plus récente que les époques que nous avons évoquées, puisqu'elle est datée entre 48 000 et 30 000 ans, et elle a été trouvée en association avec des industries pouvant se rapporter tant au Paléolithique supérieur qu'au Paléolithique moyen, attribuables à *Homo sapiens* ou à *Homo neanderthalensis*. Mais, de façon surprenante, l'ADN mitochondrial a révélé que, du point de vue génétique, le propriétaire de la phalange de Denisova n'appartenait pas à l'une de

ces deux espèces, mais plutôt à une espèce différente, encore dépourvue de nom, qui aurait partagé avec les autres un ancêtre ayant vécu il y a entre un million d'années et 500 000 ans.

Une phalange récente à Denisova

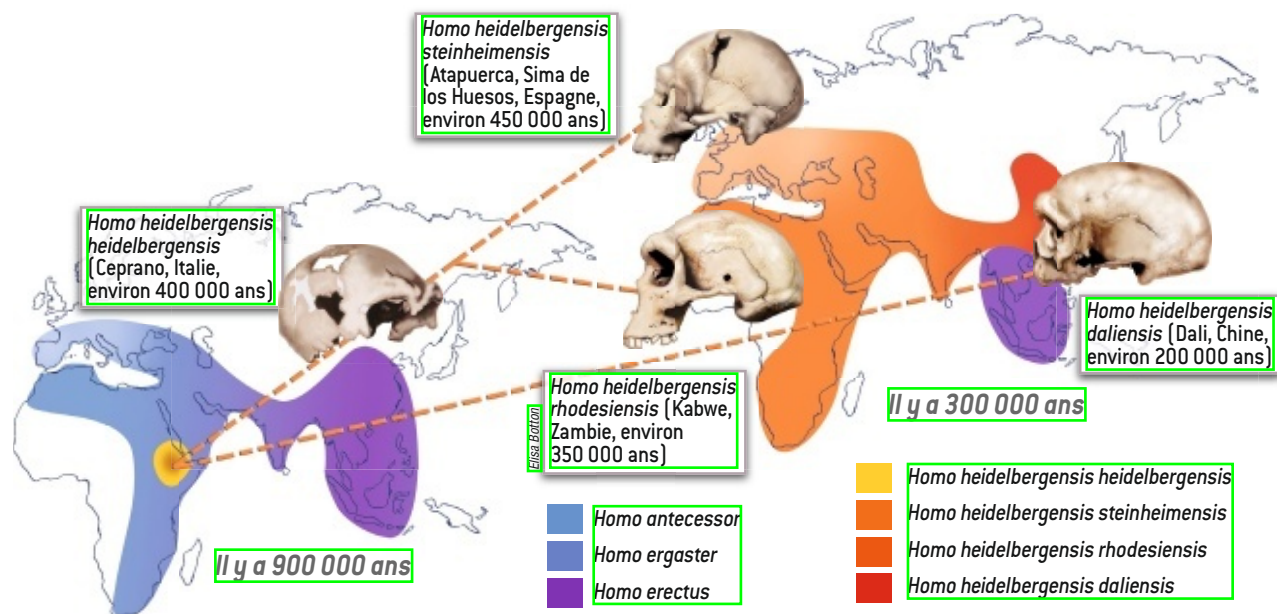
On peut supposer que cette découverte est à mettre en relation avec un peuplement de l'Asie continentale qui se distingue de celui de l'espèce humaine asiatique par excellence, *Homo erectus* (présent en Chine et dans l'île de Java). En supposant en effet que cette dernière soit en rapport avec la première migration hors d'Afrique (survenue avant 1,5 million d'années, tandis que l'origine de la phalange des monts Altaï inscrite dans l'ADN remonte à un million d'années ou moins), *Homo erectus* ne peut pas être l'espèce dont dérivent les hommes de Denisova.

Pour trouver en Asie un ancêtre possible de celui à qui appartenait cette phalange, nous devons nous tourner vers des populations humaines qui ont coexisté avec *Homo erectus* au Pléistocène moyen, popu-

lations représentées par des fossiles tels que ceux de Dali ou de Jinniushan, que certains chercheurs attribuent à *Homo heidelbergensis*, précisément.

Ces données paléogénétiques et d'autres indiquent en outre, comme nous l'avons déjà évoqué, que les lignées évolutives ayant donné naissance à *Homo sapiens* en Afrique et à *Homo neanderthalensis* en Europe se sont séparées il y a environ 500 000 ans. Ce résultat confirme des conclusions précédentes, initialement issues de l'étude de la morphologie squelettique et de la paléogéographie, qui suggéraient des phénomènes d'isolement et de divergence évolutive entre les lignées africaines et européennes durant une bonne partie du Pléistocène moyen. Tout cela semble exclure *Homo antecessor* – et d'autres formes humaines «archaïques» telles que *Homo ergaster* et *Homo erectus* – du rôle de dernier ancêtre commun aux Néandertaliens et à notre espèce, et au contraire favoriser l'hypothèse que c'est *Homo heidelbergensis* qui occupe cette place cruciale dans l'évolution du genre *Homo*.

Des analyses ultérieures sur les ossements de Denisova, notamment l'extraction d'ADN nucléaire de la phalange et la



3. HOMO HEIDELBERGENSIS À LA CONQUÊTE DU MONDE. Ces deux cartes retracent l'histoire de l'évolution de *Homo heidelbergensis*. Probablement apparue il y a moins d'un million d'années (en Afrique ?), cette espèce humaine s'est étendue géographiquement et a remplacé les espèces plus archaïques (*Homo ergaster*, *Homo erectus*, *Homo antecessor* et sans doute d'autres encore), descendantes directes de la première expansion humaine survenue au Pléistocène inférieur. Il y a environ 600 000 ans, des popu-

lations de *Homo heidelbergensis* se sont établies de façon de plus en plus stable dans de nouveaux territoires et ont connu des phénomènes d'évolution locale, en concomitance avec des changements climatiques abrupts (périodes glaciaires et interglaciaires). Ainsi, il y a 300 000 ans environ, on enregistre la présence de variantes de *Homo heidelbergensis* (des sous-espèces ?) en Europe, Afrique et Asie, caractérisées par des morphologies squelettiques désormais bien différenciées.

L'homme du Lazaret, entre 190 000 et 120 000 ans

Signalée dès 1821, la grotte du Lazaret est située dans la banlieue Est de Nice, sur le versant occidental du mont Boron, à 100 mètres de la mer. Long d'une quarantaine de mètres et large d'une vingtaine, ce site du Paléolithique moyen est fouillé depuis 1950 et a déjà fourni plusieurs restes fossiles qui renseignent sur le groupe humain ayant précédé les Néandertaliens sur le littoral méditerranéen : des *Homo erectus* évolués, ou *Homo heidelbergensis*.

Le 13 août 2011, les fouilles ont mis au jour une pièce importante sur un sol d'occupation acheuléen de cerfs, de bouquetins et d'aurochs : une portion antérieure, ou frontal, d'un crâne de *Homo heidelbergensis*, daté d'environ 170 000 ans.

La grotte du Lazaret a été occupée entre 190 000 et 120 000 ans, tout au long de l'avant-dernière grande période froide (stade isotopique 6), par des groupes de chasseurs qui y installaient, à intervalles plus ou moins réguliers, des habitats de longue durée, des campements saisonniers temporaires, des haltes de chasse ou parfois de simples bivouacs. En l'absence de l'homme, de grands carnivores pouvaient occuper la caverne.

Essentiellement chasseurs de cerfs dans les grandes forêts qui recouvraient alors la plaine de Nice, les occupants de la grotte pouvaient aussi traquer le bouquetin sur les pentes escarpées du mont Boron, abattre des aurochs dans les espaces découverts, et occasionnellement l'éléphant ou le rhinocéros.

La découverte du frontal de crâne représente le 24^e reste humain recueilli au cours de 50 années de fouilles dans la grotte. Il s'agit d'éléments osseux toujours fragmentés : restes crâniens dont un pariétal d'enfant, 16 dents définitives et déciduales, un humérus et trois éléments de fémur. Ces restes humains fossiles ont été mis au jour dans plusieurs niveaux d'occupation.

Le frontal, Lazaret 24, que nous avons nommé Akidaya (« d'ici et d'ailleurs » en niçois), a été mis au jour sur un sol d'occupation acheuléen, l'unité archéostratigraphique

UA 28. Ce niveau correspond à un campement saisonnier temporaire d'hiver, extrêmement riche, sur lequel ont été découverts, associés à un foyer, situé près de l'entrée de la grotte, immédiatement en arrière du porche : 29 bifaces, outils caractéristiques des cultures acheuléennes ; trois hachereaux ; une vingtaine de galets aménagés ; de nombreux petits outils retouchés, dont une limace de belle facture ; d'abondants éclats bruts de taille associés à un très grand nombre d'ossements fracturés de grands herbivores, ossements qui correspondent à des déchets culinaires.



Le frontal d'un *Homo heidelbergensis* (ou *Homo erectus* européen), découvert dans la grotte du Lazaret. Datée de 170 000 ans et ayant probablement appartenu à une jeune adulte, cette pièce fossile a été dénommée Akidaya (« d'ici et d'ailleurs », en niçois).

Les ossements de grands mammifères comprennent essentiellement des cerfs, des bouquetins, des aurochs et des ossements de carnivores plus rares : loup, lynx, chat sauvage et ours des cavernes. Sur ce sol d'occupation, la proportion d'aurochs, plus élevée que dans les niveaux plus récents, indique une plus grande extension des espaces découverts et un recul de la forêt. L'association des faunes et l'étude des pollens indiquent un climat assez froid et humide (stade isotopique 6.4).

Akidaya apporte un complément d'informations significatives sur l'attribution de ces restes au groupe des Anténéandertaliens, ou *Homo heidelbergensis*, qui a précédé l'homme de Neandertal sur les côtes de la Méditerranée. Ces Anténéandertaliens sont contemporains

des *Homo erectus* asiatiques avec lesquels ils partagent de nombreux traits.

Le frontal mis au jour est fuyant, faiblement courbé dans le plan sagittal. Il présente un bourrelet (torus) discontinu au-dessus des orbites, avec une dépression médiane glabellaire (entre les deux arcades sourcilières). La largeur frontale minimale en arrière de ce torus est faible. Par ailleurs, les orbites sont séparées par un large espace. Ces caractéristiques rappellent la morphologie des crânes de *Homo erectus*. Chez les Néandertaliens, cette région se différencie par

d'un cannibalisme peu vraisemblablement alimentaire, mais probablement rituel. Les analyses ultérieures permettront de le préciser.

Le frontal d'Akidaya peut être replacé dans le cadre de l'évolution des *Homo erectus* européens ou *Homo heidelbergensis*, des Anténéandertaliens qui se caractérisent tous par une dépression glabellaire au dessus de la racine du nez, un large espace interorbitaire, qui correspond à une zone olfactive développée, et un fort rétrécissement postorbitaire. Il peut être rapproché de l'homme de Taubert, dont les fossiles ont été découverts lors de nos fouilles à partir de 1964 et qui est daté de 450 000 ans, de l'homme de Ceprano daté entre 430 000 et 385 000 ans, de ceux de la Sima de los Huesos, environ 300 000 ans, et de celui de Biache Saint-Vaast daté d'environ 220 000 ans.

A mesure de l'évolution de ces individus, la profondeur de la dépression glabellaire diminue et la capacité crânienne augmente. Chez les Néandertaliens, à partir de 120 000 ans, la dépression glabellaire disparaît et le torus sus-orbitaire constitue une visière continue. L'écaille frontale s'élargit et la capacité globale du crâne augmente jusqu'à atteindre celle des hommes modernes ; néanmoins, les lobes frontaux du cerveau restent nettement plus petits en volume que ceux des hommes modernes. Le développement frontal ne sera atteint qu'avec les populations modernes, aux environs de 30 000 ans en Europe.

Des caractères communs aux Anténéandertaliens et aux Néandertaliens, par exemple l'absence de fosse canine sur un maxillaire massif et prognathe, permettent de penser que les *Homo heidelbergensis* annoncent les Néandertaliens. Ces derniers correspondent donc à une évolution ultime de la lignée des *Homo erectus* européens.

un torus sus-orbitaire massif, continu, sans dépression glabellaire médiane.

Les indentations de la suture fronto-pariétale d'Akidaya sont libres, sans trace de synostose (soudure des os), ce qui indique un individu adulte jeune, de moins de 25 ans. Comparé avec d'autres frontaux, il apparaît légèrement plus gracile et correspondrait à un individu de sexe féminin.

Le frontal du Lazaret indique ainsi qu'à Nice, il y a 170 000 ans, vivaient encore des *Homo heidelbergensis* ou *Homo erectus* européens, qui n'étaient pas encore des Néandertaliens.

L'os frontal humain peut lui aussi être considéré comme un de ces déchets culinaires, des traces de découpage et de raclage sont visibles à l'œil nu. Dans ce cas, il s'agit

Henry et Marie-Antoinette de Lumley

Laboratoire départemental de Préhistoire du Lazaret, Nice

découverte d'une molaire supérieure, ont confirmé que l'homme (ou la femme) de Denisova et la population à laquelle il appartenait avaient une morphologie dentaire archaïque. En revanche, d'après l'ADN nucléaire extrait, l'homme de Denisova aurait plus de liens de parenté avec les Néandertaliens que ne semble le suggérer l'étude du seul ADN mitochondrial. C'est comme s'il s'était produit un échange génétique continu à travers l'Eurasie entre les ancêtres des Néandertaliens (distribués principalement en Europe) et ceux des hominins de Denisova (en Asie continentale) pendant une bonne partie du Pléistocène moyen.

Il semblerait donc, au vu de ce que nous avons exposé jusqu'ici, qu'au cours des 15 à 20 dernières années, si l'on prend pour

référence l'analyse du crâne de Bodo (trouvé sur le site de Middle Awash en Éthiopie) publiée en 1996 par Philip Rightmire, aujourd'hui à Harvard, *Homo heidelbergensis* a acquis un rôle central dans notre arbre évolutif, contribuant à une sorte de marginalisation d'espèces plus connues, telles que *Homo erectus*, ou de nouveaux protagonistes, comme *Homo antecessor*. Il donna ainsi de fait une identité précise à ce nombre croissant de fossiles que, il y a une vingtaine d'années encore, nous cataloguions sous l'étiquette improbable de *Homo sapiens* archaïque. De même, nous avons constaté qu'il s'agit d'une espèce répartie tant en Afrique qu'en Europe, et qu'en fin de compte elle est bien représentée pour une bonne partie du Pléistocène moyen.

Nous avons donc dû nous rendre à l'évidence : les premiers pas de cette espèce, cruciale pour les origines tant de *Homo sapiens* que des Néandertaliens, sont encore nébuleux. Nous ne savons ni où, ni quand, ni selon quelles modalités et sous quelle morphologie *Homo heidelbergensis* a trouvé son origine.

Homo heidelbergensis, des origines obscures

Certes, nous avons été aidés, presque rétrospectivement vu sa datation, par l'ADN de la phalange de Denisova, qui indique que les origines de *Homo heidelbergensis* remontent à au moins un million d'années. Mais il existe une autre pièce

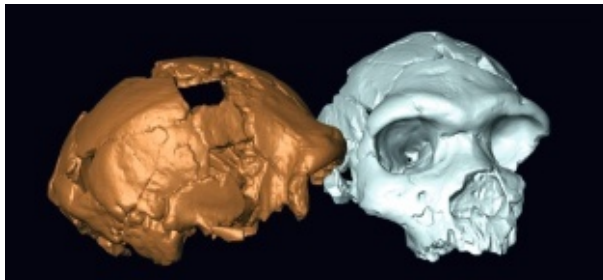
DES SOUS-ESPÈCES DE *HOMO HEIDELBERGENSIS* ? POURQUOI PAS !

Si, par *Homo heidelbergensis*, on entend une espèce unique répartie tant en Afrique qu'en Eurasie pour une bonne partie du Pléistocène moyen, il faut s'attendre à ce qu'elle manifeste une grande variabilité, à l'intérieur de laquelle on reconnaît des lignées évolutives régionales. Se

référer à elle comme à un tout sans distinctions ultérieures pourrait donc être trompeur. Par ailleurs, la morphologie des fossiles suggère le maintien d'un lien génétique entre les différentes populations, qui exclut le fractionnement en espèces distinctes. On peut donc voir cette « huma-

nité intermédiaire » comme une grande et unique espèce, dont la cohésion a été maintenue par des phénomènes de diffusion et de flux de gènes, mais qui s'est différenciée en variétés géographiques ou chronologiques – autrement dit, en sous-espèces. Certaines de ces lignées

ont donné lieu à des espèces naissantes (en accord avec la définition même de sous-espèce), puis à des espèces distinctes, comme dans le cas de *Homo sapiens*. En 2011, G. Manzi a proposé de subdiviser l'espèce *Homo heidelbergensis* en quatre sous-espèces.



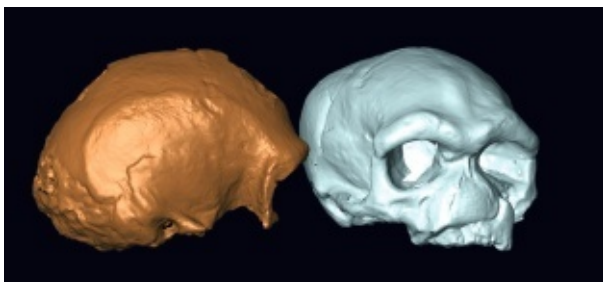
Homo heidelbergensis heidelbergensis

La variété ancestrale, inconnue dans sa fraction la plus ancienne, comprend des fossiles africains et européens qui ne manifestent pas de traits cranio-faciaux dérivés. Parmi eux, la pièce sans doute la plus significative est le crâne de Ceprano, où se combinent une architecture résolument archaïque et de très légers traits dérivés, mais pas en direction des formes néandertaliennes.



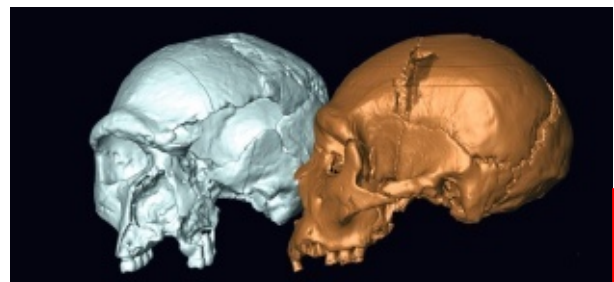
Homo heidelbergensis rhodesiensis

Il s'agit ici de la variété dérivée africaine, dont le parcours évolutif a conduit à l'espèce *Homo sapiens*. Elle comprend notamment le fossile qui donne son nom à la sous-espèce : celui de Kabwe, dans l'ex-Rhodésie, aujourd'hui la Zambie. Cette sous-espèce inclut aussi des formes plus récentes comme Irhoud, découverte au Maroc.



Homo heidelbergensis daliensis

C'est la variété dérivée en Asie ; elle inclut des fossiles « non erectus » tels ceux trouvés à Dali et Jinniushan, en Chine, et est probablement à l'origine de la population à laquelle appartenait l'homme (ou la femme) de Denisova.



Homo heidelbergensis steinheimensis

La variété dérivée européenne ou anténéandertaliennne inclut des restes fossiles et des morphologies tels ceux documentés à la Sima de los Huesos d'Atapuerca, en Espagne, et dans d'autres sites.

fossile qui peut nous en apprendre davantage, cette fois sur la morphologie probable des premiers *Homo heidelbergensis*. Il s'agit d'un crâne mis au jour (en plusieurs fragments) à Ceprano, dans le Sud du Latium, sur la rive d'un lac qui n'existe plus et qui avait comme affluent la version ancienne du fleuve Sacco actuel. Ce fossile, découvert en 1994 à Campo Grande, à moins d'une centaine de kilomètres au Sud-Est de Rome, a été soumis depuis à diverses études.

En outre, des fouilles systématiques ont été entreprises depuis 2001 sous la direction de Italo Biddittu et l'un d'entre nous (G. Manzi) dans la région de Ceprano, avant tout pour vérifier la datation proposée à l'époque de la découverte, à savoir 800 000 à 900 000 ans. D'après les résultats de ces fouilles, publiés en 2010, le crâne de Ceprano est plus jeune que ne le supposaient les premières hypothèses avancées. L'âge suggéré par l'ensemble des données est en effet approximativement de 400 000 ans ; plus précisément, il se situe dans l'intervalle compris entre 430 000 et 385 000 ans. Cela correspondait à une période de climat tempéré, au cours de laquelle le grand lac qui occupait une grande partie du bassin de Ceprano se retirait et laissait place à des zones marécageuses et au cours calme d'un fleuve sinueux.

Ce résultat inattendu a conduit les auteurs (G. Manzi et ses collègues) de la nouvelle estimation chronologique à commenter dans leur article de 2010 : « La morphologie du fossile de Ceprano [...] qui ne semble pas avoir de correspondants contemporains où que ce soit sur le continent européen, apparaît intéressante dans la mesure où elle accroît fortement et de façon inattendue le niveau de diversité morphologique des populations européennes du Pléistocène moyen. » Cela suggérerait la possibilité d'envisager des « scénarios plus complexes pour l'évolution humaine en Europe, qui prennent en compte soit une variabilité intraspécifique considérable [...], soit la coexistence de différentes lignées évolutives ».

Depuis, de nouvelles analyses ont été réalisées sur la morphologie du crâne de Ceprano, dans un cadre comparatif le plus large possible et à la lumière de la nouvelle chronologie. En particulier, une étude publiée par Aurélien Mounier, de l'Université de la Méditerranée à Marseille, et ses collègues confirme les conclusions auxquelles étaient parvenues des recher-



ches précédentes. Résumons-les dans les grandes lignes. Avant tout, certains traits architecturaux de l'homme de Ceprano sont archaïques et similaires à ceux de *Homo erectus* en Asie et de *Homo ergaster* en Afrique ; mais en même temps, il existe divers caractères discrets qui rapprochent le crâne italien de la variabilité des êtres humains du Pléistocène moyen, c'est-à-dire de *Homo heidelbergensis*. Enfin, le fossile de Ceprano ne montre aucun caractère dérivé dans le sens néandertalien et il apparaît davantage similaire aux fossiles contemporains que l'on découvre en Afrique, que des fossiles européens.

Le crâne de Ceprano réunit donc dans une seule pièce une mosaïque de caractères archaïques et évolués, africains et eurasiatiques. Cela suggère qu'il puisse témoigner d'un peuplement ancestral de *Homo heidelbergensis*, dont la morphologie crânienne s'est ensuite modifiée en Europe, acquérant une particularité distincte dans le sens néandertalien, tandis qu'elle a été conservée partiellement en Afrique et en Asie continentale.

Ainsi, l'homme de Ceprano, à la lumière de la nouvelle estimation chronologique qui lui confère un âge réduit de moitié par rapport aux datations précédentes, ne perd pas de son intérêt. Bien au

4. LA MÂCHOIRE DE MAUER. Découverte en 1907 à Mauer, près de Heidelberg en Allemagne, cette mandibule date d'environ 500 000 ans. C'est à partir de ce vestige qu'a été définie et nommée l'espèce *Homo heidelbergensis*. Cet ossement est resté pendant pratiquement tout le XX^e siècle le plus ancien fossile humain trouvé en Europe.

contraire, il prend un intérêt nouveau et sans doute plus important encore. Il ne doit plus être considéré dans le cadre du premier peuplement de l'Europe, mais dans celui d'une espèce variable et largement distribuée, qui représenterait le dernier ancêtre commun, avant sa disparition (en raison de spécialisations allopatriques, à savoir des différenciations de nouvel-

LE CRÂNE DE CEPRANO
réunit donc dans une seule pièce une mosaïque de caractères archaïques et évolués, africains et eurasiatiques.

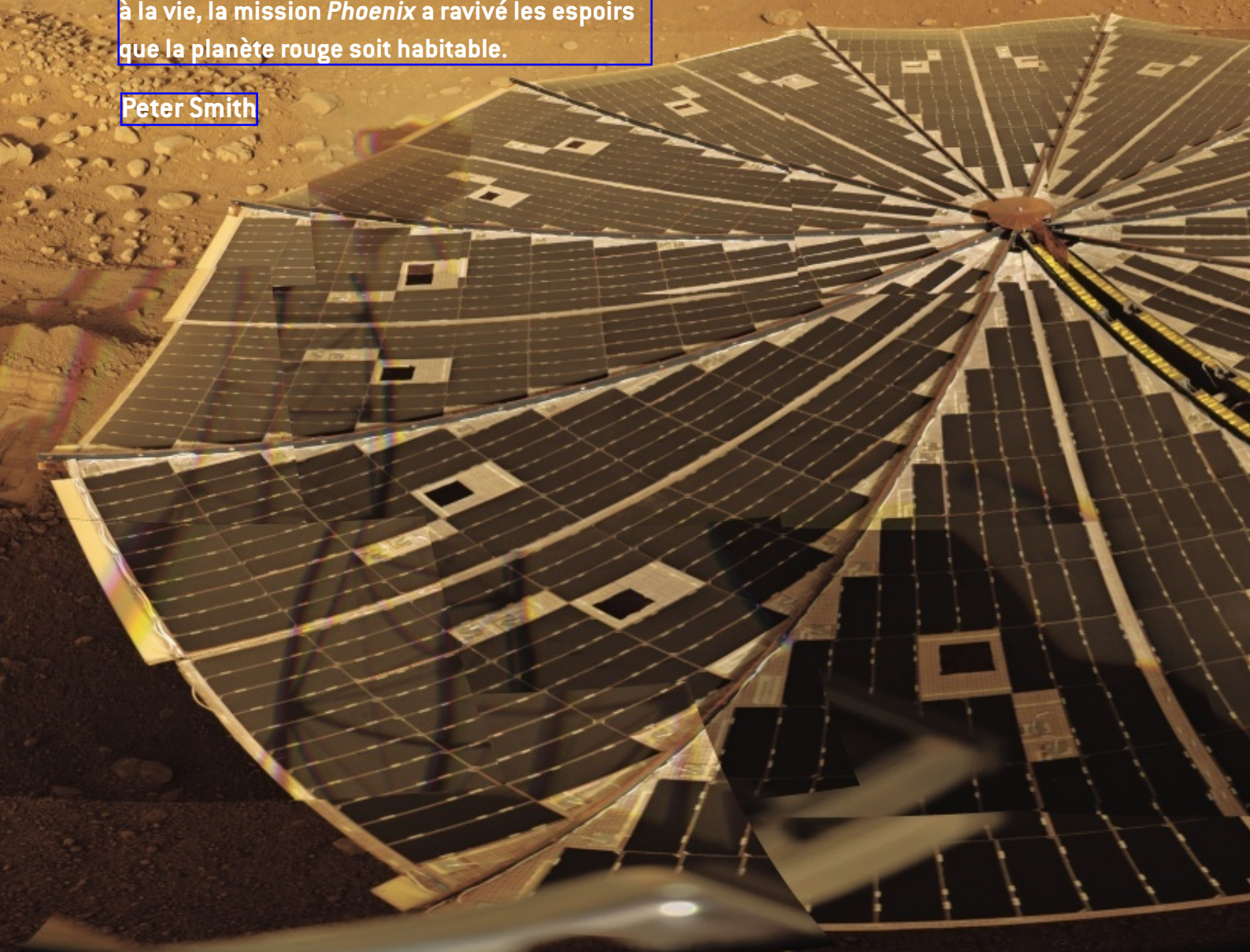
les espèces dues à la séparation géographique des populations), de *Homo sapiens*, *Homo neanderthalensis* et des hommes encore sans nom précis représentés par la phalange de Denisova. Dans ce nouveau contexte, l'homme de Ceprano se pose comme un bon candidat pour représenter le type morphologique ancestral de *Homo heidelbergensis*.

Planétologie

On a creusé sur MARS

En découvrant de la glace d'eau juste sous la surface et des composés propices à la vie, la mission *Phoenix* a ravivé les espoirs que la planète rouge soit habitable.

Peter Smith



L'ESSENTIEL

✓ La mission *Mars Science Laboratory* a décollé en novembre 2011, en emportant la panoplie d'instruments d'analyse la plus complexe jamais envoyée sur Mars.

✓ Ses objectifs ont été en partie déterminés par la mission *Phoenix*, qui a révélé en 2008 que le sol de Mars pourrait ne pas être hostile à la vie, contrairement à ce qu'avaient suggéré les missions *Viking* en 1976.

✓ *Phoenix* a confirmé l'existence de glace d'eau et de carbonate de calcium juste sous la surface, et a aussi découvert des composés inattendus, tels que des perchlorates et de la neige.

NASA/JPL - Caltech, Univ. d'Arizona et Univ. Texas A&M

Le 26 novembre 2011, la mission *Mars Science Laboratory* de la NASA a décollé de cap Canaveral, en Floride, à bord d'une fusée *Atlas V*. En août 2012, après une descente finale à l'aide d'une sorte de « grue volante », le robot d'exploration le plus complexe jamais envoyé sur Mars se posera dans le cratère Gale, au milieu d'un des plus riches dépôts d'argiles et de sulfates de la planète, vestige d'une époque où l'eau était abondante.

De la taille d'une petite voiture, le rover, dénommé *Curiosity*, explorera pendant une année martienne la base du pic central du cratère, qu'on pense être la partie la plus ancienne. Puis il commencera l'ascension de l'empilement de sédiments de cinq kilomètres de haut qui occupe le centre du cratère, en remontant l'évolution géologique jusqu'aux dépôts de l'ère moderne et en scrutant chaque couche à la recherche des minéraux hydratés.

Un bras robotique prélèvera des échantillons et les déposera dans un laboratoire de chimie embarqué. Les instruments d'analyse que celui-ci renferme détermineront la structure minéralogique et la composition élémentaire des roches, et détecteront les matériaux organiques éventuels. Ces analyses tenteront de répondre à la question : Mars a-t-elle été propice à la vie par le passé ?

Mars Science Laboratory est une étape logique dans la suite des missions au sol qui se sont succédé ces 15 dernières années : *Sojourner*, *Spirit* et *Opportunity* et la plus récente, *Phoenix*. Ces missions, ainsi qu'une série de sondes en orbite (les dernières en date étant *Mars Express* et *Mars Reconnaissance Orbiter*), ont révélé une planète à l'histoire complexe, qui a connu une époque humide. Même dans son état actuel désertique et glacial, la planète rouge

1. LA VUE DU SITE D'ATERRISSAGE

de la sonde *Phoenix* montre l'un de ses deux panneaux solaires, au premier plan d'un paysage aux petites roches polygonales typique des régions de pergélisol, sur Mars comme sur Terre.

montre des signes d'activité. Les traces de méthane gazeux détectées au-dessus de la région de Nili Fossae sont parmi les plus intrigants. Ce gaz, s'il existe bien, a-t-il une origine géologique ou biologique ? Cette année, *Mars Reconnaissance Orbiter* a découvert dans l'hémisphère Sud, entre 30 et 50 degrés de latitude, la formation de traces à la surface en été, dont l'explication la plus simple serait le dégagement d'eau saumâtre.

Mais ces espoirs se heurtent aux résultats des missions *Viking* de 1976. Les analyses des deux atterrisseurs jumeaux ont indiqué que Mars était hostile à toute forme de vie. Les sols étaient dépourvus d'eau et de molécules organiques, et à plus forte raison de micro-organismes en sommeil. Des oxydants puissants, tels que le peroxyde d'hydrogène, couplés à un intense rayonnement ultraviolet, stérilisaient la surface. Pour la plupart des scientifiques, la recherche de la vie sur Mars a

commencé avec les missions *Viking*, et s'est achevée avec elles.

Comment concilier ce tableau lugubre avec les indices d'activité de la planète rouge ? La mission *Phoenix* pourrait déterminer la réponse. Ses analyses chimiques menées sur le sol martien, les premières depuis *Viking*, suggèrent une autre interprétation : il est possible que les sondes *Viking* n'aient détecté aucune molécule organique parce qu'elles étaient détruites par la technique d'analyse. En outre, *Phoenix* a découvert de la glace d'eau juste sous la surface. Ni sèche ni stérile, notre voisine pourrait donc être habitable.

Au moment où le rover *Curiosity* s'apprête à assurer la relève, il est temps de revenir sur l'histoire de la mission *Phoenix* et de dresser son bilan.

Ce n'est pas tous les jours que quelqu'un vous propose un vaisseau spatial gratuit. Au début de 2002, des scientifiques de la NASA m'ont rappelé l'existence, dans une

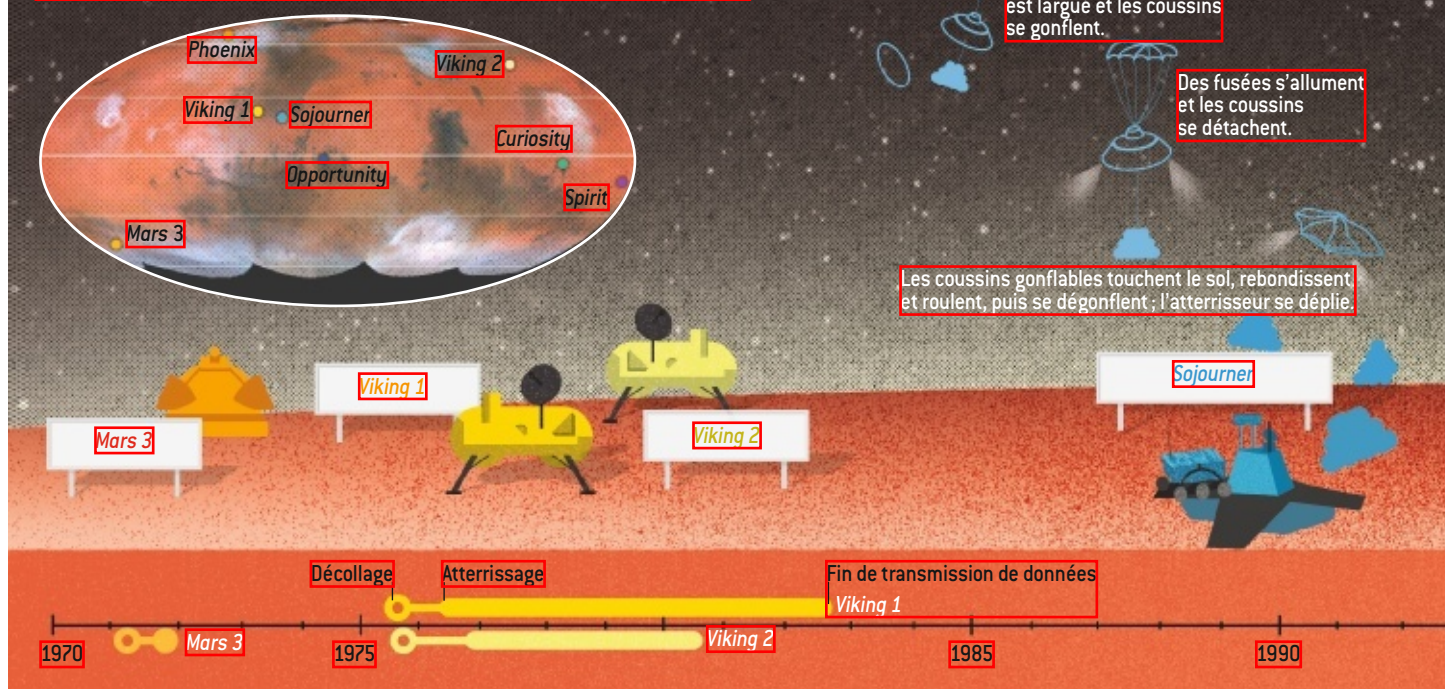
salle blanche du constructeur *Lockheed Martin* à Denver, d'une sonde *Surveyor* en attente. Elle aurait dû être lancée en 2001, mais la NASA avait annulé le vol quand son jumeau, *Mars Polar Lander*, avait été perdu à l'atterrissage en décembre 1999.

Surveyor renaît de ses cendres

Les scientifiques de la NASA voulaient rénover la sonde dans le cadre du nouveau programme *Scout* de l'Agence spatiale et me proposaient d'être le responsable scientifique. J'hésitai. D'un côté, je ressentais toujours l'envie de tirer au clair la question de la vie sur Mars. Au fond de moi-même, je n'ai jamais cru aux résultats des atterrisseurs *Viking*. Pourquoi n'avaient-ils vu aucun matériau organique ? Celui-ci pouvait-il être dissimulé dans un endroit où une mission appropriée saurait le dénicher ?

TROIS FAÇONS DE SE POSER SUR MARS

Sept sondes spatiales ont atterri avec succès sur Mars jusqu'à présent, pour l'essentiel sous les tropiques martiens. *Phoenix* a atterri juste à l'intérieur du cercle Arctique. Se poser en toute sécurité n'est pas chose aisée. L'atmosphère est assez épaisse pour qu'un bouclier thermique soit nécessaire, mais pas assez pour freiner suffisamment la sonde avec un parachute. Les atterrisseurs *Phoenix*, *Viking* et la sonde soviétique *Mars 3 lander* ont utilisé des propulseurs pour leur descente finale ; *Sojourner*, *Spirit* et *Opportunity* ont rebondi sur d'énormes coussins gonflables, et *Mars Science Laboratory (Curiosity)* sera déposée par une sorte de grue volante.



D'un autre côté, aucun objectif scientifique évident n'était défini. La sonde *Surveyor* avait été conçue pour se poser près de l'équateur, recueillir des échantillons de sol avec un bras robotique et déployer un petit rover pour analyser les roches avoisinantes. De nouveaux instruments pouvaient remplacer les anciens, mais pour quels objectifs ?

C'est alors que William Boynton, directeur de l'équipe du spectromètre à rayons gamma du satellite *Mars Odyssey*, a annoncé la découverte de glace d'eau près de la surface autour de la calotte polaire Sud de Mars. Cet instrument détecte en effet les rayons gamma, mais aussi les neutrons, qui indiquent la concentration en hydrogène dans le sol jusqu'à un mètre de profondeur. Des signaux suggéraient aussi la présence d'eau dans les plaines du Nord, notamment une mince couche de sol riche en glace d'eau située à la limite d'extension hivernale de la calotte de glace de dioxyde de carbone.

Il existe sur Terre une zone analogue de sol gelé, ou pergélisol, autour de l'Arctique. C'est le « congélateur » de la planète, qui conserve la trace des formes de vie qui y ont résidé ou qui y ont été apportées par les vents. La glace peut être âgée de plusieurs millions d'années. Eske Willerslev, de l'Université de Copenhague, au Danemark, avait retrouvé les principales branches de l'arbre du vivant en effectuant des analyses d'ADN sur du pergélisol sibérien. Était-il possible d'en faire autant sur Mars ?

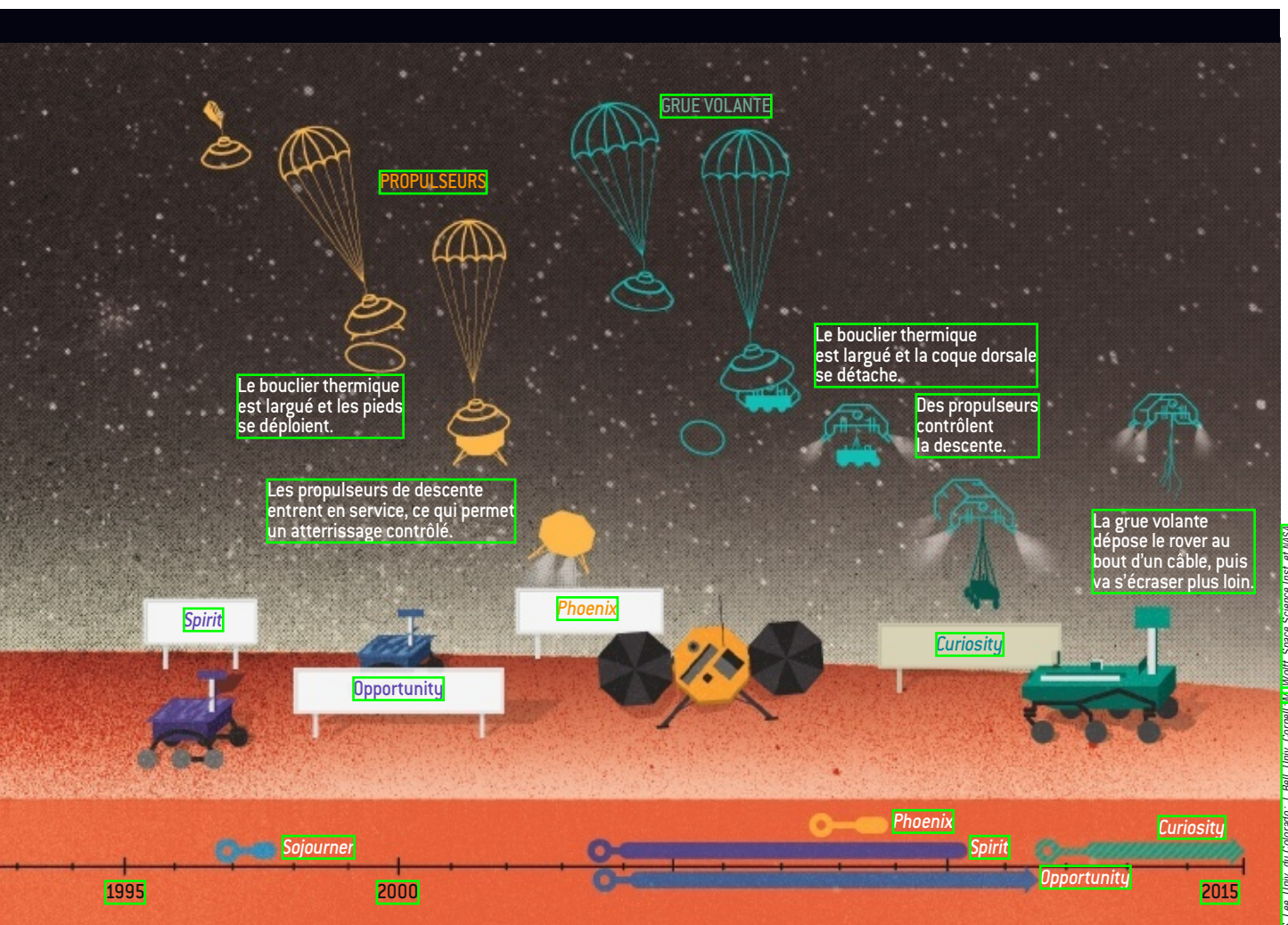
Des anomalies en cascades

J'ai jeté mon dévolu sur les plaines du Nord et commencé à sélectionner les instruments qui permettraient de progresser. J'ai monté un partenariat entre l'Université d'Arizona, le *Jet Propulsion Laboratory* de la NASA, et *Lockheed Martin*. Nous avons nommé *Phoe-*

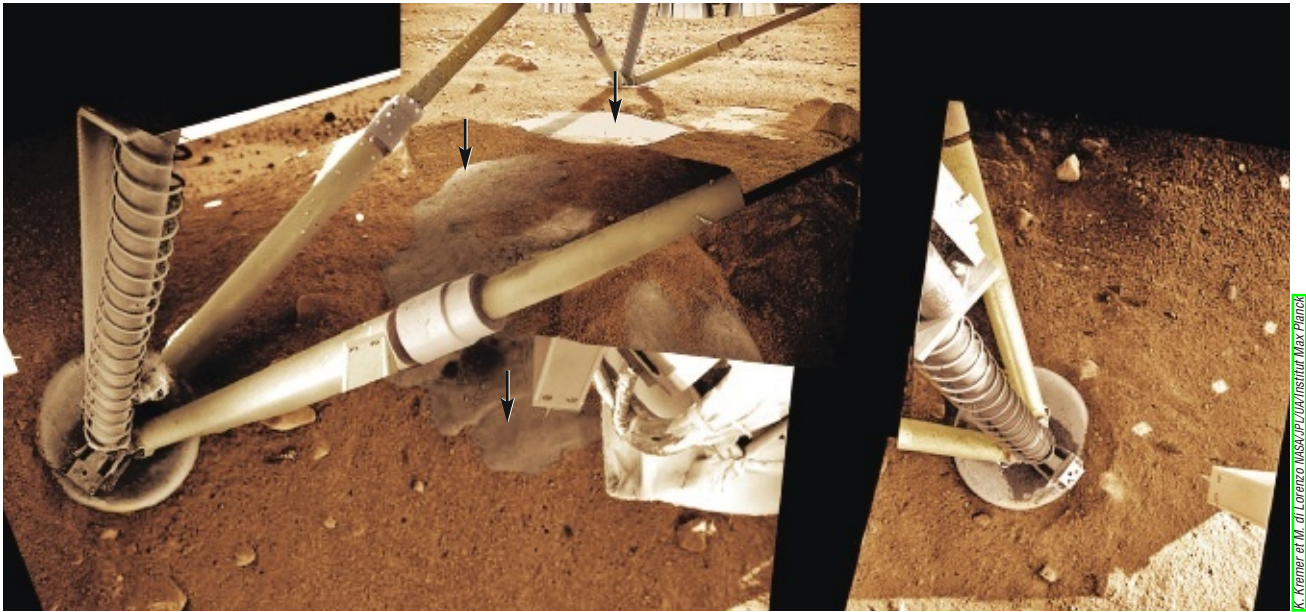
nix cette mission, car la mission *Surveyor* abandonnée revenait à la vie. En août 2003, la NASA a sélectionné notre projet. La date de lancement, fixée à août 2007, nous laissait quatre années pour tout préparer.

Ce temps a été passé à examiner, réviser et tester la sonde *Surveyor* afin de trouver les défauts de conception qui avaient condamné sa jumelle. En tout, nous avons trouvé environ 25 défauts majeurs. Corriger tous ces problèmes a été ardu, mais quand même plus facile et moins coûteux que de construire une nouvelle sonde à partir de zéro. La plupart des problèmes ont été réglés par l'ajout de dispositifs de chauffage, la réduction de la taille du parachute et le renforcement de la structure. D'autres ont nécessité des modifications du logiciel. Un défaut, cependant, a été plus difficile à comprendre et à corriger.

Le radar d'atterrissage provenait d'un avion de chasse F-16 de la fin des années 1990.



S. Les. Univ. du Colorado, J. Bell, Univ. Cornell, M. Wolff, Space Science Inst. et NASA



2. DES TACHES BLANCHES BRILLANTES (flèches) ont été mises en évidence sous la sonde *Phoenix* par le bras robotisé une semaine après l'atterrissage. Il s'agit sans doute de glace d'eau mise à nu quand les propulseurs de descente ont soufflé le sol.

Quand nous avons effectué des tests de largage dans le désert des Mojaves, le système a fait des erreurs graves d'estimation d'altitude et a perdu des données. Nous nous sommes tournés vers les concepteurs du radar, la Société *Honeywell*, mais ils n'ont pas pu nous aider, car ce modèle obsolète n'était plus fabriqué.

En combinant des simulations numériques et de nouveaux tests, l'équipe d'ingénieurs a lentement réparé une à une les anomalies. Un nouveau test, en octobre 2006, fut concluant. Tout semblait en ordre.

Mais nos espoirs furent de courte durée. Nous avons en effet découvert que des reflets sur le bouclier thermique lors du largage pouvaient induire en erreur le radar et entraîner une mauvaise estimation de l'altitude. Les antennes et les interrupteurs se sont eux aussi révélés potentiellement défectueux. Les ennuis semblaient sans fin. En février 2007, cinq mois avant l'intégration de la sonde au véhicule de lancement, nous avions 65 anomalies en cours d'analyse. La NASA s'inquiétait du fait que nous découvrions sans arrêt de nouvelles défaillances.

Cependant, la gravité des anomalies allait diminuant. En juin, nous avons réussi à convaincre les comités d'évaluation que les risques qui subsistaient étaient acceptables. C'était tout de même un pari. D'autres défauts nous avaient peut-être échappé.

En août 2007, nous avons terminé les derniers tests au Centre spatial Kennedy. Un violent orage lors de l'installa-

tion sur le lanceur causa une dernière frayeur, mais, par chance, la sonde ne subit aucun dégât, et le 4 août, de bonne heure, la fusée décolla sans encombre : *Phoenix* était enfin en route vers Mars.

Dix mois plus tard, les équipes d'ingénieurs du JPL et de *Lockheed Martin* préparaient les manœuvres d'atterrissage. *Mars Odyssey* et *Mars Reconnaissance Orbiter* avaient ajusté leurs orbites pour se trouver au-dessus de la zone de descente, afin de relayer les signaux de *Phoenix* (ils arrivaient sur Terre avec une quinzaine de minutes de décalage).

Un atterrissage périlleux

L'atterrissage sur Mars est beaucoup plus complexe que sur la Terre ou la Lune. La sonde doit passer par plusieurs étapes. Au départ, c'est un véhicule de croisière interplanétaire. En larguant l'étage de croisière, se profile un véhicule capable de supporter la chaleur dégagée par le frottement avec l'atmosphère, où il pénètre à près de 20 000 kilomètres par heure. Ralentissant à 1 500 kilomètres par heure, le véhicule d'entrée libère ensuite son parachute. Dans l'atmosphère ténue de Mars, le parachute peut au mieux abaisser la vitesse jusqu'à 150 kilomètres par heure, ce qui est encore beaucoup trop rapide pour se poser en douceur. Un kilomètre au-dessus du sol, l'atterrisseur se sépare du parachute et de la coque pro-

tectrice, et 12 propulseurs ralentissent sa chute jusqu'à une vitesse finale d'une dizaine de kilomètres par heure, tout en réduisant la vitesse transversale à moins d'un mètre par seconde, et en maintenant l'engin parallèle à la surface. Quand l'atterrisseur se pose à la surface, le choc est amorti par des « pieds » spécialement conçus. Enfin, la sonde doit déployer ses panneaux solaires et ses instruments et se préparer pour sa mission. Et tout cela en sept minutes...

Je retins mon souffle pendant la phase finale : nous avions tous à l'esprit les problèmes de radar et la perte de *Mars Polar Lander*. Mais après une interminable descente égrénée par le décompte de l'altitude, un signal arriva de la surface : *Phoenix* s'était posée sans heurts.

Deux heures après – le temps nécessaire pour que *Mars Odyssey* fasse le tour de Mars et repasse au-dessus de la zone d'atterrissage –, la sonde *Phoenix* envoyait la confirmation que ses panneaux solaires avaient bien été déployés, et ses premières images. Le premier aperçu de l'Arctique martien était magique. Des formes polygonales et de minuscules cailloux s'étendaient à perte de vue. Après six ans de préparation, la mission scientifique pouvait commencer.

Notre équipe de 35 chercheurs, 50 ingénieurs et 20 étudiants commença à travailler en continu. Deux équipes assuraient des demi-journées martiennes (soit 12 heures et 20 minutes). Nous nous sommes

ainsi lentement décalés par rapport aux journées terrestres !

La première surprise eut lieu avant même que le bras robotique ait creusé sa première tranchée. Pour vérifier la position du pied arrière, nous avons fait passer le bras sous la sonde, et la caméra a révélé que les propulseurs avaient soufflé la terre sèche sur environ cinq centimètres de profondeur, révélant des taches brillantes, faisant penser à de la glace (*voir la figure 2 ci-contre*) ! Le bras ne pouvait examiner cela de plus près, mais nos attentes vis-à-vis de la première excavation en sortaient renforcées.

Lorsqu'il a commencé à pelleter le sol, le bras robotisé a mis au jour une couche brillante. Des portions de cette couche ont disparu en trois ou quatre jours martiens (ou « sols »). Cela pouvait être de la glace d'eau qui se sublimait, ou de la glace de dioxyde de carbone. Cette dernière aurait cependant dû disparaître plus rapidement à la température ambiante de -30°C . L'instrument TEGA (*Thermal and Evolved-Gas Analyzer*, soit analyseur thermique de gaz évolué) a confirmé par la suite qu'il s'agissait bien de glace d'eau. C'était la première preuve directe de la présence de glace d'eau sur Mars.

La glace exposée suggérait que tout l'environnement de l'atterrisseur – et sans doute les régions polaires entières – n'était pas une plaine désertique sèche comme il y paraissait, mais un champ de glace d'épaisseur inconnue. Trois instruments d'analyse devaient permettre d'analyser cette glace : TEGA, constitué de huit petits fours reliés à un spectromètre de masse qui analyse la composition des gaz s'échappant des échantillons chauffés, WCL (*Wet Chemistry Lab*, ou laboratoire de chimie aqueuse), qui mélange un échantillon du sol avec de l'eau venant de la Terre, puis analyse les ions en solution ; et enfin un microscope.

La priorité était d'étudier la chimie du sol à la recherche des traces d'eau liquide, sans parler de nutriments et autres sources d'énergie disponibles pour d'éventuels micro-organismes. Nous avons aussi tenté d'identifier la stratification du sol jusqu'à l'interface glace-roche. Le bras devait recueillir des échantillons et les placer dans les orifices d'analyse sur le pont de la sonde. En principe, c'est aussi simple que de mettre du sable dans un seau avec une petite pelle ; mais en pratique, manipuler le bras robot à 300 millions de

kilomètres est un vrai défi. Au centre des opérations, à Tucson, dans l'Arizona, un banc d'essai avec une réplique du bras robotisé, des caméras et des ouvertures destinées à accueillir les échantillons nous aidait à préparer les manœuvres. Nous testions toutes les instructions avant de les envoyer sur Mars. Il restait cependant deux aspects que nous ne pouvions pas reproduire : le vent et les propriétés du sol martien.

Tenus en échec par des mottes collantes

Le sol de Mars semblait former une croûte, contrairement aux sols meubles de l'Arizona. Résultat, la pelle du bras robotisé se remplissait de mottes collantes. Or les écrans destinés à empêcher des cailloux d'entrer dans les orifices d'analyse se révélaient aussi très efficaces pour bloquer les mottes ! Le bras a réussi à poser son premier échantillon sur l'ouverture de l'instrument TEGA, mais pas un seul grain n'est descendu jusqu'au four. L'instrument était

L'AUTEUR



Peter SMITH est professeur de planétologie à l'Université d'Arizona, aux États-Unis. Il a notamment travaillé sur les missions robotisées *Mars Reconnaissance Orbiter*, *Sojourner*, *Spirit* et *Opportunity*. Il a reçu la médaille ESAM (médaille de réussite scientifique exceptionnelle) de la NASA.



3. LA COQUE DE PROTECTION DE MARS SCIENCE LABORATORY, lancé le 26 novembre dernier, comporte un bouclier de rentrée atmosphérique plus grand que ceux des capsules *Apollo*.

Des astronautes microscopiques

Des roches extraterrestres ont-elles ensemencé la vie sur la Terre ? Pour tester cette idée, des micro-organismes s'apprentent à faire un aller-retour vers Mars.

Est-il possible que la vie sur Terre vienne de... Mars ? Depuis une vingtaine d'années, cette idée est sortie des livres de science-fiction pour devenir une hypothèse scientifique. On estime qu'une tonne de météorites d'origine martienne tombe chaque année sur Terre. Des micro-organismes auraient pu être transportés par ce biais.

Les impacts qui ont arraché ces roches à la planète rouge sont des événements violents, mais des expériences montrent que certaines espèces peuvent y survivre. En rentrant dans l'atmosphère terrestre, ces roches ne sont chauffées par le frottement que sur une épaisseur de quelques millimètres.

Outre le décollage et l'atterrissage, des micro-organismes survivraient-ils au voyage entre la Terre et Mars, dans le vide glacial de l'espace ? La plupart des météorites martiennes mettent des milliers ou des millions d'années pour rallier la Terre, mais environ une sur dix millions fait le trajet en environ un an. Un micro-organisme peut-il survivre aussi longtemps ?

La sonde *Phobos-Grunt*, lancée le 9 novembre 2011 par l'Agence spatiale russe, devait apporter la réponse. Malheureusement, peu après le lancement, le contact avec la sonde a été perdu. Cependant, à l'heure où ces lignes sont écrites, un premier contact a été rétabli, qui laisse espérer que la mission pourra être sauvée.

L'objectif principal de la mission *Phobos-Grunt* est de se poser sur Phobos, le satellite de Mars, d'y collecter une pelletée de sol et de la ramener sur Terre. Mais la sonde embarque aussi l'expérience LIFE (*Living Interplanetary Flight Experiment*), un échantillon de sol du désert du Neguev, en Israël, qui contient divers micro-organismes. Autour de cet échantillon placé dans un récipient, 30 tubes renferment 10 espèces qui représentent les trois domaines du vivant : les bactéries, les archées et les eucaryotes. Cinq de

ces espèces ont déjà participé à un vol avec l'ultime mission de la navette spatiale *Endeavour* en mai dernier. Présentons les espèces retenues.

Les bactéries

Deinococcus radiodurans survit à d'énormes doses de rayonnements. Au vu des *D. radiodurans* qui ont fait le voyage sur *Endeavour*, je suis presque sûr que leurs cousins survivront au voyage aller-retour vers Phobos. En comparant la robustesse d'individus génétiquement différents, nous espérons mieux comprendre comment ces organismes tolèrent les rayonnements, le dessèchement et le froid extrême.

Alors que *D. radiodurans* tolère l'irradiation sans changer de structure, d'autres bactéries se retranchent dans des coques durcies nommées endospores. L'expérience LIFE en inclut deux. *Bacillus subtilis* est depuis longtemps utilisé comme espèce test dans les vols spatiaux. Il a été démontré que ses endospores, recouvertes d'une mince couche de poussière qui les protège du rayonnement ultraviolet du Soleil, peuvent survivre jusqu'à six ans dans l'espace. Dans l'espace interplanétaire, cependant, le rayonnement le plus dangereux est celui des particules chargées.

L'autre bacille, *B. safensis*, a été découvert il y a dix ans dans le complexe d'assemblage des vaisseaux au Laboratoire JPL de la NASA. Après stérilisation de la sonde *Mars Odyssey* pour éviter de contaminer la planète rouge avec des organismes terrestres, les prélèvements de contrôle ont révélé une espèce qui avait survécu.

Les archées

Les archées ressemblent aux bactéries, mais avec un métabolisme plus proche de celui des eucaryotes. *Methanothermobacter wolfeii* a été choisie non pas parce qu'elle est particulièrement résistante, mais parce qu'elle produit du méthane. L'atmosphère martienne contient des traces de ce gaz, et certains chercheurs ont suggéré qu'il proviendrait d'organismes apparentés à *M. wolfeii*.

Nous avons inclus *Haloarcula marismortui* pour une raison similaire. Native de la mer Morte, elle aime le sel, ce qui est sans doute une nécessité pour les éventuels organismes martiens. Pour ne pas geler, l'eau martienne doit en effet être saumâtre. De fait, une météorite martienne, Nakhla, présente des signes d'immersion dans l'eau salée.

Prospérant dans des sédiments océaniques chauffés par des volcans, *Pyrococcus furiosus* n'est pas supposé ressembler à un organisme martien, mais nous l'avons

inclus comme « témoin ». Si les micro-organismes ne survivent pas, nous devons savoir si c'est dû au stress de l'environnement spatial ou à l'échauffement de la rentrée dans l'atmosphère. Si *P. furiosus* est le seul survivant, nous pourrions retenir cette option.

Les eucaryotes

Les eucaryotes sont les organismes dont les cellules ont un noyau, comme les nôtres. Il est peu probable que de telles cellules proviennent de Mars, mais nous voulons savoir s'ils auraient pu survivre au voyage. Une des espèces retenues est la levure *Saccharomyces cerevisiae*.

De minuscules animaux et végétaux seront eux aussi du voyage. Les tardigrades sont des invertébrés d'environ 1,5 millimètre de long dotés de pattes crochues. Ils sont très résistants aux rayonnements, aux températures extrêmes, et même au vide spatial. Parmi les végétaux, on trouve des graines d'*Arabidopsis thaliana*, un vétéran de l'espace : elle a voyagé deux fois à bord des missions *Apollo*.

Si la capsule *Grunt* parvient finalement à partir vers Mars et à revenir en 2014, nous saurons enfin si la vie peut faire des sauts de puce de planète en planète.

David WARMFLASH,
Directeur scientifique
du projet *Phobos-LIFE*



Le tardigrade, animal d'environ 1,5 millimètre de long, est le plus complexe des organismes destinés à faire l'aller-retour vers Mars à bord de la sonde *Phobos-Grunt*.

PHOTO RESEARCHERS: IMC

équipé d'un dispositif pour faire vibrer l'écran de protection, mais il a fallu quatre jours martiens pour tamiser assez de matériau. Pendant ce temps, toute l'eau éventuelle s'était sublimée. D'autres échantillons ont raté leur entrée dans les ouvertures en raison des vents violents qui balayaient la sonde. Avec le temps, cependant, nous avons apprivoisé le vent et la texture du sol, et nous avons réussi à analyser des échantillons prélevés à différents endroits et profondeurs.

Pendant ce temps, les détecteurs atmosphériques accumulaient des données météorologiques. Un lidar (un radar laser) fourni par l'Agence spatiale canadienne nous a permis de mesurer la poussière atmosphérique, ainsi que la profondeur optique du brouillard au sol et la hauteur des nuages de glace d'eau. *Phoenix* a également enregistré la température de surface et la pression. Nous avons ainsi cartographié l'environnement du haut de la couche de glace jusqu'au sommet de la troposphère (la première couche de l'atmosphère, où se déroulent la plupart des phénomènes météorologiques), pendant que les sondes en orbite cernaient le contexte général de la région.

Un sol assez bon pour des asperges

L'une des grandes surprises a été la découverte de carbonate de calcium (à une concentration de cinq pour cent) et de perchlorate (à 0,5 pour cent) dans le sol. Ces composés ont une grande importance dans la recherche de traces de vie.

Le carbonate de calcium se forme lorsque le dioxyde de carbone atmosphérique se dissout dans de l'eau liquide et forme de l'acide carbonique. L'acide réagit avec le calcium présent dans le sol pour former du carbonate, un minéral très répandu sur Terre, et plus connu sous le nom de calcaire ou de craie. L'instrument WCL a mesuré un pH de 7,7, légèrement alcalin et très proche de celui des océans terrestres, où se forme aussi du carbonate de calcium.

Les planétologues traquent les carbonates sur Mars depuis des décennies. La multitude de canyons, de structures de type fluvial et d'anciens fonds lacustres ne laissent presque aucun doute : Mars était jadis une planète humide. Cela suggère que l'atmosphère était autrefois beaucoup plus épaisse. Tout le dioxyde de carbone est forcément allé quelque part,

et le réservoir naturel est le carbonate de calcium. *Phoenix* a fourni les premières preuves que ce dernier entre effectivement dans la composition du sol martien. Les satellites ont depuis repéré des affleurements isolés de carbonate de calcium, bien que d'autres types de carbonates semblent plus répandus.

Le carbonate de calcium apporte des preuves supplémentaires que le site d'atterrissage de *Phoenix* a été humide dans un passé récent, il y a moins de deux milliards d'années. Cela pourrait également expliquer pourquoi le sol formait une croûte : ce minéral peut constituer un ciment.

Le sol alcalin du site d'atterrissage de *Phoenix* est assez différent de ce que les autres atterrisseurs ont observé. Avec un peu plus d'eau et d'atmosphère, vous pourriez y faire pousser des asperges (elles aiment les sols alcalins). À l'inverse, le rover *Opportunity* avait traversé des sols anciens acides, riches en sulfates. Ces derniers traduisent un régime chimique différent et hostile à la vie.

Quant au perchlorate, on le trouve sur Terre sous forme de perchlorate d'ammonium, qui sert d'oxydant dans les moteurs de fusée à propergols solides. Le perchlorate rend l'eau impropre à la consommation à des concentrations supérieures à 25 parties par milliard. Mais ce qui est un poison pour nous est une manne pour les micro-organismes. Des processus naturels peuvent créer du perchlorate en petite quantité, et il peut s'accumuler dans les déserts arides puisqu'il n'est pas lessivé comme ailleurs. Dans le désert d'Atacama au Chili, il ne pleut qu'une fois par décennie, et le perchlorate peut s'accumuler. Les bactéries survivent en utilisant les perchlorates et les nitrates comme sources d'énergie. Pourrait-il en être de même sur Mars ?

Les modèles climatiques globaux de Mars les plus récents, mis au point par François Forget, de l'Institut Pierre Simon Laplace, à Paris, et ses collègues, intègrent la dynamique orbitale de Mars et les fortes oscillations de l'obliquité (l'angle entre le plan orbital et l'axe de rotation, actuellement de 25 degrés). Ils ont permis d'estimer l'évolution du climat au cours des dix derniers millions d'années. L'intensité du chauffage solaire aux pôles varie de façon spectaculaire entre les périodes froides (comme aujourd'hui) et les longs épisodes chauds. Quand l'obliquité est grande, les températures polaires grimpent

BIBLIOGRAPHIE

A. Kessler, *Martian Summer : Robot Arms, Cowboy Spacemen, and My 90 days with the Phoenix Mars Mission*, Pegasus, 2011.

C. R. Stoker *et al.*, *Habitability of the Phoenix landing site*, *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, article E00E20, 16 juin 2010.

P. H. Smith *et al.*, *H₂O at the Phoenix landing site*, *Science*, vol. 325, pp. 58-61, 3 juillet 2009.

N. Horowitz, *Premières expériences martiennes*, *Dossier Pour la Science* n° 60, juillet-septembre 2008. <http://bit.ly/doss60viking>

S. Atreya, *Le méthane, signe de vie sur Mars et Titan ?*, *Pour la Science* n° 356, juin 2007. <http://bit.ly/356mars-titan>

J. Bell, *Mars : un passé humide*, *Pour la Science* n° 352, février 2007. <http://bit.ly/352mars>

SUR LE WEB

Site de la NASA consacré aux missions martiennes : <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/>

Site du projet Phobos LIFE : www.planetary.org/programs/projects/life/design.html

Page du site de l'ESA consacrée à la mission *Exomars* : <http://exploration.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=118>

Les missions européennes

Si les résultats des missions martiennes de la NASA sont spectaculaires, l'Agence spatiale européenne (ESA) n'est pas en reste. Elle s'est engagée dans l'exploration martienne dès 2003 grâce au lancement du satellite *Mars Express*. Toujours en opération, ses instruments ont contribué à révolutionner notre compréhension de la planète rouge. *Mars Express* embarquait un petit atterrisseur anglais, *Beagle 2*, mais celui-ci a échoué à se poser en douceur à la surface.

Sur ces bases, afin d'apprendre à se poser et à se déplacer sur la surface de Mars, l'ESA a décidé de lancer son propre rover de 300 kilogrammes, nommé *Exomars*, avec pour objectifs de rechercher des traces de vie passée et de comprendre l'évo-

lution de l'habitabilité de Mars. Pour cela, le rover devait utiliser une foreuse guidée par sondage radar et capable d'atteindre un à deux mètres de profondeur, afin de prélever des échantillons non altérés par le rayonnement et les espèces chimiques de l'atmosphère présentes en surface. Ces échantillons auraient été analysés par des spectromètres et un microlaboratoire embarqués.

Prévu initialement pour un lancement en 2013, le projet a souffert des aléas de la programmation spatiale et des crises budgétaires. L'idée même d'un rover entièrement européen a finalement disparu en 2009 pour être remplacée par un projet commun NASA-ESA. Lancé en 2018, le nouveau rover mixte sera beaucoup plus gros que le projet eu-

ropéen d'origine. Il emportera les instruments scientifiques d'*Exomars*, ainsi qu'un ensemble d'outils fournis par la NASA et destinés à préparer des échantillons pour un retour sur Terre (assuré par une autre mission de récupération, après 2020).

Pour se poser sur Mars, le rover de 2018 bénéficiera du système « *sky crane* » (grue volante) utilisé pour *Mars Science Laboratory*. Afin de maîtriser malgré tout les technologies pour atterrir sur Mars, l'ESA développe de son côté un atterrisseur de démonstration plus modeste. Il sera emporté par l'autre composante du nouveau programme conjoint NASA-ESA : un nouveau satellite construit par l'ESA et lancé par la NASA en 2016, destiné à détecter et cartographier dans l'atmosphère

les traces de gaz marqueurs d'une activité géophysique, voire biologique. Le projet est ambitieux, mais fragile : en septembre 2011, la NASA a annoncé qu'elle n'aurait pas les ressources pour financer pleinement sa contribution. Pour pallier cette défection, les Européens se tournent à présent vers la Russie, qui pourrait être intéressée à fournir un lanceur en échange d'une place pour des instruments russes sur le satellite. Après la perte probable de sa sonde *Phobos-Grunt*, quel sera le choix de l'Agence spatiale russe ? Le programme *Exomars* va-t-il survivre ? Les décisions cruciales seront prises en février 2012...

François Forget
Institut Pierre Simon Laplace,
CNRS, Paris

et la glace d'eau des calottes devient instable, se sublime et se reforme sur les volcans de haute altitude proches de l'équateur, donnant naissance à de vastes glaciers. À ce stade, les pôles deviennent tempérés. Peut-être le carbonate de calcium a-t-il été formé lors de ces périodes chaudes et humides ?

L'observation par le lidar de chutes de neige autour de la sonde, tôt le matin vers la fin de l'été martien, nous a conduit à imaginer comment un écosystème microbien pourrait fonctionner. La neige sublimée pourrait se lier à la surface des grains de poussière. L'eau ainsi adsorbée agit comme une très mince couche de liquide. Durant un épisode chaud, cette couche pourrait s'épaissir au point de percoler et former une interface liquide entre les grains de poussière, où des micro-organismes seraient totalement immergés. Les nutriments et oxydants détectés par *Phoenix* seraient alors disponibles pour alimenter ces microbes. Cela étant, il faudrait aussi que ces derniers soient capables d'hiberner pendant plusieurs millions d'années pour survivre aux épisodes froids et secs.

Le perchlorate a une autre propriété intéressante : à haute concentration, il peut abaisser le point de congélation de l'eau à -70 °C. Cela signifie que des micro-organismes pourraient trouver une niche sur Mars même quand le climat se refroidit. Pour toutes ces raisons, la découverte de

perchlorate a fait sensation dans la communauté des exobiologistes.

La présence de perchlorate pourrait aussi résoudre un mystère vieux de 35 ans. En chauffant des échantillons de sol dans un minuscule four, la mission *Viking* a détecté l'émission de chlorométhanogènes. Les scientifiques de la mission, incapables de comprendre comment de tels composés chimiques pouvaient avoir une origine martienne, les ont attribués à une contamination par un agent nettoyant utilisé avant le lancement.

Le pôle est-il habitable ?

Le perchlorate suggère une interprétation différente. Des chercheurs de l'Université nationale autonome du Mexique ont reproduit l'expérience avec des échantillons de sol semblables à ceux de Mars, prélevés dans l'Atacama, avec de petites quantités de perchlorate ou sans. Ils ont retrouvé le dégagement gazeux que *Viking* avait observé : le perchlorate libère son oxygène et brûle les composés organiques présents, émettant par ce processus des chlorométhanogènes. Ainsi, si le sol martien analysé par *Viking* renfermait du perchlorate, il aurait pu contenir des quantités non négligeables de composés organiques, plus d'une partie par million, qui auraient échappé à la détection. L'observation par

l'instrument TEGA d'une libération de dioxyde de carbone par les échantillons chauffés à plus de 300 °C, exactement ce qu'on attendrait si des substances organiques étaient oxydées par du perchlorate, renforce cette interprétation.

Somme toute, les chances de trouver des indices de vie sur Mars n'ont jamais paru aussi bonnes. Mais les données de *Phoenix* s'arrêtent là. C'est maintenant à *Mars Science Laboratory* et, plus tard, à la mission *Exomars* de chercher d'autres traces de vie. Les résultats de *Phoenix* ne nous donnent que des preuves indirectes, alors que l'instrument d'analyse de *Mars Science Laboratory* peut reconnaître des signatures organiques dans le sol sans chauffage.

Phoenix a rempli sa mission pendant cinq mois avant que l'obscurité et les températures frigorifiques de l'hiver polaire martien ne s'installent. Nous avons perdu son signal en novembre 2008. Quand le printemps est revenu au pôle Nord de Mars l'année suivante, nous avons espéré que l'atterrisseur reviendrait à la vie, mais ce ne fut pas le cas. La dernière image satellite montrait *Phoenix* couché sur la rive d'une longue fracture ressemblant à une rivière, ses panneaux solaires cassés, enfoui dans de la glace de dioxyde de carbone. L'avant-poste scientifique d'hier est devenu partie intégrante du paysage d'aujourd'hui. ■

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Dossier Pour la Science

Découvrir la chimie qui régule les écosystèmes ou la vie autour des sources hydrothermales des abysses ; exploiter de façon raisonnée la richesse des fonds marins (microalgues, ressources minérales, méthane...) ; découvrir des médicaments nouveaux ; protéger les mers contre les marées noires ou les déchets plastiques... Aujourd'hui, la chimie est au centre d'une alliance durable entre les hommes et les océans.

Numéro 73, octobre-décembre 2011 – Prix : 6,95 €

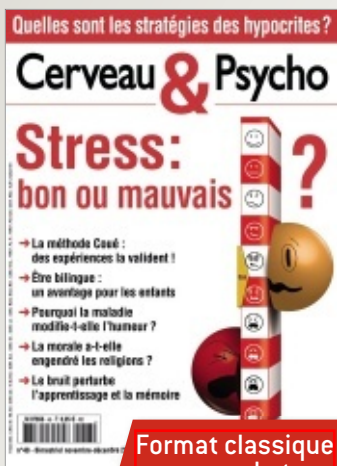
L'Essentiel Cerveau & Psycho

Aujourd'hui, d'innombrables résultats de recherche confirment que les enfants – mais aussi les adolescents et les adultes – soumis à la violence (images, jeux vidéo, etc.) sont eux-mêmes plus violents, moins sensibles aux violences faites à autrui. Sociologues, psychologues, psychiatres cherchent à identifier les causes de la violence pour mieux la combattre.

Numéro 8, novembre 2011-janvier 2012 – Prix : 6,95 €



Format classique
ou pocket



Format classique
ou pocket

Cerveau & Psycho

Nous nous nous sentons stressés par notre rythme de vie, notre travail, etc. Et si le stress n'était pas forcément mauvais ? Certains y trouvent un stimulant et, dans certaines conditions, il renforce la mémoire. Mais, comme en toute chose, il faut éviter l'excès ! À lire aussi : la méthode Coué validée par les psychologues, les enfants bilingues avantagés, les méfaits du bruit sur la concentration, etc.

Numéro 48, novembre-décembre 2011 – Prix : 6,95 €

■ POUR LA
SCIENCE

La géométrie

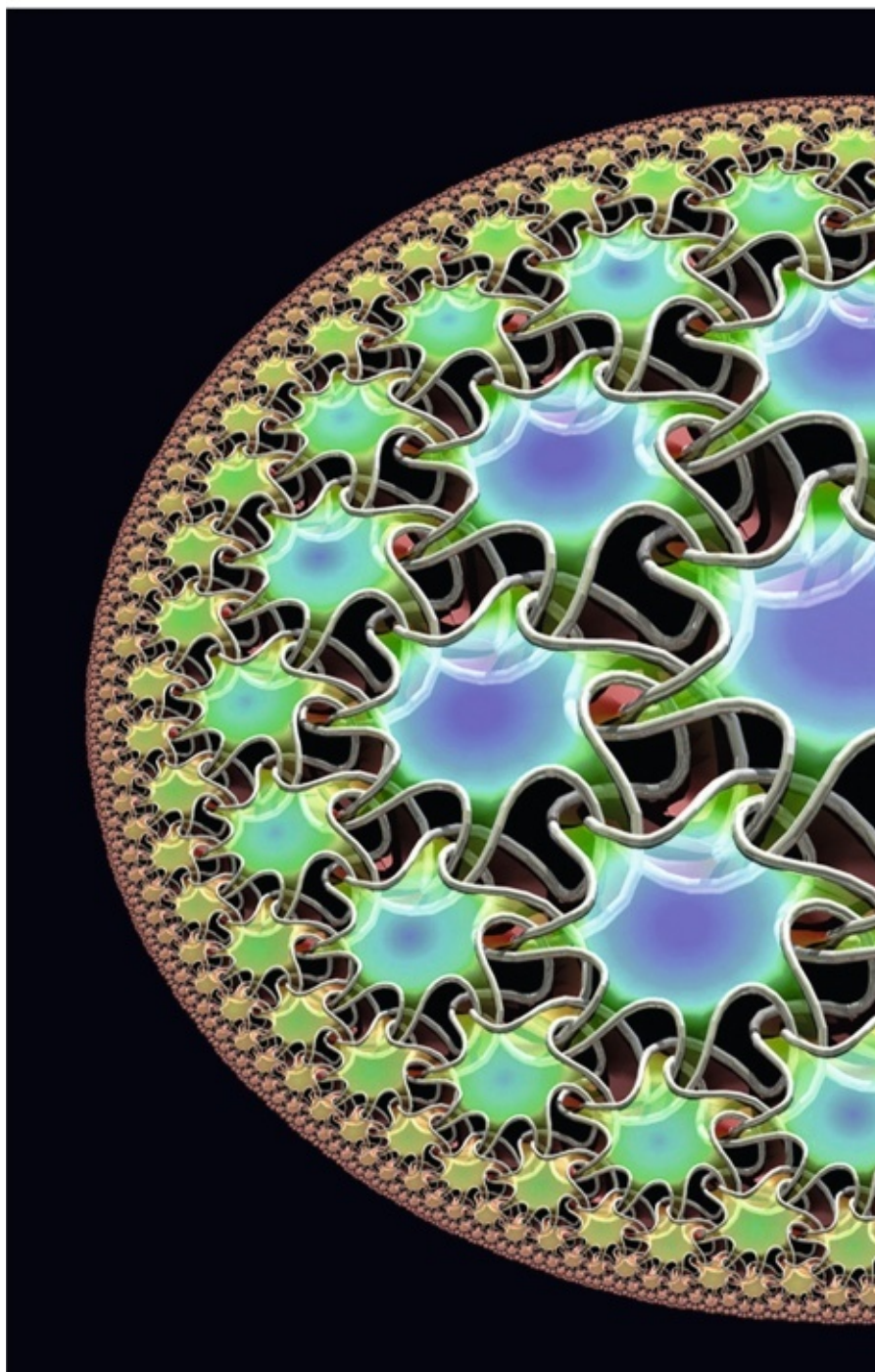
Bien après l'invention de la perspective en peinture, les mathématiciens ont conçu des méthodes pour conférer un bord à un espace géométrique infini. Cette construction d'un horizon représente un outil mathématique puissant.

Françoise Dal'Bo-Milonet

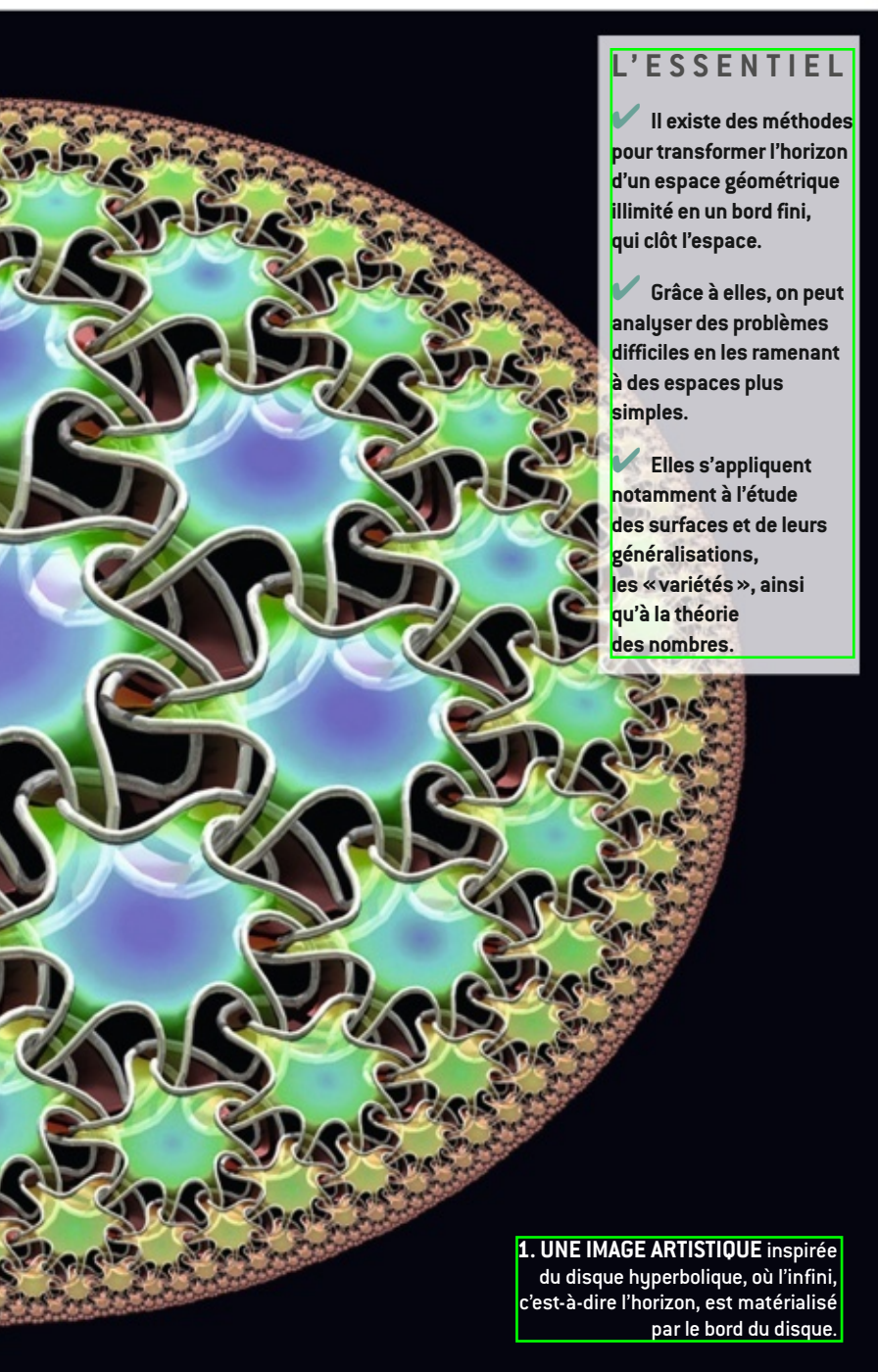
Observons deux droites parallèles : notre œil les voit converger en un point du champ visuel. Cette perception, que le dessin en perspective reproduit sur un plan, nous paraît aujourd'hui évidente. Il a pourtant fallu beaucoup d'audace aux peintres du XV^e siècle pour représenter un point de convergence à l'infini par un point ordinaire sur le tableau. Ce geste libérateur a donné lieu à divers procédés graphiques de représentation en perspective.

Deux siècles plus tard, en cherchant à les unifier, Girard Desargues, un architecte et géomètre lyonnais mort il y a tout juste 350 ans (en 1661), pose les bases d'une géométrie qui neutralise la différence entre le fini et l'infini. Desargues introduit un espace clos, qui contient le plan ordinaire mais où toutes les droites sont sécantes, y compris les droites parallèles.

Le savant lyonnais, maître de Blaise Pascal, détrône ainsi le plan usuel, support universel des figures de la géométrie d'Euclide. Trop révolutionnaires pour



des horizons



l'époque et écrits dans un style peu académique, les travaux de Desargues passent inaperçus face à ceux de son contemporain René Descartes, qui défendent la toute-puissance de l'algèbre. Ils ne sont sortis de l'oubli qu'au XIX^e siècle. Les idées de Desargues ont alors ouvert la voie à une nouvelle géométrie dite projective, qui prend en compte simultanément un espace et son «horizon».

Les études géométriques, autrefois centrées sur les figures, se sont désormais tournées vers l'espace qui les contient. Elles ont conduit à la découverte, dans les années 1850, du premier exemple de géométrie non euclidienne. Un peu plus tard, trois siècles après Desargues, la notion de «bord visuel», qui formalise les points de fuite et permet ainsi de clore les espaces géométriques, entrait de plein droit dans les mathématiques.

De l'infini géométrique au fini

Dès lors, les mathématiciens ont tissé des liens profonds entre espaces clos et espaces illimités. Et il y a une quarantaine d'années, sous l'impulsion de l'Américain George Mostow, ces bords se sont introduits dans les raisonnements : aujourd'hui, le géomètre les utilise comme de précieuses passerelles qui lui permettent de traduire des problèmes posés sur un espace illimité en termes de géométrie bornée en petite dimension. J'illustrerai ici la force de cette approche sur deux axes de la recherche actuelle en mathématiques : les «variétés hyperboliques», objets géométriques convoités par les topologues et les cosmologistes, et les pavages réguliers non euclidiens.

Avant d'introduire la notion de variété hyperbolique, considérons d'abord un exemple plus simple d'espace géométrique non euclidien : la sphère. Cette figure

bien connue peut sembler simple. Pourtant, la géométrie qui la caractérise est longtemps restée ignorée. Certes, en cosmologie, l'hypothèse d'un monde sphérique, clos, s'est longtemps imposée face à celle d'un Univers sans fin et sans limites. Mais en géométrie, le monde de départ est l'espace euclidien, un réceptacle neutre, illimité, où les droites se prolongent à l'infini. C'est peut-être ce parti pris qui explique que la sphère, pourtant si familière, ait mis du temps à s'imposer comme espace géométrique à part entière.

Les siècles de discussions qui ont porté sur le cinquième postulat de la géométrie d'Euclide (325-265 avant notre ère) illustrent bien cette résistance à prendre en compte la sphère. La version la plus connue de ce postulat affirme que par un point du plan situé à l'extérieur d'une droite D , passe une seule droite ne rencontrant pas D (voir la figure 2a). Le statut de cet énoncé a

espace illimité, conforme au plan euclidien sur bien des points, mais qui s'en départit sur un : le chemin le plus court, ou « géodésique », entre deux points, n'est pas un segment de droite. Comme nous le verrons, dans ce nouvel espace dit hyperbolique, les analogues des droites du plan, les géodésiques, ne vérifient pas le cinquième postulat d'Euclide, formulé en remplaçant le terme de droite par celui de géodésique.

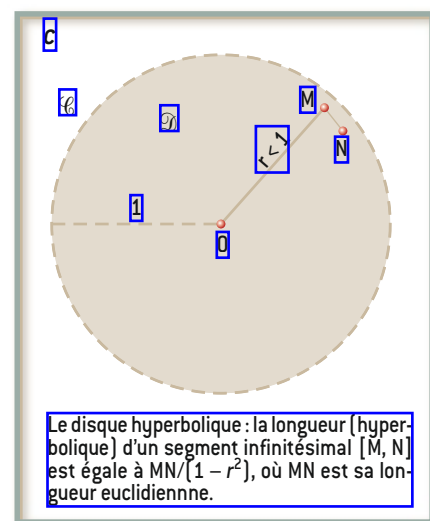
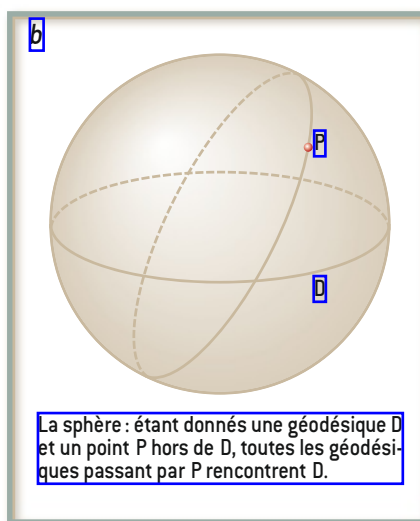
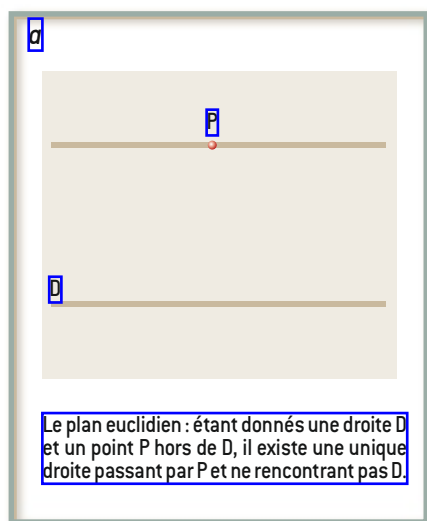
La sphère, espace illégitime ?

Pour des raisons différentes, le cinquième postulat d'Euclide est aussi incompatible avec la géométrie de la sphère. Pour nous en convaincre, mettons-nous à la place d'un marin au long cours. Pour lui, le chemin géodésique (le chemin le plus court) entre deux points à la surface de la Terre est porté

le concept de variété : il s'agit d'un espace qui, localement, c'est-à-dire au voisinage de chacun de ses points, peut être décrit par un espace euclidien de dimension fixe n . Ses travaux unificateurs permettront enfin à la sphère, cas particulier de variété de dimension 2, d'acquiescer un statut d'espace géométrique, aux côtés de celui d'Euclide et de l'espace de Bolyai-Lobatchevski.

Depuis, les mathématiciens n'ont eu de cesse d'intégrer pleinement à leur domaine ces trois géométries : euclidienne, hyperbolique, sphérique. À commencer par le Français Henri Poincaré (1854-1912), qui a fourni une construction concrète de l'exemple abstrait conçu par Bolyai et Lobatchevski.

En quoi consiste l'espace de Bolyai-Lobatchevski ? Il en existe de nombreux modèles, dont celui dit du disque hyperbolique. Pour construire ce modèle, on part d'un disque $\mathcal{D}$ du plan euclidien, centré



suscité bien des interrogations : existe-t-il une géométrie cohérente, non euclidienne, dans laquelle il est mis en défaut ?

Pendant plus de deux millénaires, des mathématiciens ont tenté de démontrer que le cinquième postulat découle des quatre autres, donc qu'il n'existe pas de géométrie où cet axiome n'est pas vérifié. Il a fallu attendre les années 1850 pour que l'on comprenne que ces tentatives sont vouées à l'échec et qu'apparaisse le premier exemple de géométrie non euclidienne. Deviné par l'Allemand Carl Friedrich Gauss (1777-1855), on l'attribue au Hongrois Janos Bolyai (1802-1860) et au Russe Nicolai Lobatchevski (1792-1856). Ces mathématiciens ont conçu un

par un cercle dont le centre est celui de la sphère (voir la figure 2b). Deux tels grands cercles, autrement dit deux géodésiques de la sphère, se rencontrent toujours.

Pourquoi les mathématiciens sont-ils passés à côté de cette géométrie sphérique, non euclidienne, que les marins connaissaient bien avant le XIX^e siècle ? Pour reprendre l'argumentation de l'historien François Russo, l'hypothèse d'une géométrie où deux géodésiques ont toujours au moins un point d'intersection a longtemps été considérée comme inacceptable, notamment par Lobatchevski et Bolyai, car elle contraignait l'espace à être clos.

L'Allemand Bernhard Riemann (1827-1866) la rendra légitime en introduisant

en un point O , de rayon 1 et privé du cercle $\mathcal{C}$ qui le délimite. Sur ce disque « ouvert », on change les règles métriques en imposant une nouvelle façon de calculer les longueurs des chemins. Dans le plan euclidien, on calcule la longueur d'une portion de courbe en l'approchant par celle d'une ligne polygonale composée de segments de droite de plus en plus nombreux et courts, c'est-à-dire tels que la ligne brisée épouse de plus en plus finement la courbe. Il en est de même pour la longueur d'un chemin dans le disque hyperbolique. Pour définir d'une nouvelle façon les longueurs sur le disque hyperbolique $\mathcal{D}$, il suffit donc de spécifier la longueur d'un segment infinitési-

mal $[M, N]$, où M et N sont deux points de $\mathcal{D}$ très voisins.

La «longueur hyperbolique» du segment $[M, N]$ que l'on impose est un multiple de sa longueur euclidienne MN , avec un facteur qui dépend de la position du point M . Plus précisément, sa valeur est par définition égale à $MN/(1 - OM^2)$ (voir la figure 2c). Si M est proche de O , cette longueur hyperbolique est comparable à MN , puisque le nombre $1 - OM^2$ est presque égal à 1. Mais si M s'approche du cercle $\mathcal{C}$, ce nombre tend vers 0 et la longueur hyperbolique de $[M, N]$ devient de plus en plus grande, bien que, du point de vue euclidien, N soit très voisin de M .

La notion de longueur sur un espace est fondamentale en géométrie. Elle permet de caractériser des courbes particulières, les géodésiques, qui portent les chemins les plus courts entre deux points. Dans le plan euclidien, il s'agit des droites; sur la

dien (voir la figure 2d). En revanche, sa longueur hyperbolique est différente de sa longueur euclidienne, puisqu'elle tend vers l'infini lorsque le point M est fixé et que N s'approche du cercle $\mathcal{C}$. Un habitant du disque hyperbolique partant de O n'atteint donc jamais ce cercle en un temps fini.

Dans cette nouvelle géométrie, l'énoncé du cinquième postulat d'Euclide n'est pas vérifié. Il y existe en effet une infinité de géodésiques passant par le point O (des diamètres) qui ne rencontrent pas un arc de cercle fixé. En d'autres termes, il existe une infinité de géodésiques distinctes de l'arc de cercle en question et qui lui sont «parallèles» (voir la figure 2e).

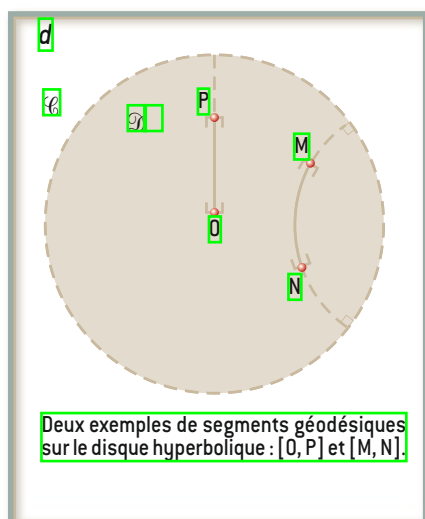
L'existence de telles configurations non euclidiennes a des conséquences troublantes sur les triangles hyperboliques, ces figures du disque hyperbolique dont les trois côtés sont des géodésiques (voir la figure 2f):

L'AUTEUR

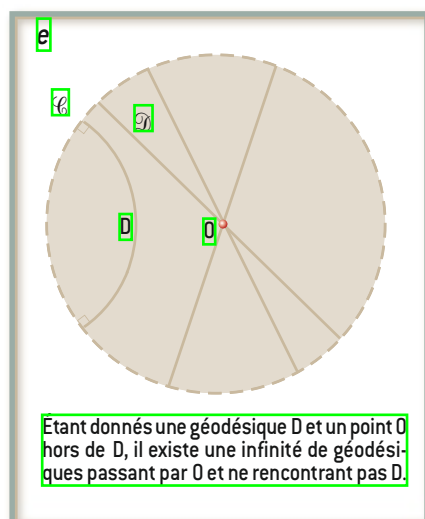


Françoise DAL'BO-MILONET est professeur des universités en mathématiques et responsable du Groupement de recherche CNRS de géométrie ergodique nommé «Platon». Elle effectue ses recherches à l'Institut de recherches mathématiques de Rennes (IRMAR).

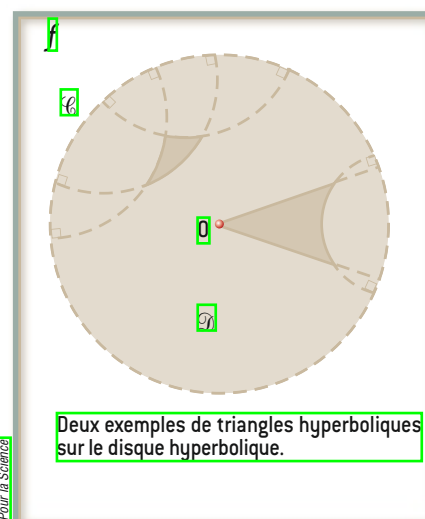
2. QUELQUES CARACTÉRISTIQUES du plan euclidien (a) et de deux espaces non euclidiens : la sphère (b) et le disque hyperbolique (c, d, e, f).



Deux exemples de segments géodésiques sur le disque hyperbolique : $[O, P]$ et $[M, N]$.



Étant donné une géodésique D et un point O hors de D , il existe une infinité de géodésiques passant par O et ne rencontrant pas D .



Deux exemples de triangles hyperboliques sur le disque hyperbolique.

sphère, nous l'avons déjà mentionné, ce sont les grands cercles. Dans le disque hyperbolique, on montre que les géodésiques sont de deux types : d'une part les demi-cercles perpendiculaires au cercle $\mathcal{C}$, d'autre part les diamètres (euclidiens) de ce cercle.

Longueurs euclidienne et hyperbolique

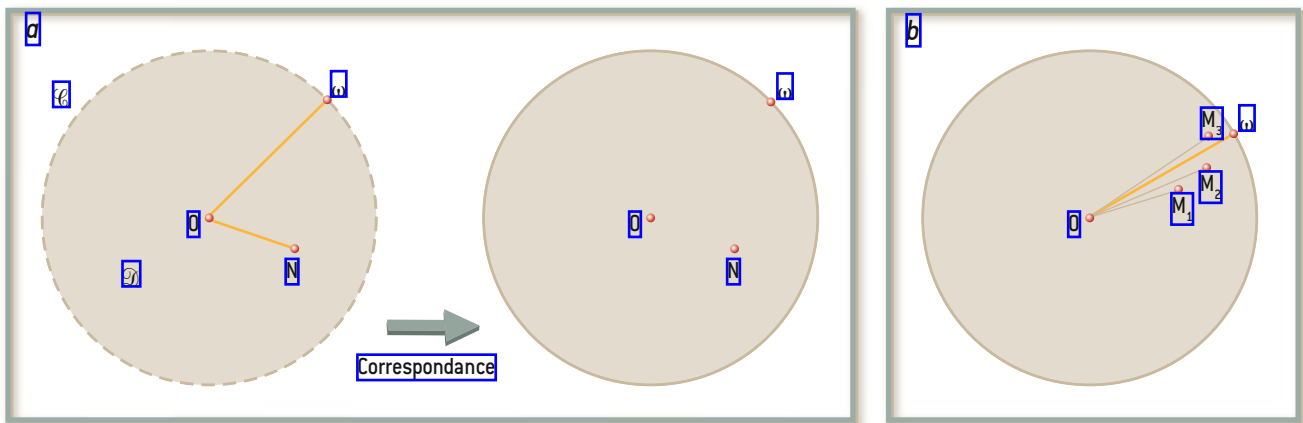
Plus précisément, si M et N ne sont pas alignés avec le point O , parmi tous les chemins de $\mathcal{D}$ qui relient M à N , celui qui a la plus petite longueur hyperbolique est porté par un arc de cercle. Si M, N et O sont alignés, ce chemin géodésique est le segment $[M, N]$, comme dans le plan eucli-

dien. La somme de leurs angles est strictement inférieure à 180 degrés. De plus, cette somme peut prendre toutes les valeurs comprises strictement entre 0 et 180 degrés, contrairement à celle d'un triangle euclidien qui est constante, égale à 180 degrés ! C'est le premier signe d'une géométrie plus souple, moins contraignante que celle du plan euclidien.

Comme il est repoussé à l'infini, le cercle $\mathcal{C}$ n'a pas d'existence concrète dans le monde hyperbolique, alors qu'il en a une dans le monde euclidien. Comment interpréter ce cercle immatériel en termes hyperboliques ? Imaginons que le point O soit, dans le disque hyperbolique, une source lumineuse qui émet dans toutes les

directions. La lumière se propage le long des chemins géodésiques. Parce qu'ils sont issus de O , ces chemins lumineux sont les segments de la forme $[O, \omega]$, où ω est un point du cercle $\mathcal{C}$. La longueur hyperbolique de $[O, \omega]$ étant infinie, on peut assimiler ω à un point sur l'horizon.

Ainsi, en associant à chaque rayon de lumière infini $[O, \omega]$ le point ω , on établit une correspondance entre l'ensemble des rayons et le cercle $\mathcal{C}$ (voir la figure 3). Sous cet angle, un point de $\mathcal{C}$ prend un sens «concret» hyperbolique : c'est un rayon de lumière hyperbolique issu de la source O . Dans le même esprit, on construit une correspondance entre les rayons de lumière hyperboliques de longueur finie émis



3. EN ASSOCIANT À CHAQUE RAYON LUMINEUX issu de O le point ω de l'horizon $\mathcal{C}$ vers lequel il se dirige, on établit une correspondance entre l'ensemble des rayons $[O, \omega[$ de longueur hyperbolique infinie et le cercle $\mathcal{C}$. De même, on fait correspondre à chaque rayon $[O, N]$ de longueur hyperbolique finie son extrémité N . En identifiant ainsi les

points aux rayons, finis ou infinis, le disque hyperbolique devient une partie d'un espace plus grand et clos, qui contient son horizon (a). Dans cet espace, des points M sont dits visuellement proches de ω quand l'angle en O entre $[O, M]$ et $[O, \omega]$ est petit et la distance hyperbolique de $[O, M]$ grande (b).

par O , autrement dit les segments $[O, N]$, où N est un point de $\mathcal{D}$, et le disque hyperbolique : à un tel rayon, on associe son point d'arrêt N (voir la figure 3a).

Le grand intérêt de cette approche par les rayons est d'apporter une vue hyperbolique unifiée du disque $\mathcal{D}$ et du cercle $\mathcal{C}$: leurs points sont identifiés à des rayons lumineux émis par la source O , que ces rayons soient de longueur finie ou infinie. En adoptant ce nouveau point de vue, le disque hyperbolique devient une partie d'un espace plus grand mais clos, un espace « compact » qui contient son horizon.

Le rôle principal de cet espace, que l'on peut représenter par la réunion du disque $\mathcal{D}$ et de son horizon $\mathcal{C}$, est de « compactifier » le disque, autrement dit de capturer son infini en donnant une limite à des suites de points qui divergent dans $\mathcal{D}$.

Pour que le concept de limite ait un sens dans ce nouvel espace, on introduit une notion de points « visuellement pro-

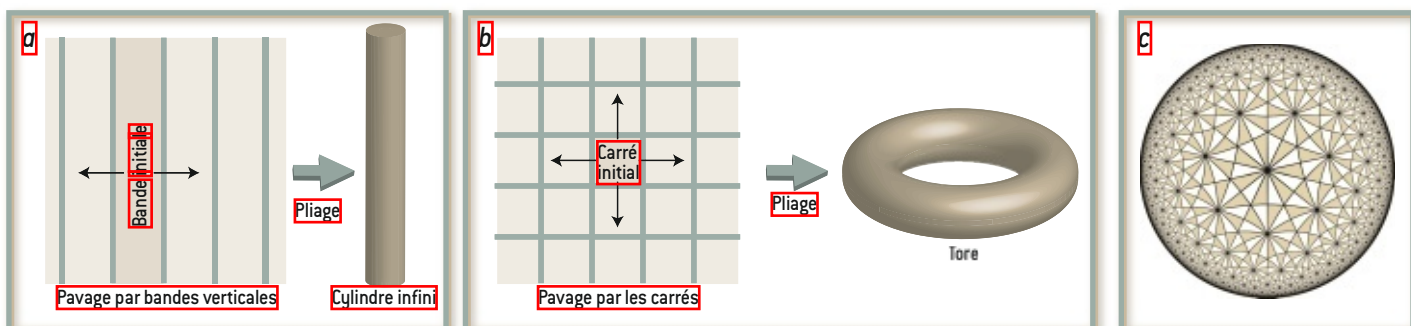
ches » qui vient contourner le problème de distance infinie entre $\mathcal{D}$ et $\mathcal{C}$. Concrètement, on dira qu'un point M de $\mathcal{D}$ et un point ω de $\mathcal{C}$ sont proches si, d'une part, l'angle en O entre le rayon de lumière fini $[O, M]$ et le rayon infini $[O, \omega]$ est petit, et si, d'autre part, la longueur hyperbolique de $[O, M]$ est grande (voir la figure 3b).

Le bord visuel, un miroir de l'espace

Dans cet espace topologique, une suite de points M de $\mathcal{D}$ qui s'éloignent de O le long d'un rayon infini $[O, \omega]$, ou en restant visuellement proches de celui-ci, converge vers un point ω de cet espace, alors qu'elle diverge dans $\mathcal{D}$ (puisque ω n'est pas un point de $\mathcal{D}$). L'infini du disque hyperbolique est ainsi neutralisé, matérialisé par son « bord visuel », à savoir le cercle $\mathcal{C}$ considéré comme l'ensemble des rayons lumineux infinis émis par la source O .

Cette construction d'un bord visuel destiné à clore un espace géométrique s'est pleinement intégrée aux mathématiques à partir des années 1970, notamment grâce aux travaux de l'Américain Patrick Eberlein. Dans le cas le plus simple où cet espace est le plan euclidien, ce bord peut être représenté par un cercle, comme pour le disque hyperbolique. On s'en convainc en traçant un cercle autour d'une source de lumière du plan, et en associant à chaque rayon lumineux son point de rencontre avec ce cercle (voir la figure 4).

Ces bords mettent en évidence des liens entre des espaces qui étaient considérés comme étrangers l'un à l'autre. C'est ainsi que la sphère, illégitime en tant qu'espace géométrique jusqu'au XIX^e siècle, se révèle intimement liée à notre espace euclidien, au sens où elle traduit la géométrie de son horizon. On sait aujourd'hui que, dans de nombreux



5. LE PAVAGE DU PLAN AVEC DES BANDES PARALLÈLES permet de construire, en faisant se rejoindre les deux directions de translation horizontale, un cylindre de hauteur infinie (a). Le pavage par des carrés per-

met de même, par « pliage » le long des directions de translation horizontale puis verticale, de construire un tore (b). Les transformations permettant de paver de façon régulière le disque hyperbolique sont plus difficiles

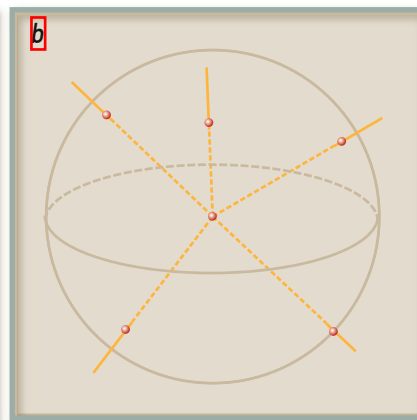
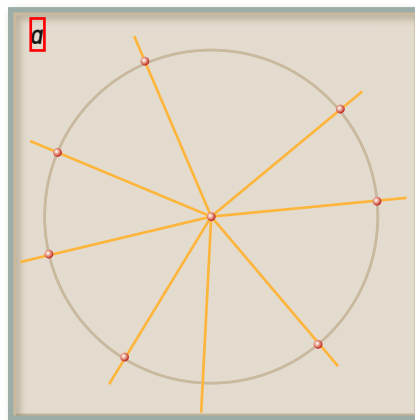
cas, le bord visuel porte de précieuses informations sur l'espace qu'il enserme. Par exemple, le cercle est le bord du plan euclidien et du disque, car ces deux espaces sont de dimension 2. Le bord d'un espace de dimension 3, tel l'espace euclidien, est une sphère. Des informations plus subtiles sont accessibles, d'autres restent à découvrir.

Le bord visuel est une invention théorique qui constitue une magnifique passerelle entre l'imagination et le raisonnement. Le géomètre s'en sert notamment pour étudier des problèmes posés dans un espace illimité, problèmes qui, grâce au bord visuel, se transcrivent sur un espace compact de plus petite dimension. Cette démarche est particulièrement fructueuse dans l'étude des pavages.

D'un pavage régulier à son ensemble limite

«Paver» un espace géométrique consiste à le recouvrir par des motifs qui ne se chevauchent pas, comme on le fait pour carrelé un sol. Le pavage est dit régulier s'il est obtenu en déplaçant un pavé initial par des transformations, qualifiées de déplacements, qui ne modifient ni la taille ni la forme du pavé. Son étude se résume essentiellement à celle de l'ensemble des déplacements qu'il met en jeu, ensemble nommé groupe paveur. Comment construire un tel groupe ?

Les groupes paveurs du plan euclidien sont bien connus. Ils sont en nombre fini. Leurs déplacements comprennent des rotations ou des translations. Par exemple, un pavage du plan peut être obtenu en appliquant à une bande verticale d'épaisseur unité le groupe des translations horizontales de longueur entière, ou encore en



4. LE CERCLE EST LE BORD VISUEL du plan euclidien (a), tandis que la sphère est le bord visuel de l'espace euclidien (b). Le bord visuel est un concept qui permet de clore un espace géométrique.

appliquant à un carré le groupe des translations entières, horizontales et verticales (voir les figures 5a et 5b).

Dans le cas du disque hyperbolique, les groupes paveurs sont plus difficiles à décrire et sont en nombre infini. Un exemple est construit en prenant, pour motif initial, un triangle hyperbolique dont les angles aux sommets sont de la forme $180^\circ/p$, $180^\circ/q$ et $180^\circ/r$, où p , q et r sont des entiers positifs vérifiant $1/p + 1/q + 1/r < 1$, ce qui garantit que la somme des angles soit inférieure à 180° . Les triangles se répètent alors sur le disque hyperbolique en devenant de plus en plus petits du point de vue euclidien, bien qu'ils gardent la même taille si on les mesure à l'aune de la longueur hyperbolique (voir la figure 5c).

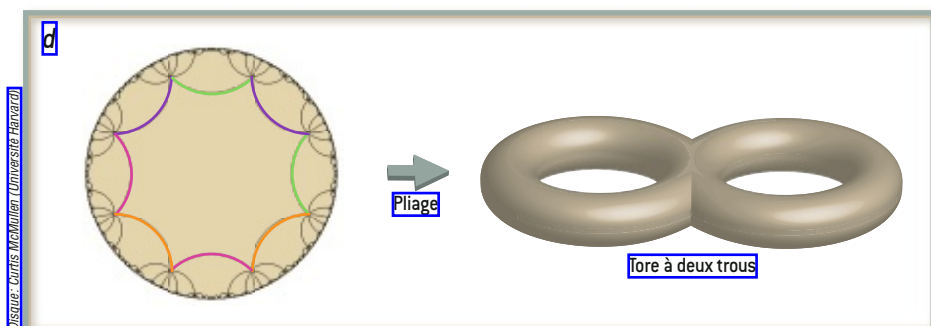
Il y a une quarantaine d'années, les mathématiciens ont introduit la notion d'«ensemble limite» d'un pavage régulier. Il s'agit d'un ensemble de points appartenant au bord visuel de l'espace et qui reflète la façon dont un point O de l'espace s'échappe à l'infini lorsqu'on le

déplace à l'aide des transformations du groupe paveur. Imaginons que les points de cette trajectoire soient peints en rouge, et intéressons-nous à ceux qui s'éloignent de O. Pour un observateur immobile, ces points s'accumulent à l'infini sur une partie rouge de son horizon : c'est l'ensemble limite du pavage.

Quelle est la nature de cet ensemble limite ? Pour un pavage régulier du plan euclidien, cet ensemble est soit formé d'un nombre fini de points, soit égal à tout le bord visuel, c'est-à-dire au cercle. Le premier cas est illustré par le pavage en bandes verticales : la trajectoire de O étant portée par la droite horizontale passant par ce point, ses points limites sont les deux «extrémités» à l'infini de cette droite (voir la figure 6a).

Le pavage régulier par des carrés illustre le deuxième cas. On montre que, obtenue par les translations entières horizontales et verticales, la trajectoire de O croise une infinité de fois toute droite de pente rationnelle passant par O. En poussant plus loin le raisonnement et en utilisant le fait que les nombres rationnels sont très nombreux dans l'ensemble de tous les nombres, on obtient que la «trace à l'infini» de cette trajectoire coïncide avec le bord visuel (voir la figure 6b).

Dans le disque hyperbolique, il existe aussi des pavages réguliers dont l'ensemble limite est constitué d'un nombre fini de points, ou encore égal à tout le cercle à l'infini. Mais, à la différence des pavages euclidiens, un troisième cas s'ajoute : celui d'une multitude de pavages réguliers dont les ensembles limites sont de nature fractale (voir la figure 6c). Ces ensembles, mines d'or de la géométrie hyperbolique, illustrent encore une fois la souplesse de cette géométrie.



à décrire. Ce disque peut être pavé d'une infinité de façons différentes, par des triangles (c, par exemple), par des octogones (d), etc. Avec le pavage par des octogones, le pliage le long de directions définies par les paires de côtés de l'octogone central de même couleur crée un tore à deux trous.

✓ BIBLIOGRAPHIE

E. Ghys, *Géométrer l'espace : de Gauss à Perelman*, *Images des Mathématiques*, CNRS, 2007 (<http://images.math.cnrs.fr/Geometriser-l-espace-de-Gauss-a.html>) et *Dossier Pour la Science* n° 74, janvier-mars 2012.

F. Dal'Bo, *Des trajectoires pour approcher les nombres*, *Pour la Science*, n° 359, pp. 66-73, septembre 2007.

F. Dal'Bo, *Trajectoires géodésiques et horocycliques*, EDP Sciences-CNRS, 2007.

J.-P. Luminet, *L'Univers chiffonné*, Gallimard (Folio), 2005.

R. Taton, *L'œuvre mathématique de Desargues*, 2^e édition, J. Vrin, 1981.

À quoi sert l'ensemble limite ? D'importantes informations portant sur un pavage régulier s'y reflètent. Certaines sont liées à la forme du motif du pavage. Par exemple, si ce motif est borné, comme dans le cas du pavage du plan euclidien par des carrés, son ensemble limite coïncide avec le bord visuel.

Lorsque l'ensemble limite est une fractale, des résultats récents montrent que l'architecture infinitésimale de cet ensemble, mesurée par sa « dimension fractale », est reliée au comptage des images du point O par les transformations du groupe paveur. Plus précisément, la croissance de ce groupe, donnée par le nombre d'images restant à une distance de O inférieure à un nombre positif R , est une fonction exponentielle du produit de cette dimension par R .

Des surfaces créées en pliant des pavages

Les pavages réguliers du plan euclidien, du disque hyperbolique et de la sphère sont intimement reliés aux surfaces (ou variétés de dimension 2). Ce lien s'appuie sur une interprétation en termes de pliage des déplacements associés au pavage.

Prenons l'exemple du pavage du plan euclidien par des carrés. Si l'on utilise les translations horizontales et verticales, non pas pour déplacer le motif mais pour identifier ses côtés, c'est-à-dire les recoller, on obtient une surface dont la forme est celle d'une bouée : un tore (voir la figure 5b). Parce qu'il provient d'un

pliage du plan, on dit que le tore est une « surface euclidienne ».

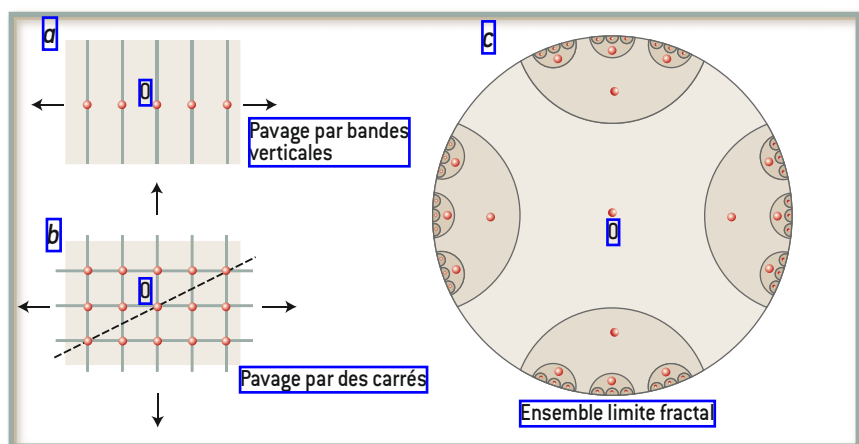
Les surfaces ne sont pas toutes euclidiennes. Un contre-exemple est la sphère : elle ne peut pas être construite en pliant un plan. On peut citer aussi le tore à deux trous, obtenu en recollant deux tores, que l'on construit en pliant le disque hyperbolique le long d'un octogone (hyperbolique) régulier (voir la figure 5d). Ces trois exemples reflètent une situation générale mise en lumière par Poincaré : une surface est soit euclidienne, soit sphérique, soit hyperbolique. Les deux premières familles sont finies, la troisième est infinie.

Pour savoir quel type de géométrie porte une surface, il suffit d'en connaître la forme. Cette information topologique ne suffit cependant pas pour retrouver le pavage à partir duquel la surface a été construite. Le tore à deux trous en est la preuve : il existe une infinité de pavages réguliers du disque hyperbolique permettant de le construire ! Toutefois, cette différence entre topologie et géométrie disparaît lorsqu'on s'intéresse à des objets de dimension supérieure à celle des surfaces, notamment les variétés de dimension 3.

Parmi ces variétés, on peut citer la boule, le tore plein, et plus généralement les surfaces fermées pleines. À l'exception de ces cas particuliers, il est généralement impossible de visualiser de tels objets dans l'espace ordinaire. Ces objets abstraits de dimension 3 n'en ont pas moins une existence mathématique.

L'un des premiers mathématiciens à s'y être intéressés de près est l'Américain William Thurston, dans les années 1970. Ses contributions dans le domaine lui ont valu une médaille Fields en 1978. Une question, inspirée par l'étude des surfaces, est au cœur de ses travaux : une variété est-elle « géométrisable » ? Autrement dit, peut-on la construire à partir du pavage régulier d'un espace modèle de dimension 3 ?

Cette question profonde a été à l'origine de nombreux développements en topologie. Elle est en particulier reliée à la conjecture de Poincaré, selon laquelle toute variété compacte de dimension 3 dépourvue de trous est topologiquement équivalente à la sphère tridimensionnelle (bord de la boule euclidienne de dimension 4). En 2003, le Russe Grigori Perelman parvint à démontrer cette conjecture, ce qui lui valut en 2006 une médaille



6. L'ENSEMBLE LIMITE D'UN PAVAGE RÉGULIER est l'ensemble de points vers lequel tendent les images d'un point initial O par les transformations du groupe paveur. Pour un pavage du plan par bandes verticales (a), l'ensemble limite est constitué des deux points à l'infini, à droite et à gauche. Pour un pavage par des carrés (b), on montre que la « trace » à l'infini de la trajectoire de O coïncide avec le bord visuel du plan, c'est-à-dire le cercle. Dans le cas du disque hyperbolique, on peut avoir des pavages réguliers dont l'ensemble limite est fractal (c).

Fields (qu'il a déclinée, tout comme le prix Clay plus récemment).

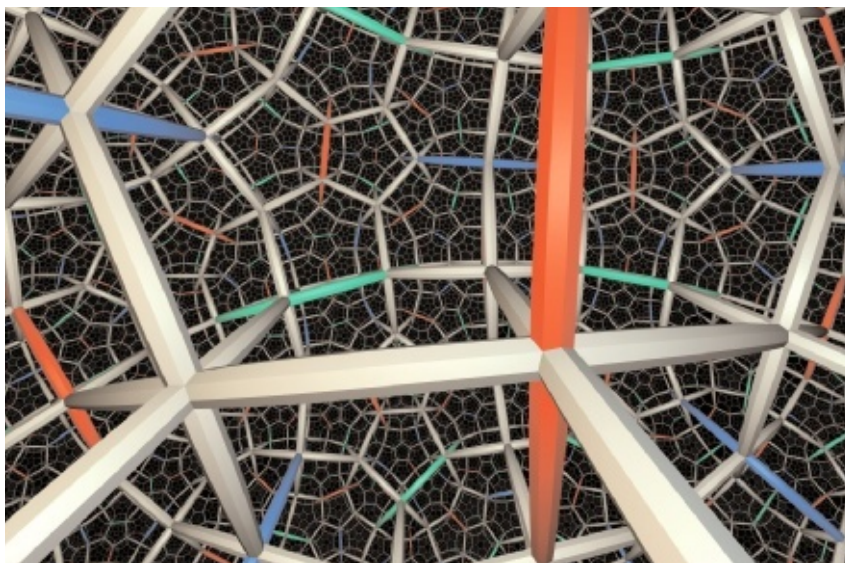
Si la géométrisation des surfaces met en jeu trois modèles – le plan euclidien, la sphère ou le disque hyperbolique –, celle des variétés de dimension 3 en fait intervenir huit. Parmi eux, citons « notre » espace ambiant euclidien et la boule hyperbolique obtenue, par analogie au disque hyperbolique, à partir d'une boule euclidienne (pleine, privée de la sphère qui l'entoure), sur laquelle on modifie le calcul des longueurs des chemins.

Les pavages réguliers de cette boule (voir la figure 7), difficiles à réaliser, permettent de construire par pliage des variétés dites hyperboliques. Ces objets, qui échappent à notre intuition, intéressent beaucoup les topologues pour leur forme complexe et leur lien avec la théorie mathématique des nœuds. En cosmologie, ils sont sources de spéculations sur la topologie de l'Univers.

Contrairement au cas des surfaces bidimensionnelles, la topologie d'une variété hyperbolique de dimension 3 détermine sa géométrie. C'est précisément l'énoncé du « théorème de rigidité » de G. Mostow : une variété hyperbolique étant donnée, il existe un unique pavage régulier de la boule hyperbolique qui permet de construire (par pliage) la variété en question.

Ce résultat de « dépliage » joue un rôle clef dans les travaux de W. Thurston et de G. Perelman. Il est à l'origine d'une école mathématique très active qui, de Yale à Jérusalem, travaille autour de ces concepts en lien avec la théorie des nombres et celle des probabilités.

Pour démontrer ce théorème, G. Mostow a fait preuve d'une grande originalité en introduisant le bord visuel de la boule hyperbolique dans son raisonnement. Dans ses grandes lignes, la démonstration consiste à partir d'un pavage régulier de la boule par un motif borné. En l'étudiant de près, on découvre que son groupe paveur contient, contrairement aux groupes paveurs euclidiens, des transformations mettant en jeu des mouvements complexes. G. Mostow les applique aux points du bord visuel de la boule hyperbolique, c'est-à-dire d'une sphère. En utilisant la présence de ces mouvements complexes sur un espace cette fois limité et de dimension 2, il parvient à montrer qu'à elle seule, cette action à l'infini détermine le pavage de départ.



Charles Gunt, Mathieu, Benoit L'Amour

7. L'INTÉRIEUR D'UNE BOULE HYPERBOLIQUE pavée de façon régulière par des dodécaèdres. Les couleurs n'ont pas de signification particulière dans cette représentation artistique du pavage.

Si, aujourd'hui, le théorème de rigidité de G. Mostow a perdu son éclat aux côtés d'énoncés plus généraux, l'idée de raisonner sur le bord visuel continue à vivre chez les géomètres du XXI^e siècle. Par ailleurs, sur les traces de G. Mostow et du Russe Gregori Margulis, les bords à l'infini se sont introduits dans des démonstrations d'arithmétique, grâce à la découverte de liens entre nombres et trajectoires sur des variétés illimitées. Des mathématiciens misent sur cette approche pour tenter de résoudre des conjectures de théorie des nombres.

Des bords à l'infini pour la théorie des nombres

L'une de ces conjectures, énoncée dans les années 1930 par l'Anglais John Littlewood, affirme qu'étant donnés deux nombres réels a et b , il existe des entiers p, q, r tels que la quantité $q^3(a - p/q)(b - r/q)$ soit aussi proche de zéro que l'on veut (cet énoncé porte donc sur l'approximation de a et b par des nombres rationnels). Sa formulation géométrique met en jeu un pavage régulier d'un espace de dimension 8 et un point du bord à l'infini de cet espace qui représente le couple de nombres (a, b) .

Dans ce modèle, s'intéresser à la conjecture de Littlewood revient à analyser les motifs du pavage rencontrés par une famille de géodésiques d'extrémité (a, b) . C'est ainsi

qu'avec deux collègues, le jeune Israélien Elon Lindenstrauss, lauréat d'une médaille Fields en 2010, a montré que l'ensemble des éventuelles exceptions à la conjecture de Littlewood est, sinon vide, très petit (en un sens mathématique précis). Ces travaux sont une belle illustration de la force de l'approche des bords à l'infini.

Le plan euclidien, le disque hyperbolique et leurs analogues en dimension supérieure font partie des espaces où les rayons lumineux se propagent facilement. Ce n'est pas toujours le cas. Certaines surfaces, par exemple, contiennent des trous ou des bosses qui dévient les rayons. On peut en construire une multitude par pliage de pavages réguliers du disque hyperbolique dont le motif initial est un polygone hyperbolique admettant une infinité de côtés, ou encore par recollement d'une infinité de tores.

Pour capturer l'infini d'une telle surface, l'objet adapté n'est plus le bord visuel, mais un ensemble plus abstrait, l'horobord, introduit dans les années 1980 par le mathématicien franco-russe Mikhaïl Gromov. Et depuis, d'autres notions de bord ont été inventées.

Ainsi, plus de 2000 ans après Euclide, les géomètres, partant des lois de l'optique, ont libéré les mathématiques en neutralisant l'infini, alors même que les physiciens, inspirés par des espaces géométriques abstraits, l'ont introduit dans leur représentation de l'Univers. Deux démarches qui, loin de se contredire, s'enrichissent. ■

Nourrir et préserver

Jonathan Foley

Doubler la production alimentaire d'ici 2050 tout en réduisant la dégradation de l'environnement : selon une équipe internationale, cet objectif est accessible.

L'ESSENTIEL

- ✓ Pour nourrir neuf milliards d'individus en 2050, il faudra doubler la production alimentaire.
- ✓ Or, déjà aujourd'hui, presque toutes les terres cultivables sont exploitées.
- ✓ Une équipe internationale propose un plan d'action pour doubler la production tout en réduisant son impact sur l'environnement.
- ✓ Ce plan comporte cinq mesures : améliorer la gestion des terres agricoles pour stopper leur extension, augmenter les rendements les plus faibles, mieux utiliser les engrais et l'eau, consommer moins de viande et éviter le gaspillage.

Un milliard de personnes souffrent aujourd'hui de faim chronique. Le problème ne vient pas tant de la quantité de nourriture disponible – les agriculteurs en produisent suffisamment pour répondre à leurs besoins – que de sa répartition inégale et de l'escalade des prix. En 2050, cependant, le défi aura pris une tout autre tournure.

La population mondiale aura augmenté de deux ou trois milliards, ce qui, d'après plusieurs études, devrait doubler la demande agricole. À cause de la croissance démographique, certes, mais aussi de l'augmentation du niveau de vie pour bon nombre de personnes, qui devrait entraîner une hausse de la consommation, en particulier de viande, sans oublier l'utilisation croissante de terres arables pour produire des biocarburants. Ainsi, même si l'on résout aujourd'hui les problèmes de pauvreté et d'accès aux ressources, il faudra produire deux fois plus pour assurer un approvisionnement mondial suffisant.

Et ce n'est pas tout. Parce qu'elle nécessite de défricher les forêts tropicales, de cultiver des terres en marge de zones non cultivables et d'intensifier l'industrie agro-alimentaire dans des paysages et des bassins hydrographiques fragiles, l'agriculture est devenue la principale menace environnementale pour la planète. Elle occupe une grande part des terres disponibles, perturbe

des écosystèmes, consomme d'importantes ressources en eau douce, pollue les rivières et les océans et émet plus de gaz à effet de serre que la plupart des autres activités humaines. Pour préserver la planète à long terme, il devient impératif de réduire les impacts nocifs de l'agriculture.

Doubler la production en 40 ans

Le système alimentaire mondial est ainsi confronté à trois défis intriqués : nourrir les sept milliards d'individus qui peuplent la planète aujourd'hui, doubler la production d'aliments au cours des 40 prochaines années et atteindre ces deux objectifs tout en devenant une activité durable pour l'environnement. Comment répondre simultanément à ces trois défis ? Une équipe internationale d'experts, que j'ai coordonnée, propose un programme en cinq mesures qui, si elles sont appliquées conjointement, pourrait doubler la nourriture disponible pour la consommation humaine mondiale tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, les pertes de biodiversité, l'utilisation de l'eau et sa pollution.

À première vue, la solution pour nourrir plus de personnes semble évidente : faire pousser plus de produits alimentaires en étendant les terres cultivées et en

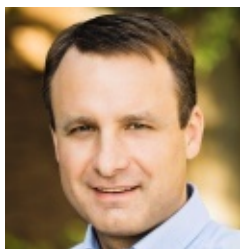
LA PLANÈTE



augmentant les rendements, c'est-à-dire les quantités récoltées par hectare. Plusieurs obstacles de taille, cependant, s'y opposent.

Actuellement, 38 pour cent de la surface des continents émergés – hors Groenland et Antarctique – sont cultivés, et la plupart des terres cultivées sont les meilleures terres arables. Les terres non cultivées sont des déserts, des montagnes, de la toundra, des glaciers, des villes et des parcs, et d'autres surfaces impropres à la culture. Les quelques terres cultivables qui subsistent en frontière de ces domaines sont surtout situées dans les forêts tropicales et les savanes, qui sont vitales pour la stabilité du globe, en particulier en tant que réserves de carbone et de biodiversité. L'extension de l'agriculture sur ces zones n'est donc pas envisageable. Pourtant, au cours des 20 dernières années, cinq à dix millions d'hectares de terres cultivées ont été créés par an, dont une part importante sous les tropiques. Ces extensions n'ont toutefois agrandi la surface nette de terres cultivées que de trois pour cent, car simultanément, des villes ont recouvert des terres agricoles, en particulier dans les zones tempérées.

L'AUTEUR



Jonathan FOLEY est directeur de l'Institut sur l'environnement de l'Université du Minnesota, où il est aussi titulaire de la chaire présidentielle McKnight de développement durable.

L'amélioration du rendement semble aussi une option intéressante. Cependant, notre équipe de recherche a observé que le rendement agricole global moyen n'a augmenté que d'environ 20 pour cent ces 20 dernières années, soit bien moins que ce qui est annoncé en général. Cette amélioration est importante, mais insuffisante pour doubler la production alimentaire d'ici 40 ans. Si les rendements de certaines cultures ont augmenté de façon significative, d'autres ont stagné, voire diminué.

Nourrir plus de personnes serait plus aisé si tous les produits alimentaires cultivés étaient directement destinés aux humains, mais seulement 60 pour cent des récoltes mondiales le sont : principalement des céréales, suivies des légumineuses (haricots, lentilles), de plantes oléagineu-

L'eau douce est l'une des autres « victimes ». Les hommes utilisent 4 000 kilomètres cubes d'eau par an, captée essentiellement dans des rivières et des nappes aquifères. L'irrigation représente 70 pour cent de ces prélèvements, soit 80 à 90 pour cent de l'eau consommée (l'eau qui est utilisée et qui ne retourne pas dans les bassins hydrographiques). En conséquence, le débit de nombreux grands fleuves, tel le Colorado, a diminué, certains cours d'eau se sont taris et les niveaux baissent rapidement dans de nombreuses régions, notamment aux États-Unis et en Inde.

Non seulement l'eau disparaît, mais elle est aussi contaminée. Engrais, herbicides et pesticides polluent presque tous les écosystèmes. Les flux d'azote et de phosphore dans l'environnement ont plus que doublé depuis 1960, polluant l'eau et créant d'énormes « zones mortes », privées d'oxygène, à l'embouchure de nombreux fleuves majeurs. Ironie du sort, les engrais lessivés par la pluie compromettent, au nom de l'augmentation de la production alimentaire, une autre source importante d'alimentation : la pêche côtière. Les engrais ont été un ingrédient clé de la révolution verte qui a aidé à nourrir le monde, mais on ne peut laisser la moitié des engrais appliqués être ainsi perdus.

L'agriculture est également la plus grande source humaine d'émission de gaz à effet de serre : elle représente environ 35 pour cent du dioxyde de carbone, du méthane et du protoxyde d'azote émis par les activités humaines, soit plus que les émissions liées au transport (voitures, camions et avions) ou à la production d'électricité. Une partie de ces émissions agricoles sont liées à l'énergie produite et utilisée pour cultiver, transformer et transporter les aliments, mais la plupart sont dues à la déforestation tropicale, à la production de méthane par les animaux et les rizières, et au protoxyde d'azote émis par les sols surfertilisés.

Stopper l'extension des terres agricoles

Les précédentes approches pour résoudre les problèmes alimentaires et environnementaux étaient souvent incompatibles. Produire plus en défrichant plus de terres et en utilisant plus d'eau et de produits chimiques, ou restaurer les écosystèmes en reprenant des terres arables à l'agriculture, il fallait choisir. Une autre voie qui

ses, de légumes et de fruits. Le reste est utilisé pour nourrir les animaux (35 pour cent) et cultiver des biocarburants et autres produits industriels, notamment textiles (5 pour cent).

La production de viande joue un rôle majeur dans cette répartition. Nourrir des animaux avec des produits issus de l'agriculture, même dans les systèmes de production de viande et de produits laitiers les plus efficaces, réduit considérablement la quantité de nourriture disponible pour les humains. En général, dans un tel système de production bovine, 30 kilogrammes de céréales produisent 1 kilogramme de viande de bœuf comestible, sans os.

Un autre élément empêche d'augmenter la production de nourriture : la détérioration, déjà bien avancée, de l'environnement. Seule notre consommation d'énergie, avec ses conséquences sur le climat et l'acidification des océans, rivalise avec l'ampleur croissante des impacts de l'agriculture sur l'environnement. Notre équipe de recherche estime que l'agriculture a déjà fait disparaître ou a radicalement transformé 70 pour cent des prairies du monde, 50 pour cent des savanes, 45 pour cent des forêts tempérées à feuilles caduques et 25 pour cent des forêts tropicales. L'empreinte de l'agriculture est près de 60 fois plus étendue que celle des routes et des constructions.

ON NE PEUT LAISSER LA MOITIÉ DES ENGRAIS appliqués être ainsi perdus.

Quelques chiffres

- ✓ Alors que les rendements agricoles avaient augmenté de 65 pour cent entre 1965 et 1985, ils n'ont augmenté que de 20 pour cent entre 1985 et 2005.
- ✓ En Europe et en Amérique du Nord, seuls 40 pour cent des récoltes sont destinés à la consommation humaine, contre 80 pour cent en Afrique et en Asie.
- ✓ 75 pour cent des terres agricoles, soit 3,7 milliards d'hectares, sont utilisées pour l'élevage : 350 millions d'hectares de cultures céréalières pour nourrir les animaux, et 3,38 milliards d'hectares de pâturages et de prés.
- ✓ Au cours des 50 dernières années, l'utilisation des engrais a quintuplé.
- ✓ Chaque année, cinq à dix millions d'hectares de forêt tropicale disparaissent au profit de l'agriculture.

concilierait ces deux aspects semble pourtant possible.

Après plusieurs mois de recherches et de délibérations fondées sur l'analyse de données nouvelles sur l'agriculture et l'environnement à l'échelle mondiale (estimation par satellite des surfaces cultivées, évolution des rendements en maïs entre 1985 et 2005, facteurs limitants par régions, émissions de gaz carbonique, estimation des excès d'engrais, etc.), notre équipe a établi un plan en cinq points pour traiter à la fois les défis alimentaires et environnementaux.

Notre première recommandation est de ralentir et de stopper progressivement l'extension de l'agriculture, qui se fait notamment aux dépens des forêts tropicales et des savanes. La disparition de ces écosystèmes a des conséquences importantes sur l'environnement, provoquant une perte de diversité et l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone (dues au défrichement de terres). Le ralentissement de la déforestation réduirait considérablement les dommages environnementaux, tout en n'imposant que des

contraintes mineures sur la production alimentaire mondiale. Pour compenser la perte en capacité agricole que cela entraînerait, des mesures pourraient être prises visant à réduire l'urbanisation, la dégradation et l'abandon des terres agricoles plus productives.

De nombreuses propositions ont été faites pour réduire la déforestation. L'une des plus prometteuses est le Programme des Nations unies de réduction des émissions résultant du déboisement et de la dégradation des forêts (REDD). Dans le cadre de ce programme, en échange de crédits carbone, les nations riches payent les nations concernées pour protéger les forêts tropicales humides. D'autres programmes développent des normes de certification pour les produits agricoles, afin que les chaînes d'approvisionnement aient l'assurance que les récoltes n'ont pas été cultivées sur des terres issues de la déforestation. Par ailleurs, une meilleure politique de production des biocarburants, favorisant des cultures non alimentaires, comme celle du panic érigé, une herba-

cée dont les bilans écologique et énergétique seraient bien meilleurs que ceux du maïs, pourrait libérer des terres arables pour la production agricole alimentaire.

Remonter les plus faibles rendements

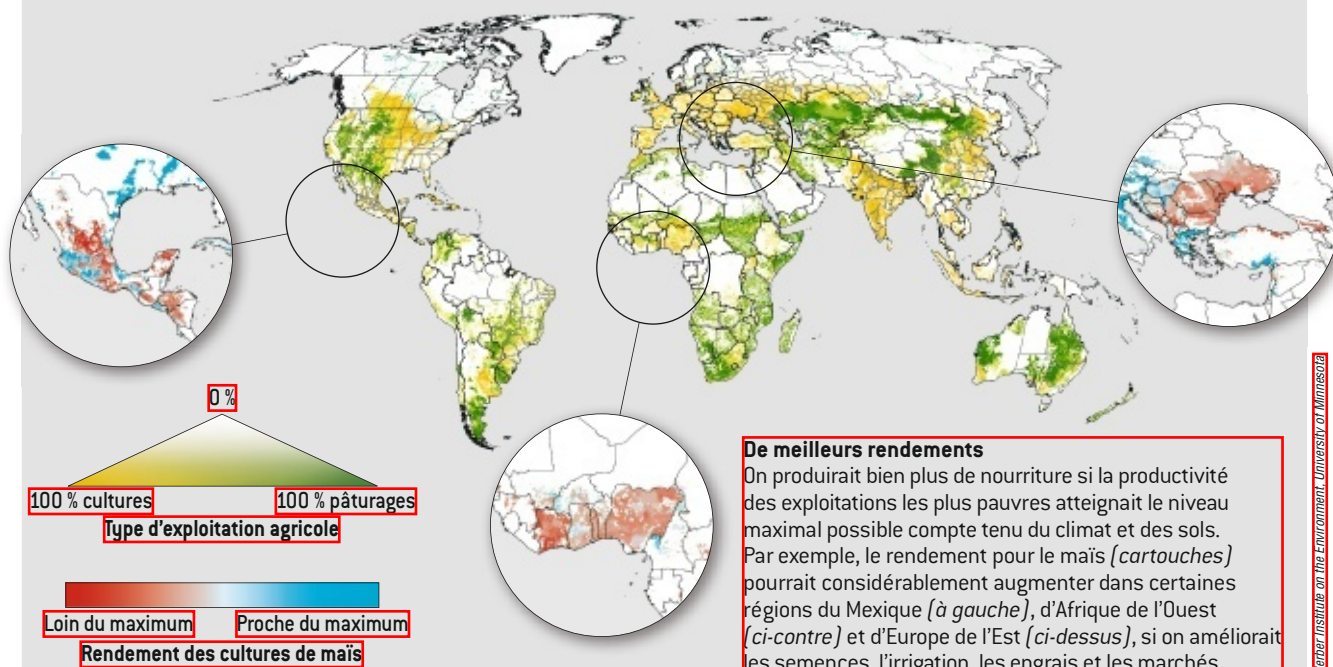
Pour doubler la production mondiale de nourriture sans étendre l'empreinte de l'agriculture, nous devons aussi augmenter les rendements des terres cultivées existantes. Il existe deux options: stimuler la productivité des meilleures exploitations, en relevant leur capacité de rendement grâce à une amélioration de la génétique des espèces cultivées et de la gestion des cultures, ou améliorer les rendements des exploitations les moins productives, afin d'utiliser tout leur potentiel. La seconde option donnerait le gain le plus important et le plus immédiat, en particulier dans les régions où la faim est la plus aiguë.

Notre équipe a analysé la répartition mondiale des rendements des cultures et a constaté que la majeure partie du globe

UNE SURFACE LIMITÉE, UN RENDEMENT AMÉLIORABLE

L'humanité exploite actuellement 38 pour cent des terres exemptes de glace de la planète. Les cultures occupent un tiers de cette surface; les pâturages et les grandes prairies naturelles pour le bétail couvrent le reste. Il y a peu de place pour étendre

les terres cultivées, car la plupart des terres restantes sont des déserts, des montagnes, de la toundra ou des zones urbanisées. Cependant, les exploitations de nombreuses régions agricoles pourraient être plus productives (voir les cartouches).



présente un rendement inférieur à ses capacités. En particulier, les rendements pourraient augmenter de façon significative dans de nombreuses régions d'Afrique, d'Amérique centrale et d'Europe de l'Est, à l'aide de meilleures semences, d'engrais et d'une irrigation plus efficace. Utiliser tout le potentiel des terres cultivées les moins rentables pour 16 cultures parmi les plus importantes (maïs, pommes de terre, riz, blé, etc.) augmenterait la production alimentaire totale de 50 à 60 pour cent, avec peu de dommages pour l'environnement.

L'augmentation du rendement des terres agricoles les moins productives nécessite souvent davantage d'engrais et d'eau. Il faudra éviter une irrigation et une utilisation débridées de produits chimiques. De nombreuses autres techniques permettent d'augmenter le rendement. Des techniques de plantation avec une réduction du labour perturbent moins le sol et évitent l'érosion; des plantes dites de couverture, cul-

tivées entre les cultures alimentaires, réduisent les mauvaises herbes et apportent des nutriments et de l'azote au sol, lorsqu'elles sont enfouies au moment du labour. Des leçons tirées de systèmes biologiques et agroécologiques peuvent également être adaptées, par exemple laisser les résidus des cultures dans les champs, afin qu'ils se décomposent en nutriments.

Mieux utiliser les ressources

Le défi sera aussi économique et social. Notamment, les rendements ne pourront être augmentés qu'avec une meilleure répartition des engrais et des variétés de semences dans les régions appauvries, et un meilleur accès aux marchés mondiaux pour de nombreuses régions.

Notre troisième recommandation concerne l'efficacité des pratiques agricoles: pour réduire les impacts environnemen-

taux de l'agriculture, il est nécessaire, quel que soit le rendement, d'utiliser moins d'eau, d'engrais et d'énergie.

En moyenne, il faut environ un litre d'eau d'irrigation pour faire pousser une calorie de nourriture, bien que certains endroits en utilisent beaucoup plus. Notre analyse a montré que les exploitations peuvent limiter considérablement l'utilisation d'eau sans trop réduire la production de nourriture, en particulier sous les climats secs. Les principales stratégies sont l'irrigation au goutte-à-goutte (l'eau est appliquée à la base de la plante et non gaspillée en pulvérisations dans l'air), le paillage (couvrir le sol de matières organiques pour retenir l'humidité) et la réduction des pertes d'eau dues aux systèmes d'irrigation (en diminuant l'évaporation).

Avec les engrais, c'est un ajustement dans les deux sens qu'il faut effectuer. Certains endroits sont trop pauvres en nutriments et fournissent donc une faible

L'importance des marchés locaux

Les solutions proposées par Jonathan Foley sont intéressantes et recoupent celles développées en 2009 en France dans l'étude Agrimonde de l'INRA et du CIRAD, ou plus récemment par l'Académie des sciences. Tout le monde s'accorde à dire qu'il est impératif d'augmenter les rendements agricoles dans certains pays en développement, comme l'Afrique Subsaharienne ou l'Amérique du Sud, alors qu'en 2050 plus de la moitié de l'humanité se trouvera en Asie. Pourquoi? Parce qu'en général, les rendements sont déjà excellents en Asie, et qu'il reste peu de marges pour les augmenter dans des proportions importantes, avec les technologies connues aujourd'hui. Ce résultat est le fruit de la « révolution verte » débutée autour des années 1950, qui a remarquablement fonctionné en Asie, mais que l'on n'a pas su mettre en œuvre en Afrique. Elle consiste à utiliser des variétés sélectionnées et efficaces, et à produire plus avec trois ingrédients, des engrais, des pesticides, et de l'irrigation.

Augmenter la production et les rendements en Afrique, est-ce possible? Assurément. De vastes res-

sources y sont inexploitées (environ 20 pour cent seulement des terres cultivables sont cultivées), les ressources en eau sont immenses dans la zone tropicale. Mais c'est dans cette partie du monde que les aménagements font le plus défaut: peu de barrages, peu de périmètres irrigués, et ceux qui existent ont un fonctionnement peu satisfaisant. Un paysan africain cultive en général un hectare de terre, et le fait à la main, sans engrais, sans protection des cultures contre les attaques des parasites. Il est si pauvre qu'il n'a pas les moyens d'acheter les outils les plus élémentaires, telles une pelle ou une pioche, sans parler de semences sélectionnées, d'engrais, etc.

Dans les solutions qu'elle préconise, l'équipe de J. Foley souligne la nécessité de libéraliser le commerce mondial et les échanges internationaux. Elle ne saurait avoir à la fois aussi tort et aussi raison. Raison, car nourrir la planète en 2050 nécessitera d'énormes échanges de nourriture de continent à continent. L'Asie, avec plus de cinq milliards d'habitants, ne pourra en aucun cas être autosuffisante en produits alimentaires; quand elle aura



Plantation de canne à sucre en Afrique du Sud.

utilisé tous ses sols cultivables, construit tous les barrages et irrigué tout ce qu'elle peut, et poussé à l'extrême ses rendements, il lui manquera environ le quart de ses besoins. C'est déjà le cas aujourd'hui pour tout le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord: 30 et 80 pour cent des produits alimentaires y sont importés. Pour ces pays, il est impératif de libéraliser les échanges, afin de réduire autant que faire se peut la facture alimentaire, et éviter la sous-nutrition.

Mais si J. Foley a globalement raison, il a localement tort. Libéraliser le commerce mondial signifie que le paysan africain cultivant à la main un hectare, avec des rendements

de l'ordre de dix quintaux, sera mis sur le même plan que le paysan européen ou américain, qui cultive seul 100 hectares de façon mécanisée, et y obtient des rendements de l'ordre de 100 quintaux. Il y a donc un facteur 1 000 entre la productivité d'un Africain et celle d'un agriculteur du Nord, sans parler des aides et subventions que le second reçoit. Les mettre en concurrence, c'est condamner sans équivoque le premier. C'est d'ailleurs ce qui se passe en ce moment, entraînant l'exode rural et l'accumulation de ces pauvres ruraux dans les bidonvilles périurbains, où ils ne trouvent pas de travail et vivent d'expédients ou d'aide.

production agricole, tandis que d'autres en sont trop riches et sont source de pollution. Les engrais ne sont presque jamais utilisés à la « bonne dose ». Notre analyse montre les points chauds sur la planète, notamment en Chine, dans le Nord de l'Inde, au centre des États-Unis et dans l'Ouest de l'Europe, où les exploitations pourraient réduire l'utilisation d'engrais sans diminuer (ou très peu) la production alimentaire : actuellement, 10 pour cent des terres arables sont à elles seules responsables de 30 à 40 pour cent de la pollution par les engrais agricoles.

Parmi les mesures envisagées figurent des politiques et des incitations économiques, tels le paiement d'une somme aux agriculteurs pour la gestion et la protection de l'eau des bassins hydrographiques, une réduction de l'utilisation excessive d'engrais, une meilleure gestion du fumier (en particulier de son stockage, afin qu'une quantité moindre ruisselle dans les bassins hydrographiques pendant un orage),

et un recyclage des nutriments en excès. La restauration de zones humides devrait aussi augmenter leur capacité à filtrer les engrais des eaux de ruissellement, et limiter ainsi la contamination de l'eau.

Enfin, là encore, une réduction du labour pourrait aider à limiter l'appau-

PRÈS DE 30 POUR CENT DE LA NOURRITURE PRODUITE est jetée, perdue, gâtée ou dévorée par des nuisibles.

vrissement du sol, tout comme l'agriculture de précision (application d'engrais et d'eau seulement quand et là où c'est nécessaire et efficace) et les techniques de culture biologique.

Nos deux dernières recommandations ont trait à la consommation. D'une part, si les récoltes servaient plus à nourrir directement les humains et moins à engraisser le bétail, on augmenterait considérablement la disponibilité mondiale de nourriture sans perturber l'environnement.

Consommer moins de viande

En moyenne, si l'on adoptait des régimes entièrement végétariens, on gagnerait jusqu'à 3×10^{15} calories supplémentaires chaque année, soit une augmentation de 50 pour cent de la production actuelle. Il est bien sûr peu probable que l'on change nos habitudes alimentaires de façon aussi drastique, pour des raisons tant économiques que sociales. Néanmoins, même de petits changements de régime alimentaire, tel le fait de remplacer le bœuf nourri aux céréales par de la volaille, du porc, ou du bœuf élevé en pâturage, peuvent être très rentables : les élevages de poulets et de porcs sont eux-mêmes plus rentables et les bovins nourris à l'herbe convertissent de la matière non alimentaire en protéines.

D'autre part, il est nécessaire de réduire le gaspillage dans le système alimentaire. Près de 30 pour cent de la nourriture produite est jetée, perdue, gâtée ou dévorée par des nuisibles. Dans les pays riches, la plupart des déchets se retrouvent en bout de chaîne, dans les poubelles des consommateurs et des restaurants. De simples changements dans notre consommation quotidienne (réduire les portions surdimensionnées, la quantité de nourriture jetée aux ordures) permettraient de limiter les pertes, mais aussi de lutter contre l'obésité.

A titre d'exemple, la construction des barrages de Manantali et de Diama, sur le fleuve Sénégal et ses affluents, achevés à la fin des années 1980, devait permettre la culture irriguée de 375 000 hectares de riz et conduire à l'autosuffisance en riz de la région. Mais la libéralisation des importations de brisures de riz provenant d'Asie a conduit à la faillite, en 1994, du Crédit Agricole Sénégalais et de l'aménagement hydraulique, et a rendu non rentable la culture du riz dans cette vallée. Ainsi, il est indispensable de maintenir, au moins pour un temps, des barrières douanières régionales pour protéger l'activité des paysans du Sud, élever peu à peu leur niveau de vie, éradiquer leur sous-nutrition, éviter l'exode rural et faire produire régionalement la nourriture des villes alentour.

Avec la réduction de la « volatilité » des prix agricoles, liée à la conjoncture économique mondiale et aux épisodes de sécheresse, et amplifiée par la spéculation, c'est la création de marchés locaux protégés qui permettra de relever le défi alimentaire. La technique n'est qu'une facette parmi d'autres – la démographie, la santé, les biocarburants... – de ce défi. La régulation économique en est l'aspect majeur.

Michel Griffon

CIRAD/Agence nationale de la recherche
Ghislain de Marsily
Université Paris VI/Académie des sciences

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. A. Foley *et al.*, Solutions for a cultivated planet, *Nature*, vol. 478, pp. 337-342, 2011.

H. Leridon et G. de Marsily (dir.), Démographie, climat et alimentation mondiale, Rapport RST n°32, Académie des sciences, EDP Sciences, 2011.

S. Paillard *et al.* (coord.), Agrimonde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050, Quæ, 2010.

H. Ch. J. Godfray *et al.*, Food security : the challenge of feeding 9 billion people, *Science*, vol. 327, pp. 812-818, 2010.

R. Thunow et S. Kilman, Enough : Why the World's Poorest Starve in an Age of Plenty, Public Affairs, 2010.

M. Griffon, Nourrir la planète, Odile Jacob, 2006.



© SUT/EST/CEA/INRA/AFRIQUA

SYSTÈME D'IRRIGATION au goutte-à-goutte dans le désert africain.

✓ SUR LE WEB

Six autres cartes de données mondiales sur lesquelles la présente étude est fondée : ScientificAmerican.com/2011/foley

Synthèses et vidéos sur le rapport Agrimonde : http://www.inra.fr/l_institut/prospective/prospectives_menees/agrimonde

Dans les pays plus pauvres, les pertes sont du même ordre de grandeur, mais ont lieu chez le producteur (pertes de récoltes, de stocks ruinés par des nuisibles ou d'aliments jamais livrés en raison d'infrastructures et de marchés déficients). De meilleurs systèmes d'entreposage, de réfrigération et de distribution réduisent ces déchets de façon appréciable. De meilleurs outils de commercialisation permettent aussi de mettre en relation les producteurs et les « clients », tels ces systèmes de téléphonie mobile qui, en Afrique, assurent la liaison entre fournisseurs, commerçants et acheteurs.

Bien qu'il ne soit pas réaliste d'envisager une suppression totale des déchets de la ferme à la table, des efforts ciblés, notamment pour réduire les déchets des aliments les plus consommateurs de ressources, comme la viande et les produits laitiers, pourraient faire une grande différence.

Notre stratégie en cinq points devrait permettre de faire face à de nombreux défis de sécurité alimentaire et environnementaux. Ensemble, les différentes mesures pourraient augmenter la disponibilité de nourriture à l'échelle mondiale de 100 à 180 pour cent, tout en diminuant considérablement les émissions de gaz à effet de serre, les pertes de biodiversité, l'utilisation de l'eau et sa pollution. Il est important que ces cinq points (et peut-être plus) soient mis en œuvre ensemble. Seule, aucune stratégie n'est suffisante.

Pour configurer ce nouveau système agricole responsable, prenons les meilleures idées de la révolution verte et de l'agriculture à l'échelle industrielle, d'une part, et de la culture biologique et des systèmes alimentaires locaux, d'autre part. Ce nouveau système pourrait consister en un réseau de systèmes agricoles locaux, propres au climat, aux ressources en eau, aux écosystèmes et à la culture de chaque région, reliés par des moyens efficaces de commerce international et de transport. Un tel système pourrait être pérenne et permettre aux agriculteurs de gagner leur vie.

Vers un système alimentaire en réseau

Un des dispositifs de soutien de ce nouveau système alimentaire pourrait être l'équivalent du programme LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), système nord-américain de standardisation pour la construction de bâtiments à haute qualité environnementale. Ce programme attribue des niveaux de certification aux bâtiments en fonction des options vertes intégrées : énergie solaire, éclairage économique, matériaux de construction recyclés, chantiers limitant les déchets de construction... De même, pour une agriculture durable, des points pourraient être attribués aux aliments en fonction de leur valeur nutritionnelle, de la sécurité alimentaire et d'autres bénéfices pour le public, ainsi que de leurs coûts environnementaux et sociaux. Cette certification donnerait des informations plus précises que les labels alimentaires actuels, tels «local» ou «biologique», qui n'apprennent en réalité pas grand-chose sur ce que nous mangeons. Le consommateur aurait ainsi une idée des performances globales de ses aliments, au travers de dimensions nutritionnelles, sociales et environnementales, et pourrait évaluer les coûts et bénéfices de différentes méthodes agricoles.

Les principes et pratiques de nos différents systèmes agricoles (commerciaux de grande échelle, locaux et biologiques) fournissent les fondements pour répondre aux besoins de sécurité alimentaire et environnementaux du monde. Nourrir durablement neuf milliards de personnes sera l'un des plus grands défis de notre civilisation. La façon dont nous le relèverons déterminera son sort. ■

Rendez-vous sur www.pourlascience.fr

■ Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.

■ Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters.php.

■ Recherchez et commandez les archives parues depuis 2004 de *Pour la Science* et des *Dossiers Pour la Science*.

■ Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.

■ Suivez notre actualité en direct



<http://www.pourlascience.fr/rss>



<http://twitter.com/pourlascience>



<http://www.pourlascience.fr/pls-facebook>



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

Des ions

L'hadronthérapie détruit des tumeurs avec des ions – carbone ou protons. La méthode présente des avantages par rapport à la radiothérapie classique, et de nouvelles améliorations en augmentent encore la fiabilité.

Le cancer – tous types confondus – touche plus de 300 000 personnes chaque année en France. Pour les traiter, il faut détruire les cellules tumorales, mais aussi, autant que faire se peut, épargner les cellules saines. On dispose de trois méthodes essentielles : la chirurgie, la chimiothérapie et la radiothérapie (externe ou interne). La chirurgie consiste à extraire la tumeur, la chimiothérapie à administrer par voie générale des médicaments qui sont toxiques pour les cellules tumorales et la radiothérapie à utiliser un rayonnement ionisant pour assurer la destruction. La radiothérapie est la plus utilisée de ces trois méthodes, puisqu'elle concerne environ 60 pour cent des personnes atteintes d'un cancer, soit quelque 180 000 personnes traitées chaque année en France. Ces dernières reçoivent près de quatre millions de séances de radiothérapie réalisées dans 172 centres, et souvent combinées à une autre méthode, chimiothérapie ou chirurgie. La radiothérapie contribue à la guérison de 40 pour cent des malades, et permet d'éviter l'ablation de l'organe atteint qu'il s'agisse d'un sein, d'un œil, du larynx, du canal anal ou d'un membre, etc.

La radiothérapie est d'autant plus efficace que la dose, c'est-à-dire l'énergie par unité de masse, délivrée à l'endroit de la tumeur est élevée. Toutefois, si le rayonnement utilisé détruit les cellules tumorales, il risque de léser également les tissus et

Cédric RAY

L'ESSENTIEL

- ✓ La radiothérapie est la technique la plus fréquemment employée pour traiter un cancer, mais elle est parfois inutilisable.
- ✓ Dans l'hadronthérapie, des protons ou des ions carbone remplacent les photons X de la radiothérapie classique.
- ✓ Les ions délivrent le maximum de la dose au pic de Bragg que l'on fait coïncider avec la position de la tumeur.
- ✓ En détectant les photons ou les protons secondaires émis lors du traitement, on pourrait améliorer, en temps réel, le ciblage de la tumeur.

© Shutterstock/Andrei D'Amil

les organes sains qui entourent la tumeur, et de provoquer des cancers secondaires. Ainsi la radiothérapie classique, qui utilise essentiellement des rayons X, atteint ses limites cliniques lorsque la tumeur est trop proche d'un organe dit à risque, c'est-à-dire dont la fonction est essentielle et qui est très sensible aux rayonnements, ou lorsque les tissus cancéreux sont moins sensibles aux rayons X que les tissus sains (après l'action naturelle des mécanismes de réparation cellulaires, les tissus sains se retrouvent plus endommagés que les tissus tumoraux). Les limitations de la radiothérapie par rayons X pourraient-elles être dépassées avec d'autres « projectiles » ? Le physicien américain Robert Wilson proposa dès 1946 de remplacer les rayons X par des faisceaux d'ions rapides. Il pensait améliorer la balistique de la méthode (le ciblage de la zone visée), et atteindre ainsi certaines tumeurs résistant aux rayons X.

Aujourd'hui, plus de 60 ans après cette première expérience, on sait détruire des tumeurs à l'aide d'ions accélérés. Cette technique – l'hadronthérapie – est déjà utilisée en clinique dans plusieurs centres de cancérologie soit avec des ions carbone au Japon et en Allemagne (et bientôt en Italie), soit avec des protons dans un plus grand nombre de pays dont les États-Unis et la France. Après avoir rappelé son principe et l'intérêt d'utiliser des ions plutôt que des photons, nous examinerons les spécificités de l'hadronthérapie.

relativistes

pour détruire des tumeurs



De nombreuses recherches sont entreprises de par le monde pour améliorer cette technique complexe. En France, malgré le retard pris en termes d'infrastructures, de nombreuses équipes travaillent sur la méthode, et les recherches vont de la clinique aux travaux de radiobiologie, en passant par les systèmes de planification du traitement et de contrôle de qualité. Nous donnerons un exemple de cette recherche : un nouveau système d'imagerie permettant de s'assurer de la qualité du traitement a été mis au point dans notre groupe.

Des photons dans les tissus biologiques

Rappelons d'abord comment se comportent les rayons X utilisés en radiothérapie classique quand ils traversent les tissus d'un patient. Ces photons interagissent avec les atomes situés sur leur chemin par trois mécanismes : l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la création de paires électron-positon, le positon étant l'antiparticule de l'électron. Dans le premier cas, les photons incidents sont absorbés et transfèrent toute leur énergie aux électrons avec lesquels ils interagissent ; ces derniers sont éjectés de l'atome. Ces expulsions sont suivies de réarrangements intra-atomiques. Par effet Compton, les photons incidents transfèrent une partie seulement de leur énergie à un électron. À plus haute énergie (supérieure à 1,022 mégaelectronvolt), le photon, dans

le champ électromagnétique d'un noyau, peut se transformer en une paire électron-positon : c'est l'effet de création de paires.

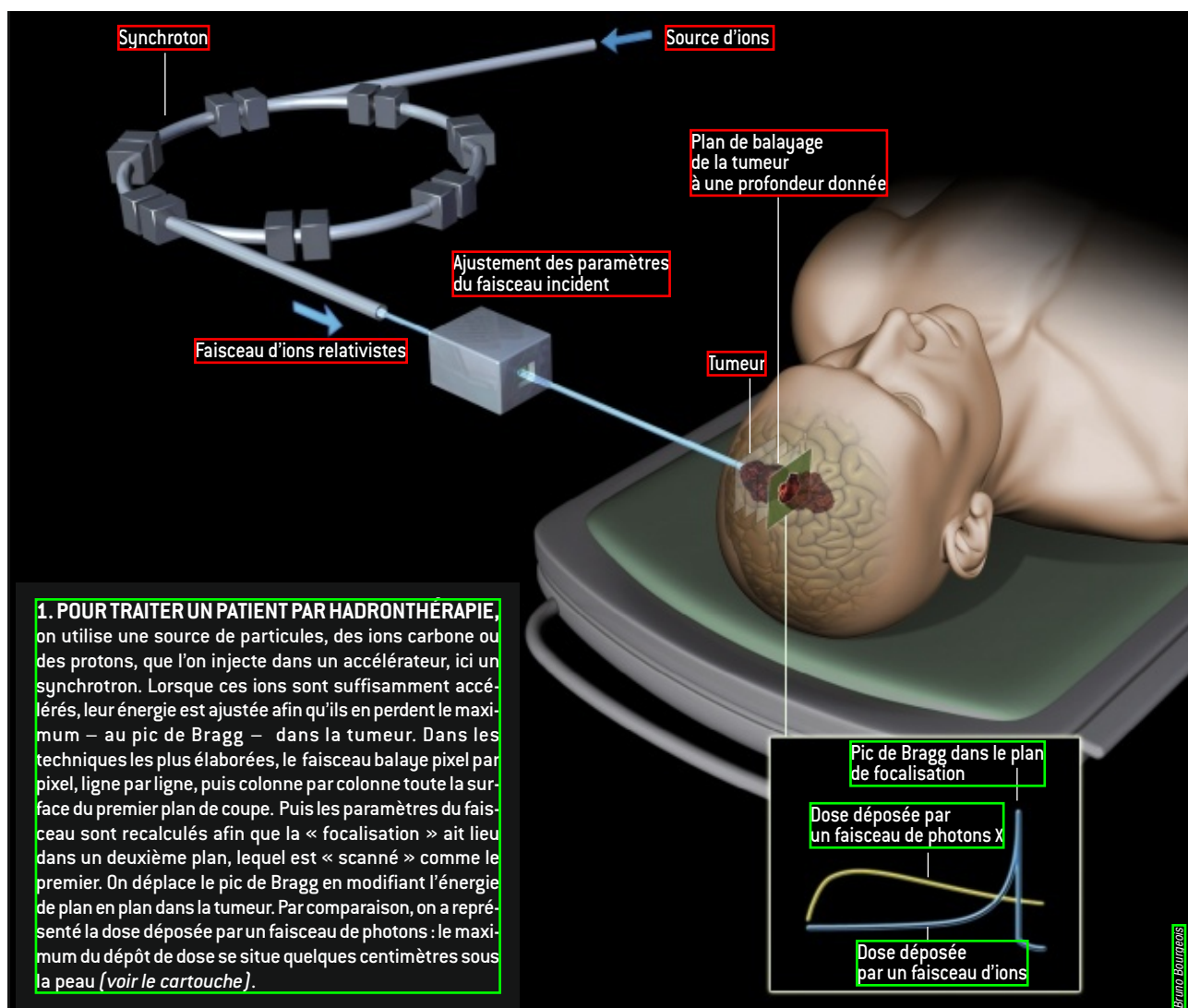
Ainsi, le nombre de photons contenus dans le faisceau diminue à mesure qu'il progresse dans les tissus. L'énergie qu'un faisceau de rayons X dépose quand il pénètre dans un organisme est maximale dans une zone située à quelques centimètres sous la peau. La probabilité qu'un photon interagisse avec la matière est faible, mais quand une telle interaction a lieu, les photons perdent leur énergie, parfois en totalité. Ainsi, le nombre de photons qui atteignent la cible diminue de façon exponentielle, mais ceux qui y parviennent ont conservé leur énergie initiale, c'est-à-dire leur efficacité pour détruire les cellules tumorales cibles. C'est pourquoi de nombreux faisceaux pénétrant dans le patient par des points d'entrée différents sont nécessaires pour que la dose maximale soit déposée dans la tumeur.

Nous l'avons indiqué, en hadronthérapie, les photons sont remplacés par des ions. La substitution présente un avantage balistique : même avec un seul faisceau, la dose est maximale dans la tumeur. Examinons pourquoi.

Les ions utilisés sont des protons ou des ions carbone. Les protons sont exploités dans une trentaine de centres de protonthérapie répartis dans le monde, dont deux sont situés en France, un au Centre Antoine Lacassagne, à Nice, et un au Centre de protonthérapie d'Orsay – Institut Curie. Ces ions produits par une source sont injectés dans un accélérateur circulaire, un cyclotron. Quand l'accélérateur est un synchrotron, les ions sont d'abord accélérés dans une section droite. Les dispositifs utilisant des cyclotrons sont plus compacts et plus simples, mais ils ne permettent pas de faire varier l'énergie des ions aussi facilement qu'avec un synchrotron.

Les ions y atteignent des vitesses très élevées, de l'ordre de 70 pour cent de la vitesse de la lumière. Ces ions ont des énergies de plusieurs millions d'électronvolts par unité de masse atomique, ce qui leur permet de parcourir plusieurs dizaines de centimètres dans des tissus biologiques.

En fait, à de telles vitesses, ce sont des ions « déshabillés », c'est-à-dire des noyaux d'hydrogène portant une charge positive ou des noyaux de carbone portant six charges positives qui pénètrent dans l'organisme du patient. Ces ions, chargés positivement, interagissent avec les électrons du milieu, mais ces interactions sont peu intenses (car les ions sont très rapides). C'est pourquoi les ions perdent peu d'énergie. Cette perte se fait en continu sur le parcours des ions. Mais plus ils ralentissent, plus ils interagissent et plus ils perdent d'énergie dans les tissus qu'ils traversent, et... plus ils ralentissent.



Cela provoque un mécanisme d'emballement, et l'arrêt du faisceau d'ions sur une très petite distance (par rapport à la distance totale parcourue). Il s'ensuit que les ions perdent la quasi-totalité de leur énergie à la fin de leur trajectoire. On sait calculer précisément à quel endroit dans un tissu un faisceau d'ions dépose ce maximum d'énergie : au pic de Bragg.

Le pic de Bragg

L'énergie cinétique des ions rapides constituant le faisceau peut être ajustée de façon à ce que l'énergie transférée par unité de longueur soit maximale à la profondeur où se trouve la tumeur. Au pic de Bragg, où, rappelons-le, le transfert d'énergie est maximal, les ions créent des concentrations importantes de radicaux libres dans les tissus tumoraux qui sont détruits efficacement, malgré les mécanismes biologiques de réparation (voir l'encadré ci-contre). Ainsi, contrairement aux faisceaux de photons X, les faisceaux d'ions permettent de déposer une quantité maximale d'énergie dans les tissus cancéreux avec un faisceau unique.

De façon pratique, on repère une tumeur par une méthode d'imagerie, par exemple par scanner ou IRM. Des simulations informatiques permettent de planifier les paramètres d'irradiation : c'est le plan de traitement. En particulier, l'énergie des ions est ajustée pour que le pic de Bragg se situe sur la zone tumorale. Dans les techniques les plus élaborées, l'extrémité du faisceau balaye la zone de la tumeur dans le plan du pic de Bragg, puis on modifie l'énergie pour que le pic de Bragg soit déplacé un peu plus dans la profondeur de la tumeur. Le faisceau balaye la tumeur dans ce nouveau plan, etc. Ainsi, tranche par tranche, la tumeur est balayée par le faisceau qui y dépose une énergie maximale, et ce jusqu'à ce que tout le volume ait été couvert (voir la figure 1).

Les simulations de plans de traitement montrent que l'hadronthérapie, par exemple avec des protons, permet de mieux épargner les organes à risque situés en aval de la tumeur que la radiothérapie. Ces simulations montrent également que le volume de tissus sains recevant une faible dose est beaucoup plus faible, pour une même dose délivrée à la tumeur, avec un nombre réduit de directions d'incidence des faisceaux (voir la figure 2).

Nous l'avons expliqué, la densité d'énergie déposée par les protons et les ions car-

bone est la plus grande vers la fin de leur parcours. Par ailleurs, la dispersion latérale du faisceau est faible, ce qui permet au faisceau de conserver sa largeur initiale quand il pénètre dans un tissu biologique et s'y propage. Mais sur leur trajet, les ions incidents ont une probabilité non négligeable de heurter un noyau atomique et de le briser (ou de se briser). Autrement dit, le projectile peut provoquer la fragmentation d'un noyau cible, voire se fragmenter lui-même, sauf quand il s'agit de protons, lesquels sont insécables (du moins aux énergies mises en jeu ici). Dans les deux cas, il en résulte une émission de particules secondaires, des photons, des neutrons, mais aussi des protons et des isotopes radioactifs. Si l'on considère des ions carbone, leur fragmentation produit des particules dont le parcours est supérieur à celui des ions

L'AUTEUR



Cédric RAY est maître de conférences à l'Université Claude Bernard Lyon 1 et conduit ses recherches à l'Institut de physique nucléaire de Lyon (IN2P3/CNRS) au sein du groupe CAS-PHABIO.

Les modèles radiobiologiques

Les différentes méthodes de radiothérapie visent à détruire les cellules tumorales, notamment en endommageant leurs molécules d'ADN, ce qui les empêche de se multiplier. La dose délivrée, c'est-à-dire l'énergie déposée par unité de masse, dans une cellule peut léser cet ADN par deux mécanismes différents : une action directe et une indirecte. Dans le cas de l'action directe, le rayonnement ionise directement la molécule d'ADN, qui peut alors se stabiliser en capturant un électron d'une molécule voisine ou se fragmenter, en partie ou totalement. Dans le cas d'une action indirecte, la majorité des molécules ionisées par les ions incidents sont des molécules d'eau, prédominantes dans les tissus (dans un organisme vivant, 90 pour cent des molécules sont des molécules d'eau). Cette ionisation conduit à la création de radicaux libres très réactifs qui peuvent dégrader diverses molécules, notamment l'ADN.

Les cellules disposent de divers mécanismes de radioprotection (des systèmes antioxydants qui protègent contre les radicaux libres) et de répa-

ration (reconnaissance des dommages portés à l'ADN et réparation). Compte tenu de tous les facteurs impliqués, les effets radiobiologiques des ions sont complexes, et le choix des paramètres utilisés pour l'irradiation (énergie, dose, angle du faisceau) repose sur des modèles radiobiologiques. De nouveaux modèles fondés sur la nano- et la microdosimétrie,

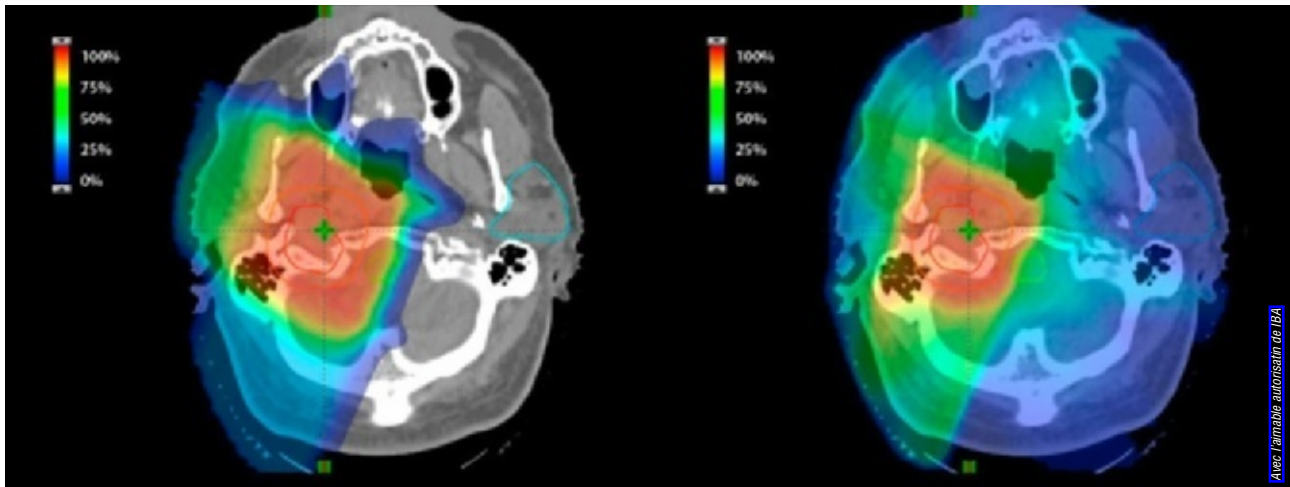
Les ions carbone sont particulièrement intéressants.

ainsi que sur la physico-chimie, sont en cours d'élaboration en France, notamment au sein de notre groupe. Ils devraient permettre de mieux prévoir l'efficacité biologique des ions, mais également d'intégrer divers paramètres physiologiques importants, par exemple la quantité d'oxygène dans la cellule. Cette dernière influe sur la sensibilité des cellules aux rayonnements et, quand elle diminue (la tumeur est peu vascularisée), le risque que la tumeur devienne résistante aux rayonnements augmente.

Quel est le rôle de la nature de l'ion choisi ? Pour des pro-

jectiles comme ceux que l'on utilise en hadronthérapie, la quantité d'énergie transférée par unité de longueur (ou TEL) et la densité d'ionisation peuvent être élevées. Les dommages deviennent si importants que le système antioxydant et les mécanismes de réparation peuvent être dépassés. Mais on ne peut pas tenir uniquement compte du TEL pour choisir l'ion : en effet, si les ions ayant un TEL élevé (les ions plus lourds) ont un pouvoir de destruction élevé, le nombre moyen d'impacts par cellule est très faible, car le nombre d'ions utilisés est petit. Il faut donc trouver un compromis entre le nombre d'impacts et les dommages causés. On montre ainsi que les ions légers (plus légers que l'oxygène) présentent une très bonne efficacité.

Et quand on s'intéresse aux tumeurs résistantes aux rayons X et que l'on combine ce compromis avec les objectifs thérapeutiques, on constate que les ions carbone sont particulièrement intéressants et présentent, en particulier, un maximum d'efficacité au pic de Bragg (là où le dépôt d'énergie est maximal), que l'on sait faire coïncider avec la tumeur.



2. L'HADRONTHÉRAPIE préserve mieux les tissus sains situés en aval d'une tumeur et réduit le volume des tissus sains irradiés, par rapport aux autres méthodes de radiothérapie, même les plus perfectionnées disponibles aujourd'hui. Ainsi, en présence d'une tumeur de la base du crâne (repérée par la croix verte), on a modélisé la dose déposée lors d'une séance

d'hadronthérapie par protons (à gauche) et d'une séance de radiothérapie par arc thérapie (à droite). On constate que si la dose déposée dans la tumeur est quasi identique, le volume des zones saines recevant une faible dose (en violet) est notablement plus réduit avec les ions qu'avec les rayons X, ce qui peut être intéressant pour des tumeurs bien particulières.

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Schardt *et al.*, Heavy-ion tumor therapy : Physical and radiobiological benefits, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 82, pp. 383-425, 2010.

G. Kraft et S. Kraft, Research needed for improving heavy-ion therapy, *New Journal of Physics*, vol. 11, 025001, 2009.

E. Testa *et al.*, Monitoring the Bragg peak location of 73 MeV/u carbon ions by means of prompt gamma-ray measurements, *Applied Physics Letters*, vol. 93, 093506, 2008.

M. Beuve *et al.*, Radiobiologic parameters and local effect model predictions for head-and-neck squamous cell carcinomas exposed to high linear energy transfer ions, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, vol. 71, pp. 635-642, 2008.

H. Tsujii, Clinical results of carbon ion radiotherapy at NIRS, *Journal of radiation research*, vol. A48, pp.1-13, 2007.

U. Amaldi et G. Kraft, Radiotherapy with beams of carbon ions, *Reports on Progress in Physics*, vol. 68, p. 1861, 2005.

<http://www.centre-etoile.org/>

n'ayant pas fragmenté, et les fragments produits contribuent au dépôt d'énergie, même au-delà du pic de Bragg. Toutefois, leur contribution est modérée.

Il en résulte une petite délocalisation de la dose, qui a pour conséquence qu'une partie de l'énergie est délivrée au-delà du pic de Bragg, dans les tissus sains. Cet inconvénient est inhérent à la méthode et est pris en compte dans les calculs du plan de traitement, mais il est possible d'utiliser ces rayonnements secondaires produits lors de la fragmentation pour contrôler la dose administrée au patient lors d'une séance d'hadronthérapie. Comment procède-t-on ?

Si l'on étudie les fragments qui émettent des positons, donc les fragments qui subissent une désintégration radioactive de type β^+ , on peut retrouver la distribution de la dose déposée. En effet, quand un positon et un électron interagissent, ils s'annihilent, émettant deux photons de 511 kiloélectronvolts à 180 degrés l'un de l'autre (l'annihilation et la création de paires mentionnée précédemment illustrent le principe d'équivalence entre la masse et l'énergie, des particules matérielles se « transformant » en photons ou inversement).

On utilise des couronnes de détecteurs de photons répartis tout autour de la tête d'un patient (dans le cas d'une tumeur cérébrale). Les détecteurs diamétralement opposés repèrent ces photons de 511 kiloélectronvolts en coïncidence, qui signalent l'annihilation d'un positon issu d'une fragmentation. On sait calculer les coordonnées du point où ces deux photons ont été

émis. Ce faisant, on réalise une tomographie par émission de positons, TEP. Cette technique est utilisée dans d'autres contextes pour suivre l'activité du cerveau ou encore en imagerie médicale. Ici, on ne réalise pas une image de l'activité cérébrale, mais une image permettant de localiser les positons issus de la désintégration des noyaux, lesquels proviennent eux-mêmes de la fragmentation.

Par ailleurs, on sait déterminer par le calcul la probabilité de fragmentation des atomes dans la tumeur, et établir la carte de répartition des positons émis à cet endroit pour la dose (et la répartition de la dose) prescrite par le médecin. Ensuite, on compare la distribution des positons obtenue par TEP et la carte issue de la simulation. Cette comparaison permet de vérifier que la dose déposée est conforme au traitement recherché.

Les centres qui ne disposent pas d'un contrôle de la dose par imagerie TEP se fondent sur des simulations précises. Mais certaines erreurs peuvent se produire, dues par exemple à de petites modifications de l'anatomie locale entre le moment où le scanner à rayons X qui sert à établir la simulation est effectué et celui où le traitement est délivré. Aussi est-il important de contrôler la dose ou, au moins, la position du pic de Bragg afin de s'assurer qu'elle est bien en accord avec la simulation et que l'on ne détruit pas les tissus sains qui se trouvent avant ou après le pic.

À Darmstadt, en Allemagne, des essais cliniques ont été réalisés au GSI, un accélé-

rateur auquel est associé un dispositif TEP. Dans cette configuration, l'imageur, de dimensions réduites, est intégré à la ligne d'irradiation, ce qui permet d'éliminer les erreurs possibles dues au déplacement du patient entre la pièce où a lieu l'irradiation et celle où se déroule l'examen par TEP. Cette façon de procéder, utilisée en routine clinique, présente les limitations inhérentes à la technique, interdisant notamment un contrôle en temps réel de la dose déposée.

En effet, les particules qui permettent de contrôler la dose (les positons) sont émises après la désintégration des noyaux produits par fragmentation avec une période (le temps moyen au bout duquel la moitié des noyaux se sont désintégrés) comprise entre quelques dizaines de secondes et plusieurs minutes (ce délai dépend de la structure nucléaire des isotopes produits). De surcroît, ces noyaux de carbone (^{10}C et ^{11}C) ou d'oxygène (^{15}O) émetteurs de positons sont progressivement entraînés par le sang, ce qui réduit leur concentration, donc la précision de la méthode. Aussi devant les difficultés que pose le suivi des émetteurs bêta $^+$, les physiciens recherchent-ils d'autres façons d'améliorer le contrôle du site précis où est déposée l'énergie du faisceau.

émis lors des fragmentations sont plus intéressants. Ainsi, notre équipe a montré que la détection de photons gamma, et plus précisément la détermination de la variation de leur taux de production le long du parcours du faisceau dans la cible, permet de positionner le pic de Bragg avec une assez bonne précision (de l'ordre du millimètre, c'est-à-dire compatible avec les exigences cliniques) : c'est la technique dite des gamma prompts.

Pour mettre en évidence sa faisabilité, nous avons utilisé des cibles en plastique (plexiglas) dont la densité est proche de celle de l'eau, constituant majoritaire des organismes vivants. On mesure l'instant d'arrivée des ions dans le patient à l'aide d'un détecteur spécifique (un hodoscope) et l'instant d'arrivée des particules sur un détecteur à scintillation ; on obtient ce que l'on nomme le temps de vol de chaque particule. Comme les photons sont plus rapides que les neutrons (les plus rapides ont une vitesse qui n'excède pas le tiers de celle de la lumière), on peut séparer les photons des autres particules émises lors de la fragmentation grâce à leur temps de vol. Il est ainsi possible de sélectionner les particules qui ont le bon temps de vol et l'on obtient

la densité de photons issus de la fragmentation. On y observe facilement la position du pic de Bragg donnée par la chute brutale de la quantité de photons prompts.

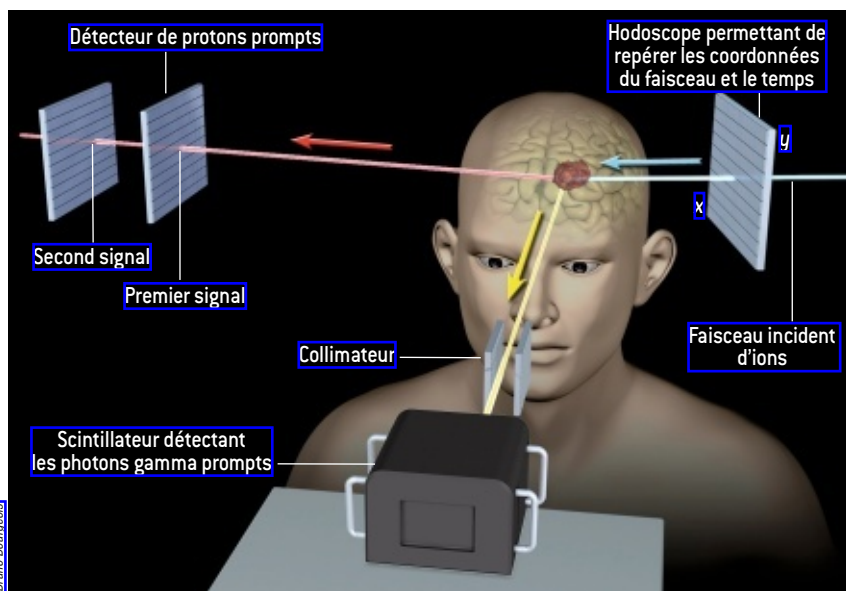
Ces résultats ouvrent la voie au contrôle en temps réel de la position du pic de Bragg, permettant de s'assurer que l'énergie des ions incidents est bien délivrée à l'endroit de la tumeur, connu par les méthodes de cartographie utilisées avant l'irradiation. En fonction de la nature du faisceau incident (protons ou ions carbone), de son intensité, de son énergie, et surtout du nombre et des types de détecteurs utilisés, on espère obtenir en quelques secondes une cartographie de la dose déposée dans le patient. On pourrait ainsi décider d'interrompre un traitement dont les paramètres sortiraient des limites fixées par les médecins, améliorant encore la qualité et la sécurité de ce type de thérapie.

Nous étudions également si, au lieu de localiser le pic de Bragg au moyen de photons gamma prompts, nous pourrions utiliser des protons prompts. Les protons émis lors de la fragmentation peuvent également servir de sonde pour déterminer la position du pic de Bragg (et, à terme, la dose) dans le patient. Les protons émis lors

Des photons qui trahissent le pic de Bragg

Hormis les noyaux émetteurs de positons, d'autres particules sont émises lors de la fragmentation : des photons, neutrons et protons. Ces particules sont émises quasi instantanément, c'est-à-dire au moment où les noyaux cibles se cassent, ou plus précisément moins de 10^{-12} seconde après. Elles sont dites prompts. Plusieurs groupes de physiciens en Europe (notamment au sein du programme ENVISION), dont le nôtre à l'Institut de physique nucléaire de Lyon, travaillent ensemble à mettre au point de nouvelles techniques d'imagerie visant à repérer précisément au moyen de particules promptes la position du pic de Bragg, et éventuellement la dose déposée dans le patient.

Les neutrons, bien que très nombreux, ne permettent pas de contrôler simplement la position et la dose, notamment parce qu'ils sont fortement déviés lors des collisions avec la matière qu'ils traversent, et qu'ils sont difficiles à détecter. En revanche, les photons et les protons prompts



3. POUR AMÉLIORER LA FIABILITÉ de l'hadronthérapie et réduire les risques d'erreurs de positionnement, il faudrait pouvoir vérifier en temps réel si la dose thérapeutique a bien été déposée à l'endroit de la tumeur. Pour ce faire, on pourrait utiliser les particules issues de la fragmentation de la cible par le faisceau incident, des photons gamma prompts ou des protons prompts. Les photons gamma sont détectés par des scintillateurs situés autour du crâne du sujet. Grâce à des collimateurs, on détermine à quel endroit les particules dont ils sont issus ont interagi. La validation avec les protons prompts est plus simple : quand un tel proton est détecté dans deux plans proches, la droite joignant les deux points coupe la ligne du faisceau incident en un point qui doit être situé au niveau de la fragmentation. Si tel n'était pas le cas, on pourrait recalculer les paramètres du faisceau incident pour ajuster l'endroit où l'énergie maximale est délivrée.



4. LE MALADE est allongé sur la table centrale d'un dispositif d'hadronthérapie. Le faisceau, orientable, délivre les ions accélérés issus d'un synchrotron ou d'un cyclotron. Les machines actuelles ne sont pas toutes équipées de dispositifs permettant le suivi des particules promptes, et, pour les centres équipés d'une TEP, il faut déplacer le malade pour vérifier que l'irradiation a été correcte.

de la fragmentation ont une vitesse de l'ordre de celle du projectile qui s'est fragmenté. Pour la protonthérapie, où l'énergie du projectile est plus faible, cette technique semble exclue, car très peu de protons prompts émis lors de la fragmentation auraient une énergie suffisante pour sortir du patient.

Les protons prompts : d'autres mouchards

En revanche, les protons prompts sont émis en grand nombre par l'ion carbone lors de sa fragmentation sur sa cible ou de la cible elle-même. Comment peut-on espérer repérer la position du pic de Bragg à l'aide des protons prompts émis ? Rappelons que le nombre de fragmentations et, par conséquent, le nombre de fragments émis dépendent de la distance parcourue dans le milieu ou dans le patient. En d'autres termes, après le pic de Bragg, le projectile ne déclenche plus aucune fragmentation.

On peut montrer que la distribution de protons chute à la fin du pic de Bragg, mais sans présenter de maximum marqué (contrairement à la quantité d'énergie déposée). En localisant les volumes élémentaires (ou voxels) où ont lieu la fragmentation et la production des protons, et en comparant la carte obtenue avec celle qui a été simulée, on espère pouvoir vérifier que la dose a été déposée correctement. Cette approche présente un avantage notable par rapport à celle qui utilise les photons prompts comme mouchards : il est bien plus simple de détecter des particules chargées que des photons.

Le taux de comptage est beaucoup plus élevé et permet de dénombrer les événements de fragmentation dans chaque voxel à condition que ces événements soient assez nombreux pour que la statistique soit suffisante. Nous pensons utiliser les dispositifs développés initialement pour détecter les particules dans les grands accélérateurs, tel le projet de Collisionneur linéaire international, ILC. Soulignons que l'utilisation de tels détecteurs dans des machines de hadronthérapie serait un nouvel exemple d'une application pratique issue d'une recherche fondamentale.

Quel en est le principe ? On repère un proton qui donne des signaux dans deux détecteurs qu'il traverse et qui sont situés autour de la tête du patient, si c'est le cerveau qui est traité. Les deux positions permettent d'obtenir une droite, laquelle coupe la droite définie par le faisceau incident, au point où le proton prompt a été émis. On peut envisager de confirmer la localisation de ce voxel où a eu lieu la fragmentation grâce à une deuxième droite résultant de l'interaction d'un autre proton, issu de la même fragmentation.

Mais la probabilité de détecter deux protons issus d'une même fragmentation étant très faible, une telle confirmation reste difficile à obtenir. Nos simulations confirment que la méthode par coïncidence ne pourra fonctionner qu'avec des détecteurs de grande taille, et, par conséquent, très onéreux. Quoi qu'il en soit, la confirmation par un proton prompt devrait déjà permettre de vérifier le site du dépôt de l'énergie avec une précision intéressante pour une application médicale.

Malgré tous ces avantages et les bons résultats issus des simulations, il existe plusieurs limitations à cette technique. Nous l'avons évoqué, elle ne fonctionne *a priori* qu'avec les centres d'hadronthérapie utilisant des ions carbone. Une autre limitation résulte des mécanismes d'interaction des protons dans la matière. Plus leur parcours dans les tissus biologiques est long, plus ils perdent d'énergie. Ainsi, si les protons prompts qui sont créés doivent ensuite traverser une épaisseur importante de matière, ils perdent beaucoup d'énergie et risquent de ne pas ressortir du patient ou d'en ressortir après avoir changé de direction, ce qui limite la précision de la méthode. Des études complémentaires sont en cours dans plusieurs laboratoires afin d'optimiser cette technique.

Comme nous l'avons évoqué, de très nombreuses recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité et la sûreté de cette thérapie innovante qui permet d'épauler la radiothérapie dans certaines pathologies spécifiques. Des médecins, en collaboration avec des physiciens, informaticiens, radiobiologistes, physiciens des accélérateurs cherchent à comprendre, quantifier, imager et modéliser les nombreux processus physiques et biologiques qui sont mis en jeu quand des ions traversent la peau d'un malade et se propagent jusqu'à la tumeur.

L'hadronthérapie a déjà fait ses preuves dans de nombreux pays : même si cela représente une très faible proportion des traitements de radiothérapie (environ 0,5 pour cent), aujourd'hui, plus de 100 000 personnes ont été traitées par hadronthérapie dans le monde (protons et ions carbone confondus). Toutefois, l'accélération des faisceaux d'ions carbone ou de protons qui doivent pénétrer parfois jusqu'à 30 centimètres dans le patient nécessite des équipements complexes dont les coûts sont élevés. C'est la raison pour laquelle leur nombre est limité dans le monde et notamment en France.

Mais plusieurs projets sont à l'étude : l'évolution des centres de protonthérapie existants à Orsay (ICPO) et à Nice (IMPACT), un troisième centre de protonthérapie à Toulouse (PERICLES), et deux centres d'hadronthérapie par carbone, un de traitement et de recherche à Lyon (ETOILE), et un dédié à la recherche à Caen (ARCHADE). Ils devraient permettre à la France de rester parmi les pays pionniers et innovants dans ce domaine.

HANDICAFÉ
SPONSORISÉ
PAR TOTAL

26^e
édition

FORUM

Horizon Chimie

jeudi
2 février
2012
de 9h à 19h

Maison de la Chimie
28 bis, rue Saint-Dominique
75007 PARIS
> métro Invalides

Renseignements :
01 45 35 41 82
www.horizon-chimie.fr

InfoCHIMIE

iQuesta
l'emploi et l'offre sur Internet

JeuneDip
com

le Moniteur
des pharmaciens

letudiant.fr

M
PUBLICITÉ

StepStone

SCIENCE

SF
Société Chimique de France

small
beautiful

JOBINGÉNIEUR
LE SITE EMPLOI DES INGÉNIEURS

Le Point
étudiant

labrechit

LE JOURNAL
DES GRANDES ÉCOLES

place-jeunes-com
SUPPORT DES RELATIONS ENTREPRISES
& INTERVENANTS ÉTUDIANTS



Trente secondes avant **LE MÉGASÉISME**

Richard Allen

Pour se préparer au *Big One*, le mégaséisme qu'elle attend, la Californie développe *Shake Alert*, un système d'alerte rapide capable d'avertir plusieurs dizaines de secondes à plusieurs minutes à l'avance qu'une violente secousse va se produire.

L'ESSENTIEL

✓ Les réseaux d'alerte sismique rapide détectent les toutes premières ondes d'un tremblement de terre et donnent l'alerte plusieurs dizaines de secondes à l'avance, ce qui laisse le temps de se préparer au choc.

✓ Leur principe repose sur la détection des ondes de compression, qui arrivent toujours avant les ondes de cisaillement, les plus destructrices.

✓ Plus le réseau de sismomètres surveillant la zone sismique est étendu, plus le système d'alerte sismique rapide est fiable et ses prévisions en termes de magnitude précises.

✓ De par le monde, plusieurs réseaux d'alerte sismique rapide ont déjà fait leurs preuves. Un tel dispositif – le système pilote *Shake Alert* – est en cours de test en Californie.

Leon Wideman

Les tremblements de terre ne préviennent jamais. À cet égard, le séisme californien de Loma Prieta du 17 octobre 1989 est typique : peu après 17 heures, une rupture soudaine de la faille de San Andreas secoue assez fort la région de la baie de San Francisco pour abattre plus de deux kilomètres d'une autoroute à deux étages, détruire des parties du pont reliant San Francisco à Oakland, sa ville jumelle de l'autre côté de la baie, et tuer plus de 60 Californiens, pourtant bien préparés. Et cela recommencera. Mais quand ?

Une menace permanente est si inacceptable, que, depuis l'Antiquité, les hommes essaient de s'en prémunir. C'est pourquoi les sismologues ont toujours traqué le « signal précurseur » qui, même ténu, devrait permettre de déterminer où et quand tremblera la terre. Une traque qui n'a rien donné, à tel point que les chercheurs sont nombreux aujourd'hui à douter de l'existence même de ce signal...

Alerte en temps réel

Quoi qu'il en soit, tout espoir de protéger les populations n'est pas perdu. Dès les tout premiers mouvements du sol, les sismologues peuvent aujourd'hui prévoir en quelques secondes et avec assez de certitude l'intensité et la portée d'un tremblement de terre qui commence. En combinant cette sismologie en temps réel avec les performances des communications modernes, on peut imaginer mettre au point un système d'alerte sismique rapide. C'est ce que nous essayons de faire en Californie, où au sein de l'initiative CISN (pour *California Integrated Seismic Network*, réseau sismique intégré de Californie), plusieurs universités et agences gouvernementales se sont associées pour développer *Shake Alert* (littéralement « Alerte aux secousses »), le projet pilote du système californien d'alerte sismique rapide. Comme les systèmes déjà en place dans le monde, *Shake Alert* est conçu pour donner aux habitants quelques dizaines de secondes, voire une demi-minute d'avance. Certes, cela semble peu, mais c'est bien assez pour stopper les trains, arrêter les centrales nucléaires, ouvrir les portes d'ascenseurs, et prévenir pompiers et secouristes...

L'intérêt qu'à toute avance, même aussi courte, est évident dans le cas du séisme de Loma Prieta. Son épïcêtre se trouvait à quelque 100 kilomètres au Sud de San Francisco dans les montagnes de Santa

Cruz. Depuis le moment de la toute première secousse, les ondes sismiques les plus dévastatrices ont mis plus de 30 secondes pour atteindre San Francisco et Oakland, où sont mortes 80 pour cent des victimes. Si un système d'alerte rapide avait pu annoncer le séisme avec seulement 20 secondes d'avance, cela aurait suffi pour stopper les trains, maintenir les avions en vol, faire passer au rouge les feux à l'entrée des ponts, des tunnels et autres pièges de ce genre... En 20 secondes, les ouvriers travaillant dans les environnements à risque auraient eu le temps de fuir vers des zones sûres, les machines et les systèmes sensibles de se mettre en sécurité, les écoliers et les employés de plonger sous leurs bureaux, etc. Bref, toute une région aurait pu se préparer au choc !

Le genre de système d'alerte rapide qui aurait été nécessaire lors du séisme de Loma Prieta est déjà en place au Japon, au Mexique, à Taïwan, en Turquie, en Roumanie. Le dispositif japonais serait le plus perfectionné au monde. Ces réseaux ont pour fonction de diffuser à l'échelle nationale des alertes par le biais des radios, des chaînes de télévision, des réseaux de téléphonie mobile et des systèmes d'affichage situés par exemple dans les centres commerciaux et dans les espaces publics. Depuis la mise en place des premiers de ces systèmes, il y a trois ans et demi, plus d'une dizaine de tremblements de terre les ont déjà activés. Dans les usines, les écoles, les trains ou les automobiles, les gens ont bénéficié d'un temps limité, mais précieux, pour se préparer, et les alertes n'ont entraîné ni mouvement de panique ni accident routier.

Un système californien d'alerte rapide

Il est donc plus que temps d'avoir aussi un système d'alerte rapide en Californie. Le *Big One*, c'est-à-dire le mégaséisme attendu depuis longtemps, ne s'est pas encore produit sur la faille de San Andreas. S'il est construit à temps, le système d'alerte rapide californien sauvera des vies.

Les plaques tectoniques qui pavent notre planète dérivent, et les continents se heurtent. À leurs marges, des pans entiers de croûte terrestre s'affrontent et se déforment pour absorber les tensions. Or il y a des limites à l'élasticité de la croûte terrestre, ce qui explique que pour relâcher les tensions, elle se rompt par épisodes le long de nombreux plans que

LE FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME D'ALERTE RAPIDE SHAKE ALERT

Les systèmes d'alerte rapide sont conçus pour détecter les tout premiers frémissements de la terre juste avant un séisme important, de façon à donner l'alarme le plus tôt possible avant l'arrivée des secousses les plus intenses. Le projet de système californien *Shake Alert*, par exemple, est fondé sur un réseau de sismomètres numériques déployés dans l'ensemble de l'État (voir ci-contre). L'objectif est de parvenir à donner aux gens jusqu'à une minute pour anticiper le choc, ce qui dépend avant tout de l'endroit où se trouvera l'épicentre...

L'alerte rapide d'un point de vue scientifique

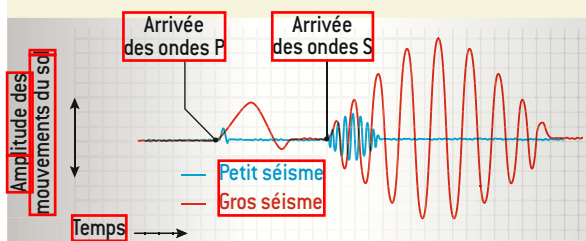
Les ondes P (ondes primaires) sont des ondes de compression.



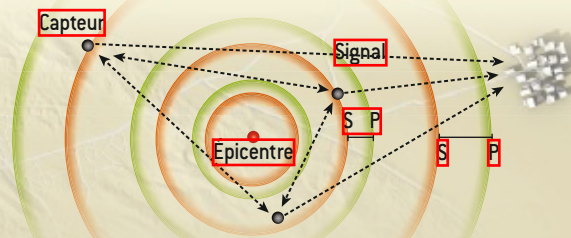
Les ondes S (ondes secondaires) sont des ondes de cisaillement.



Les séismes sont à l'origine d'au moins deux types d'ondes sismiques : les ondes P, rapides mais peu destructrices, qui, tel le son dans l'air, se propagent en comprimant la roche de proche en proche ; les ondes S, moins rapides et très destructrices, qui, telles les vagues sur la mer, se propagent en déplaçant la roche de haut en bas.



Pour discriminer les macroséismes des centaines de microséismes se produisant chaque jour, les systèmes d'alerte rapide analysent la forme des ondes P. Les petits séismes émettent des ondes P brèves et de haute fréquence (flèche bleue ci-dessus), tandis que les séismes importants envoient une impulsion de grande amplitude et de basse fréquence (flèche rouge).



Un système d'alerte rapide combine les signaux de nombreuses stations sismologiques, pour corréler dans le temps les secousses notables dues aux ondes P et repérer l'épicentre par une méthode de triangulation. Dès qu'il a terminé, il envoie une alerte électronique, qui précèdera l'onde S de plusieurs dizaines de secondes. L'estimation de la magnitude et la localisation de l'épicentre sont d'autant plus précises que le nombre de stations sismologiques est important.

Aire ci-dessous

Les trains de banlieue freinent automatiquement, réduisant les risques de déraillement.

Les usines arrêtent de tourner et mettent les équipements en mode protection.

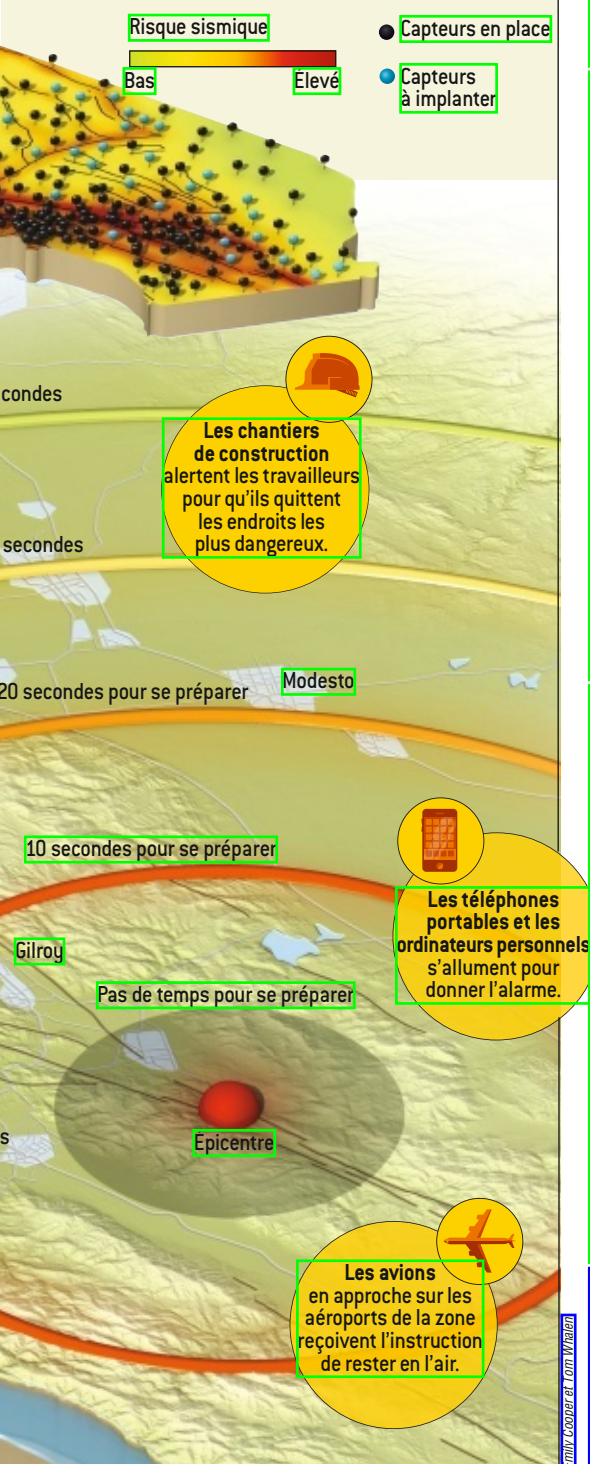
Les ascenseurs des tours s'arrêtent à l'étage le plus proche et ouvrent leurs portes.

Une alarme spéciale retentit dans les écoles et les élèves se réfugient sous leurs tables.

Combien de temps après l'alerte ?

Dans le scénario prévu, en cas de rupture de la faille de San Andreas au Sud de la baie de San Francisco, les habitants des zones peuplées auront plus d'une demi-minute pour se préparer au choc.

Bien que les séismes y soient fréquents, la Californie n'est pas encore dotée d'un système d'alerte rapide. C'est pourquoi plusieurs agences gouvernementales américaines et des universités se sont associées pour proposer de couvrir tout cet État d'un réseau de surveillance. Même si le projet s'élève à quelque 80 millions de dollars, il permettra de sauver de nombreuses vies et de limiter les dégâts quand surviendra une secousse notable.



L'on nomme des failles. Le long d'un plan de faille, les deux blocs rocheux se déforment, absorbant les contraintes, mais jusqu'à un certain point. Quand les contraintes emmagasinées sont trop importantes, les deux blocs glissent brusquement l'un contre l'autre, ce qui libère les tensions qui les déformaient. L'énorme énergie, qui décennie après décennie s'est accumulée, se relâche d'un seul coup sous la forme d'ondes mécaniques se propageant de 3,5 à 6 kilomètres par seconde. Ce sont elles qui font trembler le sol.

Des centaines de tremblements de terre se produisent chaque jour. La plupart sont si faibles que nous ne les percevons pas sans l'aide des sismomètres, c'est-à-dire de capteurs du mouvement du sol. Au cours de ces microséismes, la longueur de plan de faille qui décroche ne mesure guère plus de un à deux mètres, ce qui est trop peu pour rendre le phénomène perceptible en surface. Au cours d'un séisme de magnitude 5, en revanche, la longueur du plan de faille qui décroche atteint deux ou trois kilomètres. En surface, on sent alors la terre trembler, mais les constructions modernes résistent aux secousses associées. À la magnitude 8, la rupture se propage sur des centaines de kilomètres dans le plan de faille, créant une déchirure qui peut atteindre la surface et provoquer la rupture d'un bâtiment en deux.

Les sismologues surveillent l'accumulation des contraintes entre les tremblements de terre, et ont pu ainsi identifier de nombreuses portions de faille proches de la rupture. Pour autant, ces failles ne sont pas forcément sur le point de se rompre, car la structure profonde des failles joue aussi un rôle important dans le risque sismique. Cette structure ne pouvant être connue avec précision, la plupart des sismologues doutent qu'il sera possible de créer un système capable de prévoir un grand séisme avec quelques jours ou quelques heures d'avance. Jusqu'à preuve du contraire, le mieux que l'on sache faire aujourd'hui pour parer aux dangers d'un violent séisme est de le détecter dès son déclenchement afin de donner immédiatement l'alerte.

Certaines caractéristiques des séismes nous y aident. Ce que nous percevons comme une secousse prolongée se décompose en fait en plusieurs phases. L'énergie d'une rupture de la croûte se propage dans la terre sous deux formes distinctes : les ondes P et les ondes S (voir l'encadré ci-

contre). Ces deux types d'ondes partent en même temps de la surface de la faille, mais leur ressemblance s'arrête là. Les ondes P sont des ondes de compression comparables aux ondes sonores. Elles se propagent relativement vite (à quelque six kilomètres par seconde), mais véhiculent peu d'énergie. Pour leur part, les ondes S sont des ondes transversales s'apparentant aux vagues. Elles se déplacent plus lentement (à quelque 3,5 kilomètres par seconde) et représentent l'essentiel de l'énergie d'un séisme. Elles provoquent des mouvements horizontaux et verticaux du sol, si violents que les immeubles ressemblent à des coquilles de noix sur une mer déchaînée.

En outre, toutes les ondes sismiques ne se ressemblent pas ; suivant la taille de la zone de rupture et l'importance du glissement qui se produit, elles prennent des formes différentes. Les ondes P lors d'une rupture de petite taille et impliquant un glissement réduit sont d'amplitude relativement limitée et de hautes fréquences : elles produisent un petit signal bref. Les séismes plus puissants correspondant à une rupture de plus grande taille et à un glissement plus ample produisent des trains d'ondes P de plus grande amplitude et de fréquences plus basses. Une différence que l'on peut comparer à celle qui sépare le pépiement d'un moineau du grondement d'un ours.

Juste un sismomètre

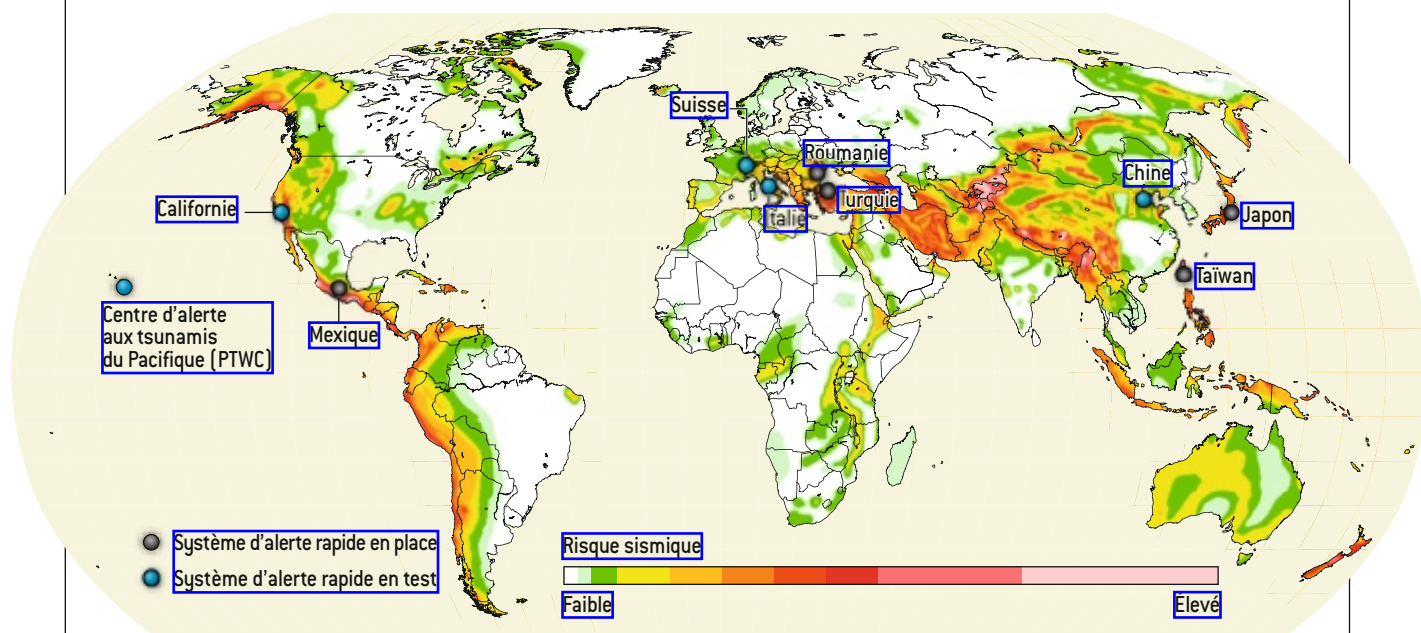
Un unique sismomètre suffit à estimer la magnitude d'un tremblement de terre à partir des caractéristiques des ondes P : un train de forte amplitude et de basses fréquences déclencherait une alerte. Cette approche fondée sur l'usage d'une seule station sismologique semble être la façon la plus rapide de donner l'alerte près de l'épicentre. Toutefois, les ruptures de faille varient – tous les tremblements de terre ne se ressemblent pas – et la nature des terrains situés sous le sismomètre influe aussi sur l'onde P. Cette variabilité du signal enregistré par le sismomètre augmente le risque de fausse alerte (alarme sans séisme) et celui d'absence d'alerte en présence d'un tremblement de terre bien réel...

Une solution possible à ce problème consiste à combiner les données enregistrées par plusieurs sismomètres distants de quelques kilomètres. Une approche, qui, compte tenu du fait que les terrains

LES SYSTÈMES D'ALERTE RAPIDE DANS LE MONDE

Il existe actuellement cinq systèmes d'alerte sismique rapide dans le monde. Chacun d'eux est adapté à la géologie et aux besoins particuliers du pays qui l'a installé. Au Mexique, des capteurs placés sur la côte Pacifique détectent les séismes se produisant dans la zone de subduction située au large et déclenchent des alarmes à Mexico. Cette métropole de 20 millions d'habitants est en effet particulièrement en danger, car elle est construite sur d'anciens lacs où les ondes sismiques entrent

en résonance et se concentrent. De même, le système roumain est conçu pour donner l'alerte à Bucarest lorsqu'un séisme se déclenche dans les montagnes des Carpates à quelque 150 kilomètres. Au Japon, en revanche, c'est tout le pays qui est menacé. Après le séisme de Kôbé en 1995 et ses 6 000 victimes, plus de 2 000 stations sismiques ont été installées sur tout le territoire, ce qui a produit le système d'alerte sismique rapide le plus étendu et le plus perfectionné de la planète.



se trouvant sous les capteurs varient, devrait livrer une estimation moyenne de la magnitude. La mise en place de réseaux sismologiques transmettant les données des capteurs vers une station de traitement est nécessaire. On doit souligner cependant que toute seconde perdue dans le traitement des données ou la transmission est problématique, car en une seconde, les dévastatrices ondes S progressent de trois à cinq kilomètres...

Il semble donc que la meilleure solution consiste à combiner l'approche par station unique et celle par réseau, afin de donner l'alerte rapidement dans les zones proches de l'épicentre tout en s'assurant que, plus loin de l'épicentre, la secousse la plus violente sera annoncée avec quelques dizaines de secondes d'avance.

Ainsi, tout système d'alerte rapide résulte d'un compromis entre la nécessité d'avoir une bonne précision sur la localisation de l'épicentre, et celle de prévoir le séisme le plus longtemps possible à l'avance. Plus on multiplie les données recueillies par le réseau sismologique, meilleures seront les prévisions; mais à mesure

que l'on améliore la qualité des alertes, on diminue le temps dont disposent les populations pour se mettre à l'abri avant la secousse. Or, pour certains usagers du système, il vaut mieux risquer quelques fausses alertes et avoir davantage de temps pour réagir. Dans une école, par exemple, on tolérera facilement quelques fausses alarmes, si cela permet d'avoir plus de temps pour mettre les enfants à l'abri. D'ailleurs, les fausses alertes seront autant d'occasions de s'entraîner pour acquérir les bons réflexes. En revanche, si une seconde suffit à éteindre un réacteur nucléaire, il est beaucoup plus long et donc très coûteux de le remettre en production. Les opérateurs nucléaires ont donc intérêt à privilégier la précision et à éviter au maximum les fausses alertes. Ils ne voudront agir qu'en ayant la certitude de l'imminence d'un séisme.

Des systèmes d'alerte rapide de natures diverses sont en fonctionnement dans le monde depuis longtemps. Dans les années 1960, les ingénieurs japonais ont par exemple intégré des sismomètres dans les rails du TGV japonais *Shinkansen*. Toute

secousse un peu trop forte déclenche une alarme dans la cabine de pilotage, afin que le conducteur fasse ralentir le train. Des chercheurs japonais ont aussi construit des réseaux de sismomètres destinés à avertir de l'avance des secousses les plus violentes.

Le système mexicain

Quant au réseau d'alerte rapide mexicain, il est conçu pour détecter les séismes sous-marins proches de la côte afin que les habitants de Mexico soient prévenus. Cette métropole de 20 millions d'habitants est en effet installée sur des fonds lacustres qui amplifient les effets des ondes sismiques. Étant donné la distance entre la côte et la ville, on peut avoir une soixantaine de secondes au moins pour réagir. Mis en service en 1993, le système d'alerte mexicain a passé son premier test deux ans plus tard. Le 9 octobre 1995, un séisme de magnitude 8 s'est déclenché au large de la côte de Manzanillo. Le système d'alerte a détecté le tremblement et a diffusé des alertes sur les chaînes de radio

et de télévision de Mexico, et par l'intermédiaire de fréquences radio dédiées. Grâce à l'alerte, le métro a été arrêté quelque 50 secondes avant l'arrivée de la secousse, et l'évacuation des écoles s'est déroulée comme prévu.

En service depuis 2007, le système japonais fait pour sa part un large usage des nouvelles techniques de communication. Les alertes sont non seulement diffusées par les radios et les télévisions, mais aussi par l'intermédiaire de récepteurs spéciaux répartis dans les foyers, les bureaux et les écoles. Des fenêtres s'ouvrent sur les écrans d'ordinateur, montrant une carte actualisée en temps réel de l'épicentre et de la progression des ondes sismiques. Un chronomètre décompte le temps restant avant l'arrivée de la secousse et en donne l'amplitude prévue. De leur côté, les opérateurs de téléphonie mobile envoient à tous les téléphones des textos annoncés par un signal sonore caractéristique. Dans les installations dangereuses, telles les centrales nucléaires, les chemins de fer, les aéroports, etc., des systèmes de communications dédiés donnent l'alerte, laquelle est adaptée au destinataire.

L'expérience nipponne montre que les systèmes d'alerte rapide ne sauvent pas seulement des vies, mais qu'ils diminuent l'ampleur des pertes économiques dues à un séisme. La survenue en 2003 de deux tremblements de terre près de Sendai avait ainsi entraîné des dégâts directs et d'autres indirects dus, notamment, à des incendies s'élevant à plus de 11 millions d'euros dans l'usine de semi-conducteurs OKI. Suite au séisme, cette unité de production a dû fermer une première fois 17 jours, puis à nouveau 13 jours. La Société OKI a ensuite investi quelque 420 000 euros pour équiper l'usine d'un système d'alerte rapide. Deux tremblements de terre comparables ont eu lieu depuis, qui n'ont entraîné que 150 000 euros de pertes et respectivement 4,5 et 3,5 jours de chômage technique.

La Californie est une zone de forte sismicité. Depuis 2006, plusieurs universités et agences fédérales américaines travaillent à la mise au point d'un système d'alerte rapide pour la Californie. *Shake Alert*, le pilote de ce système, intègre environ 400 stations sismiques qui commenceront bientôt à envoyer des alertes à un premier groupe d'utilisateurs. Le dispositif envoie aux personnes proches de l'épicentre des alertes immédiates produites par la station la plus proche,

puis aux autres habitants des alertes plus précises issues du réseau des stations sismologiques. On prévoit de pouvoir envoyer les alertes cinq secondes seulement après les premières ondes P.

Toutefois, la Californie a encore beaucoup de chemin à parcourir avant d'être couverte par un réseau aussi dense que celui du Japon. Les 400 stations sismiques existantes sont toutes concentrées autour des zones urbaines de Los Angeles et de la baie de San Francisco, ce qui laisse de vastes zones non couvertes. Même si la plupart des Californiens habitent dans ces deux agglomérations ou à proximité, le dispositif serait moins efficace si le séisme se déclenchait dans une zone non couverte. Au Japon, des capteurs sont implantés tous les 25 kilomètres dans l'ensemble du pays. Si un tel maillage existait en Californie, le système produirait moins de fausses alarmes et la population serait prévenue plus tôt.

COMME AU JAPON, IL FAUDRAIT VEILLER à diffuser les alertes sur tous les appareils reliés aux réseaux de télécommunication, car, généralement, chacun a son portable avec soi.

Comme au Japon, il faudrait veiller à diffuser les alertes sur tous les appareils reliés aux réseaux de télécommunication, car, généralement, chacun a son téléphone portable avec soi. On pourrait ainsi recevoir une alerte simple sur son téléphone annonçant la magnitude prévue et décomptant le temps jusqu'à l'arrivée de la secousse. On pourrait aussi ajouter des conseils simples, tels que : « Mettez-vous à l'abri dans un refuge » ou « Réfugiez-vous sous la table ». Les organismes et entreprises de grande taille, répartis sur plusieurs sites, auront sans doute besoin d'informations plus détaillées, telles des cartes de progression des ondes sismiques ou de répartition des secousses.

Le système d'alerte rapide californien serait peu onéreux par rapport aux coûts d'un séisme majeur. Nous estimons qu'une soixantaine de millions d'euros suffiraient à effectuer la mise à niveau des réseaux existants et à ajouter les quelque 100 stations sismologiques supplémentaires nécessaires. Le tout pourrait prendre cinq ans. Les Californiens se féliciteront-ils dans six ans de ces modestes investissements ?

L'AUTEUR



Richard ALLEN, géophysicien, est directeur-adjoint du Laboratoire de sismologie de l'Université de Californie à Berkeley, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

R. M. Allen, O. Kamigaichi et P. Gasparini (dir.), **New methods and applications of earthquake early warning**, *Geophysical Research Letters*, vol. 36, n° 5, 2009.

Richard Allen, Paolo Gasparini et Osamu Kamigaichi, **Earthquake early warning**, *Seismological Research Letters*, vol. 80, n° 5, pp. 682-782, 2009.

R. Allen et al., **The status of earthquake early warning around the world : an introductory overview**, *Seismological Research Letters*, vol. 80, n° 5, pp. 682-693, 2009.

Le site du projet *Shake Alert* : www.cisn.org

Quand la mécanique s'inspire DES PROTÉINES

Jerry Brown

La protéomimétique est l'art de déduire, des structures des protéines, des principes simples applicables à l'ingénierie.

L'ESSENTIEL

- ✓ Moteur, cliquet, ressort... Les protéines présentent une grande variété de structures remplissant diverses fonctions.
- ✓ Leur étude fournit de nouvelles idées aux ingénieurs pour améliorer des mécanismes ou en concevoir de nouveaux.
- ✓ Le superenroulement de deux chaînes protéiques, par exemple, permet de revisiter le concept d'assemblage à tenons et mortaises.
- ✓ Les myosines, quant à elles, suggèrent des astuces pour amplifier l'action d'un levier et l'adapter aux besoins.

La nature a souvent inspiré l'homme depuis l'apparition des premiers objets fabriqués, il y a quelque 70 000 ans. Son étude à différentes échelles, en particulier, a conduit à de nombreuses innovations en ingénierie. Jusqu'au XVII^e siècle, les sources d'inspiration étaient des structures visibles à l'œil nu. L'invention du microscope offrit de nouvelles perspectives.

En 1948, par exemple, l'ingénieur suisse George de Mestral inventa le principe du Velcro en observant des graines de bardane au microscope : elles sont hérissées de minuscules crochets qui s'agrippent aux mailles d'un tissu. Plus récemment, D. Bechert, du Centre aérospatial allemand, Konrad Koeltzch, de l'Université d'État de l'Ohio, aux États-Unis, et leurs collègues se sont aperçus, en étudiant la peau de requin, qu'une surface recouverte de petites écailles correctement orientées diminue la turbulence dans les liquides ; plusieurs applications ont découlé de cette observation, notamment un revêtement pour avion qui permet des économies de carburant. Et nous sommes loin d'avoir fait le tour des structures de la nature. La biomimétique – quand l'ingénierie imite la biologie – a beaucoup plus à nous apprendre.

Les techniques biophysiques du XX^e siècle, en particulier la cristallographie aux rayons X, mais aussi la résonance

magnétique nucléaire, voire la microscopie électronique, ont révélé aux ingénieurs la diversité du monde moléculaire. Les molécules présentent une variété quasi infinie de formes, de compositions, d'arrangements géométriques et de tailles qui leur confèrent des structures et dynamiques propres dont dépendent leurs propriétés chimiques et fonctionnelles. Parmi toutes les classes de molécules, les protéines, par la diversité de leurs structures et de leurs fonctions, pourraient devenir l'une des principales sources biologiques d'inspiration des ingénieurs – suffisamment, en tout cas, pour que cette inspiration mérite le nom de protéomimétique.

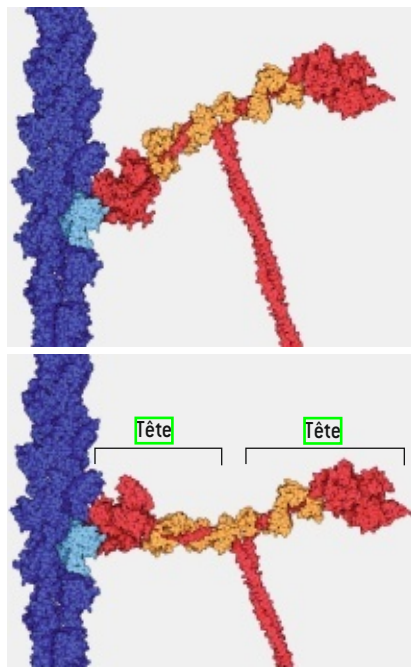
Ingénieuses protéines

À l'aide de plusieurs exemples, nous allons voir qu'elles fournissent déjà de nouvelles conceptions ou variations utiles de systèmes mécaniques bien connus, tels le système tenon-mortaise ou les leviers – conceptions qui peuvent être appliquées aux échelles tant macroscopique que microscopique. Mais auparavant, examinons pourquoi les protéines sont si prometteuses pour l'ingénierie.

La structure des protéines peut se comprendre à plusieurs niveaux ou hiérarchies. La structure primaire d'une protéine est la chaîne d'acides aminés assemblés

primaires aux structures quaternaires; cette hiérarchie facilite la comparaison des différentes structures et la mise en évidence des similarités de repliements. La troisième propriété a été comprise quand on a comparé les structures de la même protéine dans différentes conditions: de nombreuses protéines contiennent des domaines « rigides » (souvent des repliements tertiaires) reliés par des assemblages flexibles. On commence à déchiffrer les forces et les principes d'ingénierie qui modulent les mouvements de ces domaines. Une quatrième propriété tient à la solidité des mécanismes en jeu: bien que les forces non covalentes qui maintiennent la structure d'une protéine soient faibles, des principes ingénieurs augmentent la rigidité de certaines molécules et leur résistance au dépliement lors de contraintes mécaniques.

Certains de ces mécanismes ont même des analogues en ingénierie. Par exemple, Daniel Himmel, de l'Université Rutgers, et Carolyn Cohen, de l'Université Brandeis, aux États-Unis, ainsi que leurs collègues ont assimilé un domaine de la myosine, une protéine qui transforme de l'énergie chimique en mouvement (voir la figure 2), à un moteur de voiture, avec des éléments res-



2. LA MYOSINE, un moteur moléculaire (en rouge et orange une myosine dimérique), est l'exemple type de la protéomimétique. Sa liaison à un filament d'actine (en bleu) entraîne un changement de sa conformation: la tête de myosine liée à l'actine bascule. Elle se détachera ensuite et se liera un peu plus loin, comme si elle « marchait » le long du filament.

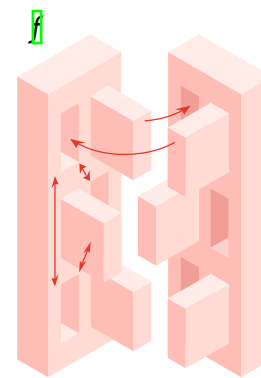
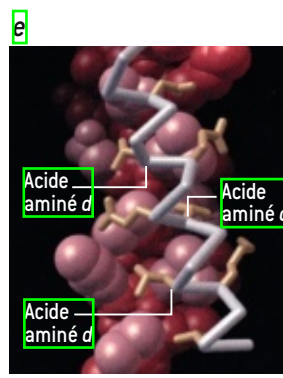
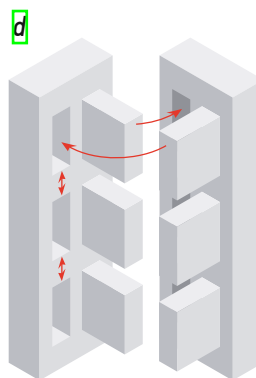
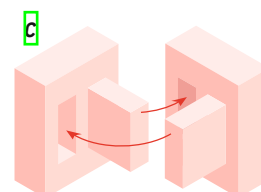
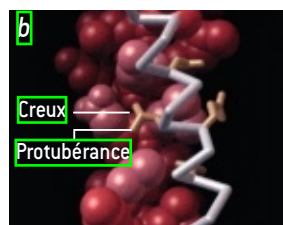
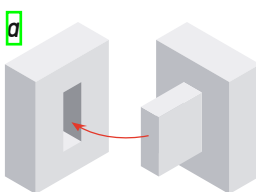
semblant à un piston et à un embrayage; David DeRosier, de l'Université Brandeis, a observé que le flagelle d'une bactérie utilise un filament en forme de tire-bouchon pour convertir un couple de moteur rotatif en poussée; Zhisong Wang et ses collègues à l'Université Fudan, à Shanghai en Chine, ont décrit la kinésine, un autre moteur moléculaire, comme un dispositif à cliquet qui imprime une direction à son déplacement sur les microtubules, de longs filaments qui participent à l'organisation interne de la cellule (voir la figure 1); Gwangro Lee, à l'Université Duke, aux États-Unis, et ses collègues ont remarqué que le motif à répétition des ankyrines, protéines qui contribuent à relier le squelette de la cellule et sa membrane, présente les propriétés et la forme d'un ressort.

Un des principes mécaniques les plus simples inventés par l'homme est l'assemblage tenon-mortaise: le tenon est une fiche qui s'ajuste dans une fente, la mortaise. Ce type d'emboîtement est l'unité de base qui stabilise la jonction de deux pièces. Son analogue moléculaire – l'interaction bouton-pression – est de même l'un des motifs les plus courants assemblant deux portions de chaîne protéique: une hélice

DE LA STRUCTURE DES PROTÉINES À L'ASSEMBLAGE À TENON ET MORTAISE

Le superenroulement de deux hélices alpha, chaînes protéiques enroulées en hélice, est l'assemblage protéique le plus courant et le mieux connu. Les hélices alpha sont jointes par des interactions bouton-pression, analogues aux emboîtements à tenons et mortaises en ébénisterie ou en mécanique. L'étude détaillée de la structure du superenroulement offre des pistes pour augmenter la robustesse de ces emboîtements.

Un assemblage à tenon et mortaise nécessite deux chaînes de production (a). Dans le superenroulement, dont un court segment est représenté ici (b), chaque hélice alpha (l'une en gris, l'autre en rouge) contient, à un niveau donné, à la fois un bouton (protubérance faisant face au milieu de la chaîne homologue) et un creux (cavité en forme de losange entre quatre protubérances, en rouge clair). En ingénierie, inclure de même un tenon et une mortaise dans chaque composant simplifierait la chaîne de production (c). Souvent, on renforce la jonction tenon-mortaise en alignant une série d'assemblages (d). C'est aussi ce que fait le superenroulement, mais en alternant boutons et creux (e). Appliquée en ingénierie, une telle structure (f) serait plus résistante que la version alignée.



alpha s'enroule autour d'une autre pour former un superenroulement (*voir l'encadré ci-dessous*). Modélisé en 1953 par le biologiste britannique Francis Crick, ce superenroulement est l'exemple le mieux connu de lien entre la séquence d'acides aminés qui compose la chaîne et la structure tridimensionnelle de la protéine.

L'interaction bouton-pression

Dans la plupart des superenroulements, chaque hélice alpha est la répétition d'un motif constitué de sept acides aminés (du type *a-b-c-d-e-f-g*). Un tel motif couvre presque deux tours de l'hélice alpha, ce qui confère aux acides aminés en positions *a* et *d* une importance particulière : si l'acide aminé *a* d'une hélice alpha fait face à l'autre hélice, l'acide aminé *d* lui fera face aussi. De fait, la stabilité du superenroulement dépend des caractéristiques (forme, taille, propriétés chimiques) des acides aminés en *a* et en *d*. Deux types d'interactions des hélices paraissent jouer un rôle particulier dans cette stabilité : les interactions hydrophobes et les liaisons ioniques. Les chaînes latérales hydrophobes des acides

aminés qui font face à l'autre hélice – en général ceux en positions *a* et *d* – attirent les chaînes latérales hydrophobes de l'autre hélice. Cette interaction est stabilisée par des liaisons ioniques qui s'établissent entre les acides aminés des deux hélices, à différentes positions du motif répété. La liaison ionique la plus stabilisante semble être celle qui relie l'acide aminé *g* d'une hélice à l'acide aminé *e* de l'autre – deux positions qui flanquent l'interaction *a-d*.

Ensemble, ces propriétés confèrent au superenroulement la disposition suivante : les deux hélices alpha sont presque parallèles et s'enroulent légèrement l'une sur l'autre vers la gauche. Les chaînes latérales des acides aminés en positions *a* (souvent des isoleucines ou des valines) et *d* (souvent des leucines) forment chacune une excroissance – un bouton – positionnée en face d'une cavité – un « creux » entre quatre chaînes latérales de l'hélice complémentaire. Boutons et creux s'emboîtent en général parfaitement, tout comme les tenons et mortaises en menuiserie. Et, de même que la multiplication des tenons et mortaises consolide l'assemblage de deux pièces, la répétition du motif en bouton-pression sur de longs superenroulements contribue

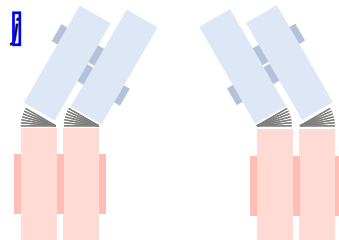
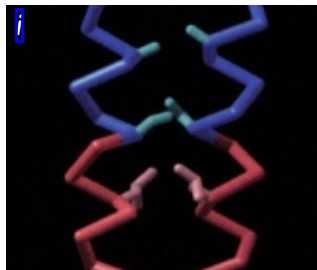
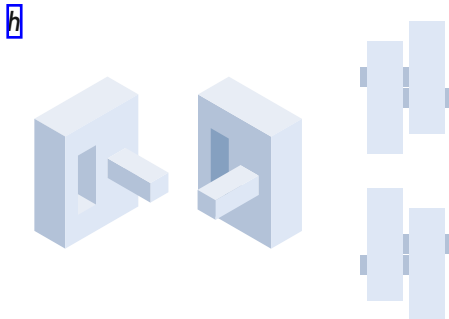
à stabiliser la structure (les liaisons ioniques, elles, la renforcent, comme la colle et les clous ajoutés au système tenon-mortaise).

Jusque-là, rien de bien nouveau pour l'ingénieur. Mais si l'on observe de plus près les différents superenroulements, de nouvelles propriétés apparaissent, offrant des pistes d'amélioration du système tenon-mortaise parfois inattendues.

Tenon-mortaise plus économe

La première observation est que, dans un plan perpendiculaire au superenroulement, chaque hélice alpha présente à l'autre à la fois un bouton et un creux. La nature « hermaphrodite » de l'hélice lui permet indifféremment de jouer le rôle de l'une ou de l'autre des chaînes superenroulées. En d'autres termes, un seul gène peut suffire pour construire un superenroulement. À l'inverse, les assemblages tenon-mortaise classiques nécessitent la production de deux types de composants : des pièces à tenons et des pièces à mortaises. Un appariement « hermaphrodite » de ces assemblages, similaire à celui observé dans les superenroulements, permettrait de simplifier la production de composants. En fait, un tel concept a déjà été appliqué dans la conception de l'enveloppe d'un capteur sismique : afin de faciliter le stockage, les deux moitiés de sa coque externe sont identiques, chacune comportant des tenons et des mortaises servant à assembler les deux parties.

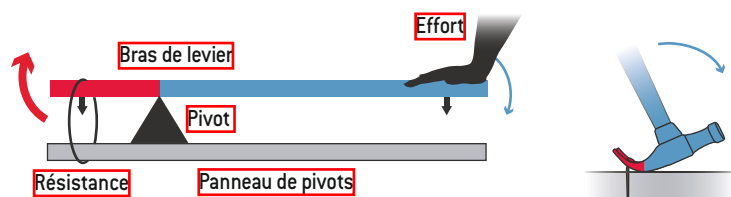
Deuxièmement, le long de chaque hélice alpha du superenroulement – plus précisément le long de la face qu'elle présente à l'autre hélice –, les couples bouton-creux alternent : dans un plan donné, une hélice présente un bouton et un creux puis, dans le plan suivant, un creux et un bouton, etc. (cela est dû au fait qu'il y a un nombre presque entier d'acides aminés par tour dans l'hélice). Nous avons vu qu'à elle seule, la succession de systèmes bouton-pression le long du superenroulement renforce l'interaction des deux hélices. Toutefois, si tous les boutons et tous les creux étaient respectivement alignés le long de chaque hélice alpha, la stabilité de l'interaction serait mise à rude épreuve par une force axiale : les courtes distances entre les creux et leur alignement fragiliseraient la structure. La disposition alternée bouton-creux le long de l'hélice semble éviter cette difficulté. Douglas Root, de l'Université du Texas du Nord,



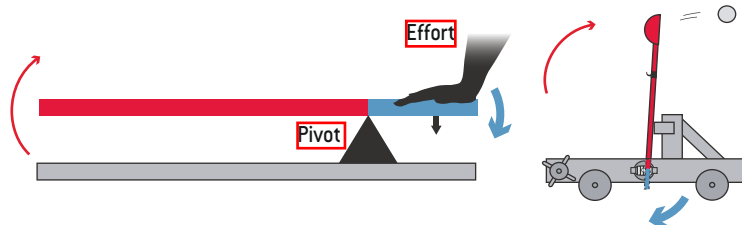
Dans le superenroulement de la tropomyosine (*g*), les boutons d'alanine, trop petits, se collent à une extrémité du creux correspondant, ce qui décale l'axe du superenroulement. De même, diminuer la taille du tenon décalerait l'axe des composants (*h*). Dans la tropomyosine, un coude se forme à la jonction d'une région à boutons de leucine, classique (*i*, en rouge), et d'une région à boutons d'alanine (*en bleu*). Un même mécanisme pourrait être envisagé en ingénierie (*j*). Les deux orientations du coude seraient équiprobables si les composants sont identiques.

LA MYOSINE : UN INGÉNIEUR LEVIER

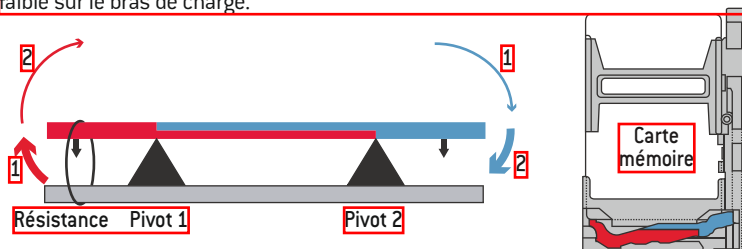
La myosine fonctionne un peu comme un levier, mais avec quelques subtilités intéressantes. Pour le comprendre, examinons plusieurs leviers. Chacun consiste en l'interaction d'un bras de charge (en rouge), un bras d'effort (en bleu) et un « panneau de pivots » ou tableau de commande (en gris).



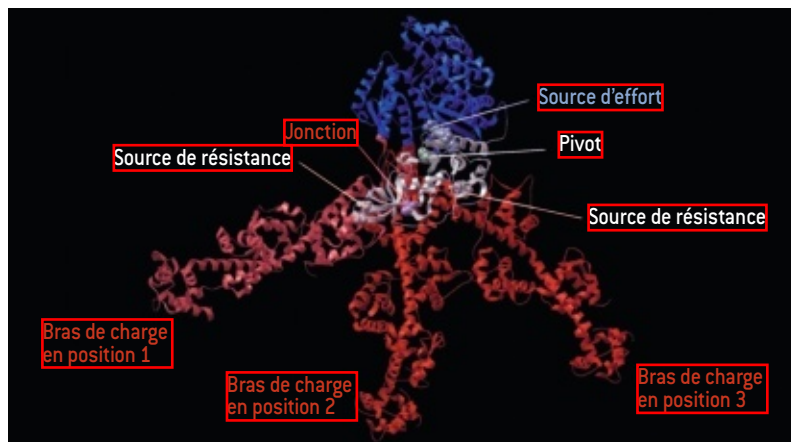
Un amplificateur d'effort classique présente un pivot simple, plus proche de la source de résistance (ou charge) que de l'endroit où l'effort est appliqué. Le bras de charge et le bras d'effort sont assemblés de façon rigide. Dans le marteau à griffe, le support est le pivot, le clou la charge et la personne qui tire sur le manche la source de l'effort.



À l'inverse, un amplificateur de distance ou de vitesse classique, telle une catapulte, présente un pivot près de la source d'effort et une force de résistance relativement faible sur le bras de charge.



Deux pivots simples placés à des endroits appropriés amplifient séquentiellement l'effort et la distance, comme dans le système d'éjection de carte mémoire décrit dans le brevet américain n° 5.383.789. Ce système à deux pivots amplifie séquentiellement une force (pour extraire la carte d'une connexion forte) et une distance (pour faciliter la prise de la carte éjectée).



La myosine peut être vue comme un levier où une partie du domaine moteur sert de panneau de pivots (en gris) à plusieurs éléments : un pivot, une source d'effort, deux sources de résistance et une jonction supplémentaire avec le bras de charge. Celui-ci (en rouge) est ici représenté dans trois positions.

aux États-Unis, et ses collègues ont récemment réalisé une simulation moléculaire mécanique d'un superenroulement soumis à des forces axiales. Leurs résultats suggèrent que la structure résiste assez bien à la dissociation, ce qui pourrait être dû en partie au motif alterné des interactions bouton-pression.

De même, un assemblage à tenons et mortaises « hermaphrodite » multiple où tous les tenons et toutes les mortaises sont respectivement alignés sur chaque pièce, tel celui du capteur sismique mentionné plus haut, est plus résistant qu'un assemblage simple. Et il le serait sans doute encore davantage si, sur chaque pièce, les couches de tenons-mortaises étaient alternées et non alignées.

Le cas de la tropomyosine

Enfin, alors que l'étude des superenroulements révèle en général des structures favorables à la stabilité, nous avons observé que certaines protéines, telle la tropomyosine, présentent, dans leur superenroulement, une semi-flexibilité.

En analysant la séquence de la tropomyosine, on constate que, dans les hélices alpha superenroulées, des régions riches en acides aminés de la taille de la leucine alternent avec des groupes d'alanine, un acide aminé plus petit. Dans les structures cristallines, les « boutons » de leucine s'ajustent parfaitement aux creux de l'hélice voisine. Il se forme ainsi un assemblage relativement serré et fixe entre deux hélices qui coïncident presque parfaitement. En revanche, le bouton d'alanine est trop petit pour établir un contact avec toutes les « parois » d'un creux de l'hélice voisine – quatre chaînes latérales qui forment une cavité en forme de losange : au lieu d'occuper toute la cavité, la chaîne latérale de l'alanine se positionne à l'une de ses extrémités, établissant un contact serré avec trois de ses quatre chaînes latérales. Par analogie, la chaîne latérale de l'alanine est un « pseudotenon », plus petit que sa mortaise, la fiche étant calée à l'une ou l'autre des extrémités de la fente. En conséquence, les assemblages bouton-creux avec alanine sont décalés (d'environ 0,1 nanomètre) le long de l'axe du superenroulement les uns par rapport aux autres.

La juxtaposition des régions stables à acides aminés de type leucine et des régions avec alanine, décalées le long de

l'axe, engendre un enroulement local plus important dans la région des alanines que dans la région stable. À la jonction des deux régions apparaît un coude assez important (d'environ six degrés) sur l'axe du superenroulement.

La capacité de la tropomyosine à s'incurver est essentielle pour sa fonction biologique: elle doit s'enrouler autour de l'actine (un autre élément du squelette de la cellule) pour réguler l'interaction entre la myosine et l'actine. Elle montre aussi comment, mécaniquement, une fiche insérée dans une fente peut créer une pièce avec un coude.

Et ce n'est pas tout. En général, le superenroulement de la tropomyosine est constitué de deux hélices alpha identiques. Aussi, les boutons d'alanine ont autant de chances de se caler contre le haut de la cavité qui les reçoit que contre le bas. En d'autres termes, la tropomyosine peut former un coude à la jonction des segments riches en alanines et de ceux riches en leucines, dans les deux directions opposées et avec la même probabilité. Elle montre donc aussi comment une permutation entre deux positions bistables d'une fiche dans une fente peut servir à produire un objet à coudes semi-flexibles.

Un autre mécanisme inventé depuis fort longtemps (Archimède soulevait le monde avec) est le levier – une pièce rigide allongée posée sur un pivot. Le levier est surtout connu pour sa capacité à amplifier un effort. Cet avantage mécanique est obtenu

lorsque la longueur du bras d'effort – la distance entre le pivot et l'extrémité où est appliqué l'effort – est supérieure à celle du bras de charge ou de résistance – distance entre le pivot et l'extrémité qui résiste à l'effort. C'est par ce mécanisme qu'on extrait un clou récalcitrant à l'aide d'un marteau à griffe (voir l'encadré page 72). À l'inverse, les leviers peuvent aussi servir à amplifier la distance (et la vitesse), lorsque le bras de charge est plus long que le bras d'effort. C'est le principe de la catapulte. De même, la contraction du biceps – de courte distance – suffit à déplacer l'avant-bras et la main (et tout ce qu'elle peut tenir) sur une distance bien plus importante. Et au sein même du muscle, les myosines utilisent aussi ce principe pour produire une contraction rapide du châssis sur lequel elles sont fixées, le sarcomère. Nous allons voir, cependant, que les myosines mettent en jeu des mécanismes complémentaires qui amplifient encore plus la distance, voire la force de levier elle-même.

Le levier et la myosine

Toutes les myosines (musculaires ou non) présentent une région globulaire – la tête de la myosine – contenant un domaine moteur – une région qui convertit l'énergie chimique en énergie mécanique: une molécule d'ATP (adénosine triphosphate) se lie au domaine moteur; la myosine l'hydrolyse en deux molécules (adénosine diphosphate, ou ADP, et phosphate);

L'AUTEUR

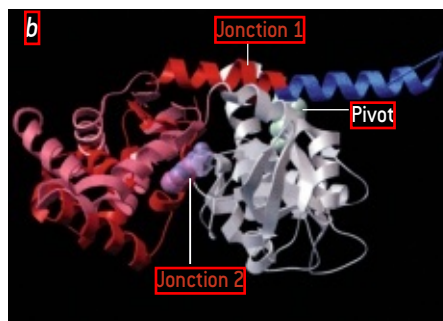
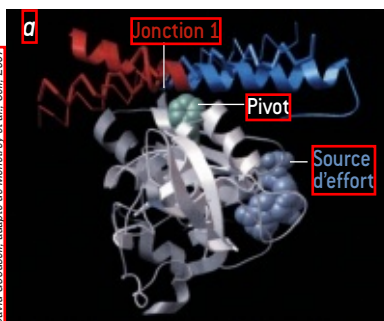
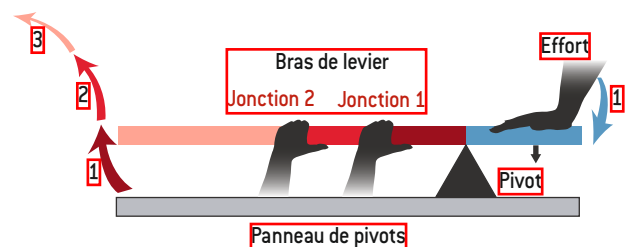


Jerry BROWN est chercheur au Centre de recherche Rosenstiel en sciences médicales fondamentales, à l'Université Brandeis, à Waltham (Massachusetts, États-Unis).

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

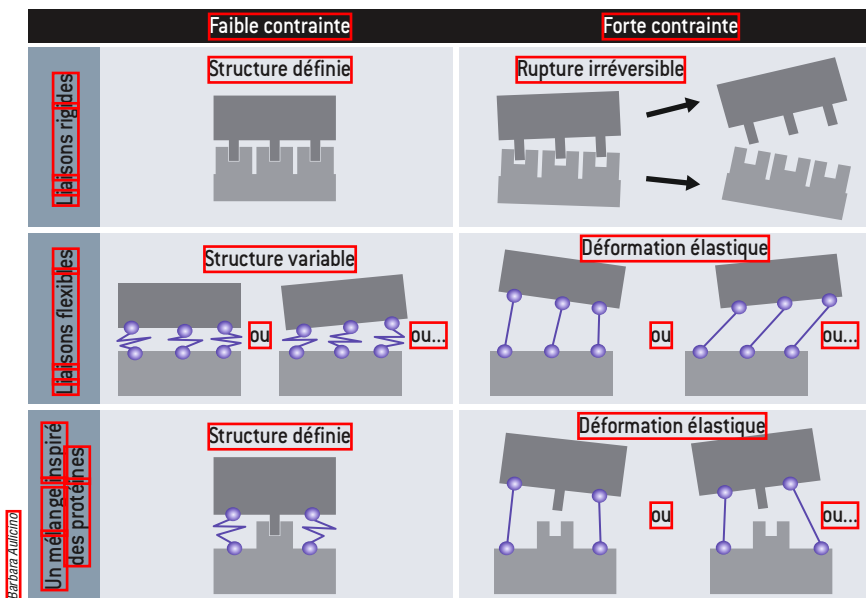
UN LEVIER D'UNE AMPLÉUR INATTENDUE

Certaines myosines modulent l'amplification de la distance parcourue par le bras de charge grâce à une ou plusieurs jonctions supplémentaires du bras au panneau de pivots. Ces jonctions créent autant de contraintes sur le bras de charge, lesquelles entraînent localement le déroulement du bras. Ces changements de conformation locaux font basculer un peu plus le bras, comme si l'on pliait son coude.



La myosine bascule en deux phases (a, seule la région centrale est représentée): le bras de levier (en rouge et bleu) tourne d'abord autour d'un pivot. Le bras de charge se rapproche alors d'une portion du panneau de pivots (en gris) et s'y entortille (jonction 1), augmentant l'amplitude de bascule. Dans la myosine VI, une autre région du bras de charge se joint au panneau de pivots (b, jonction 2), augmentant encore l'amplitude de bascule du bras de levier.

CARTONNE AUTOUR



3. EN MÉCANIQUE, il est difficile de trouver un juste milieu entre robustesse et élasticité. Un assemblage constitué uniquement de liaisons rigides peut subir une rupture irréversible sous l'effet d'une forte contrainte (*première ligne*). À l'inverse, un assemblage ne comportant que des liaisons flexibles ne peut pas former une structure bien définie (*deuxième ligne*), que la contrainte soit faible (*colonne de droite*) ou forte (*colonne de gauche*). Un système hiérarchique de liaisons rigides et flexibles inspiré des protéines (*troisième ligne*) pourrait en revanche conférer à l'assemblage, d'une part, une structure unique stable en cas de faible contrainte (*à gauche*) et, d'autre part, une déformabilité élastique réversible sous forte contrainte (*à droite*).

BIBLIOGRAPHIE

J. Brown *et al.*, From the cover: visualizing key hinges and a potential major source of compliance in the lever arm of myosin, *PNAS*, vol. 108, n° 1, pp. 114-119, 2011.

M. Mukherjee *et al.*, Myosin VI dimerization triggers an unfolding of a three-helix bundle in order to extend its reach, *Molecular Cell*, vol. 35, pp. 305-315, 2009.

J. R. Forman *et al.*, Mechanical unfolding of proteins: insights into biology, structure and folding, *Current Opinion in Structural Biology*, vol. 17, pp. 58-66, 2007.

Y. Bar-Cohen, Biomimetics – using nature to inspire human innovation, *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 1, pp. 1-12, 2006.

L'énergie libérée change la conformation du domaine moteur, rendant possible son interaction avec un filament d'actine; l'interaction libère la molécule d'ADP, ce qui provoque un basculement de la tête de myosine le long du filament d'actine; une nouvelle molécule d'ATP se lie au domaine moteur, qui se détache alors de l'actine, puis le cycle recommence. Par ces mouvements, la myosine progresse le long du filament d'actine.

Le domaine moteur est constitué de quatre sous-domaines globulaires relativement rigides, liés les uns aux autres par des assemblages flexibles à un seul brin (une seule chaîne d'acides aminés sans structure secondaire particulière). Les deux phases du cycle qui modifient la conformation de la myosine – la consommation d'ATP et la fixation à l'actine – entraînent des changements mineurs dans les orientations et les positions relatives des sous-domaines moteurs. Toutefois, ces changements sont amplifiés dans une partie adjacente au domaine moteur: le groupe de Taro Uyeda, de l'Institut national japonais de recherche interdisciplinaire, et, plus récemment, Stefan Fischer, de l'Université de Heidelberg, en Allemagne, et ses collègues ont montré qu'ils sont transmis par une sorte de pivot qui fait basculer une portion allongée de

la tête de myosine que l'on nomme bras de levier, voisine du domaine moteur.

Le bras de levier de la myosine (équivalent au bras de charge en mécanique) est long par rapport au bras d'effort (le domaine moteur), ce qui permet déjà à la myosine de faire de grands pas le long de l'actine. Mais le moteur moléculaire utilise aussi une autre astuce pour augmenter encore la distance parcourue (et sa vitesse): une flexibilité supplémentaire, dans le bras de levier lui-même. Selon l'équipe de S. Fischer, qui a modélisé le mouvement de bascule de la myosine, celui-ci se décompose en deux phases.

Un levier flexible

Dans la première, nommée « phase de bascule », le bras de levier bascule d'environ 25 degrés sur son pivot, selon le principe que nous venons de décrire. Toutefois, à mesure qu'il bascule, une contrainte semble apparaître près du pivot. En réponse, la portion du bras de levier qui repose sur le pivot – une hélice – se déroule localement d'un tour. Cette seconde phase, dite « de déroulement », entraîne une rotation supplémentaire de 40 à 50 degrés du bras de levier. Une myosine, la myosine VI, semble même utiliser cette phase de déroulement à deux endroits sur son bras de levier. L'étude de la myosine VI par Anne Houdusse et ses collègues à l'Institut Curie, à Paris, a récemment indiqué qu'au sein du bras de levier, un autre pivot permet d'amplifier encore davantage l'amplitude du basculement, augmentant ainsi la taille des pas produits par cette myosine le long de l'actine (*voir l'encadré page 73*). Et tout récemment, nous avons détecté, dans une myosine musculaire de coquille Saint-Jacques, une seconde région flexible sur le bras de levier, lui imprimant un mouvement supplémentaire qui ressemble à celui du pied par rapport à la jambe.

Il n'est pas rare qu'en ingénierie, on ait besoin d'amplifier la distance parcourue par un levier sans en accroître sa longueur. Diverses solutions ont été proposées, notamment un mécanisme d'éjection de carte dans un connecteur de carte *IC Memory* (*voir l'encadré page 72*). Cette étude des myosines offre une nouvelle piste: l'introduction d'un ou plusieurs assemblages flexibles dans le bras de levier lui-même.

En quelque sorte, les myosines élargissent le rôle du simple pivot à celui d'un « tableau de commande » comportant

plusieurs éléments susceptibles d'agir – ensemble ou séparément – sur le bras de levier : des pivots simples, des éléments introduisant une flexibilité dans le bras, d'autres retenant le bras d'effort ou le bras de charge, augmentant soit l'effort, soit la résistance à l'effort, selon les besoins. Ce levier à tableau adaptable ouvrira peut-être des perspectives en mécanique.

Les protéines, en particulier la titine (une longue molécule du sarcomère des muscles striés des vertébrés) et la partie S2 des myosines, qui permet de rassembler deux têtes ensemble (voir la figure 2, en orange), peuvent également nous apprendre à concevoir des structures plus robustes aux contraintes mécaniques. Ces dernières années, des techniques telles la microscopie à force atomique et la dynamique moléculaire ont commencé à révéler la séquence d'événements survenant quand des protéines sont soumises à des contraintes mécaniques. En cours de développement, ces méthodes se limitent à des expériences simples, tel l'étirement d'une protéine par ses deux extrémités. Néanmoins, elles

montrent que les protéines développent toute une variété de réponses à l'étirement mécanique. L'une d'elles, fréquemment observée, est la rupture séquentielle de certaines interactions.

Des structures plus robustes

Ainsi, la simulation d'un étirement du domaine IG27 de la titine et du segment S2 de la myosine de la coquille Saint-Jacques suggère que les liaisons de longues chaînes latérales flexibles se rompent après celles des chaînes latérales hydrophobes plus courtes et des liaisons hydrogène de la chaîne protéique principale. Kathryn Scott, de l'Université d'Oxford, en Angleterre, et ses collègues ont suggéré que la présence de domaines résistants adjacents à d'autres moins robustes diminue la probabilité d'erreurs de repliement lorsque l'étirement est stoppé. Ce panachage créerait en outre une hiérarchie dans les interactions, qui s'adapterait à différents niveaux de contraintes mécaniques.

Globalement, toutes ces études suggèrent que les protéines « robustes » alternent des éléments ayant divers types de réponses aux contraintes mécaniques. Elles peuvent ainsi osciller entre des conformations rigides, nécessaires par exemple pour les fonctions enzymatiques, et des conformations flexibles ou partiellement dépliées, par exemple pour engendrer un mouvement, changer de conformation en réponse à la liaison d'une autre protéine ou, simplement, préserver leur intégrité. De même, on pourrait envisager, à différentes échelles (mécanique, nanotechnologies, etc.), des structures de forme bien définie dans les conditions normales de fonctionnement et qui s'incurveraient sans se rompre dans des conditions de forte contrainte.

Cela ne fait plus aucun doute, la biomimétique inclut désormais une nouvelle sous-spécialité, la protéomimétique. La vérification des mécanismes inspirés des protéines, l'étude de leurs applications et la recherche de nouvelles idées dans d'autres protéines sont autant de pistes à explorer.

Les Petits Précis à déguster sont une introduction ludique à l'algèbre, la géométrie, la physique ou encore la chimie. Au fil des pages, le lecteur est entraîné dans un voyage fascinant à travers la vie et les découvertes des plus grands scientifiques jusqu'à nos jours. Illustré de nombreux exemples, chaque titre est enrichi d'exercices et autres énigmes qui constituent autant de défis à relever...

savourez-la science avec Les petits précis à déguster !

Belin:
Disponible en librairie
ou sur www.pourlascience.fr/librairie

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

Ce mois-ci *Pour la Science* vous propose de plonger dans l'histoire du nucléaire, des mathématiques ou encore de l'apparition de la vie ; ou d'explorer des phénomènes scientifiques étonnants tels les carrés magiques, la supraconductivité, la météorologie...

La bombe et les hommes

Aleksandra Kroh

Ce livre raconte l'histoire des hommes qui ont été marqués par la bombe nucléaire : ceux qui l'ont conçue, testée et perfectionnée, ses victimes civiles et militaires ou encore ceux qui approuvèrent son utilisation... Un récit crucial, alors que la France peine à tourner la page de ses 210 essais nucléaires.

Editions Belin/Pour la Science 2011
176 pages – 18,50 euros – ISBN 978-2-7011-5501-2



Les carrés magiques

Du Lo Shu au Sudoku

Arno Van den Essen

Si les carrés magiques ont conquis la planète sous la forme moderne du sudoku, leur histoire commence il y a plus de 5000 ans, avec le premier carré 3×3 ou Lo Shu ! Accessible sans connaissances mathématiques particulières, cet ouvrage illustre la richesse et la modernité des carrés magiques. Il propose de multiples exemples ludiques à compléter soi-même, accompagnés de leur solution.

Editions Belin/Pour la Science 2011
224 pages – 19,00 euros – ISBN 978-2-7011-5554-8

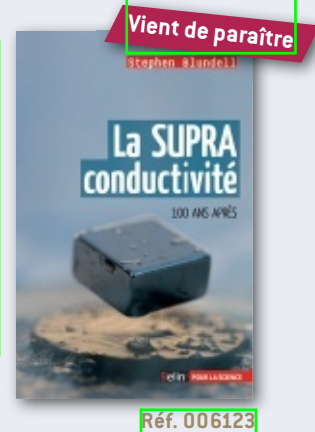


La supraconductivité : 100 ans après

Stephen Blundell

La supraconductivité est l'un des phénomènes les plus intrigants de la physique : à basse température, certains corps se mettent à conduire le courant électrique sans pertes. Mieux : ils font léviter les aimants ! Cet ouvrage détaille la découverte de la supraconductivité et nous fait partager la frénésie créatrice des physiciens quantiques pour en percer les mécanismes.

Editions Belin/Pour la Science 2011
168 pages – 18,00 euros – ISBN 978-2-7011-6123-5



En partenariat
avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777



Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.



Réf. 005694

La formule secrète

Fabio Toscano

Au XVI^e siècle, les mathématiciens italiens se lancent des défis et s'affrontent en duels publics pour résoudre des problèmes difficiles devant des spectateurs passionnés. Suivant cette tradition, Tartaglia et Cardan sont les acteurs majeurs de la polémique la plus féroce que l'histoire des mathématiques ait jamais connue. Une querelle qui aboutit à l'une des découvertes les plus importantes de l'algèbre.

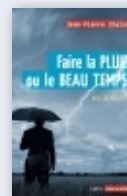
Editions Belin/Pour la Science 2011
184 pages – 19,00 euros – ISBN 978-2-7011-5694-1

Faire la pluie ou le beau temps

Jean-Pierre Chalon

Peut-on limiter les dégâts qu'occasionnent la grêle, les vents tempétueux, les brouillards épais, la foudre ? L'auteur retrace les tentatives historiques et contemporaines pour modifier artificiellement le temps et présente les résultats des recherches les plus récentes. Il apporte une synthèse éclairante sur les phénomènes météorologiques et les tentatives de l'homme pour dompter la nature.

Editions Belin/Pour la Science 2011
176 pages – 19,00 euros – ISBN 978-2-7011-5101-4



Réf. 005101

50 expériences pour épater vos amis à table



Jack Guichard et Guy Simonin,
Photos de Josselin Guichard avec
la collaboration de Kamil Fadel

Vous allez surprendre vos amis avec ces expériences étonnantes : retournez votre verre de vin sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'une explication simple et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.

Réf. 090544

Éditions le Pommier 2011

168 pages – 18,90 euros – ISBN 978-2-7465-0544-5

Comment la vie a commencé



Alexandre Meinesz

D'où vient la vie ? Comment est-elle apparue sur Terre ? Cette nouvelle édition tient compte de la découverte en 2010 au Gabon de fossiles apportant la preuve de l'existence d'une vie organisée et complexe il y a plus de 2,1 milliards d'années. Une découverte qui déplace le curseur de 1,5 milliard d'années et remet en cause nos

Réf. 005911

connaissances actuelles sur l'apparition de la vie.

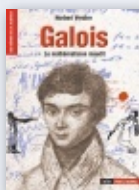
Éditions Belin/Pour la Science 2011

432 pages – 19,00 euros – ISBN 978-2-7011-5911-9

Galois, le mathématicien maudit

Norbert Verdier

La vie et l'œuvre d'un mathématicien hors norme. Chassé de l'École normale pour ses discours politiques, il est incarcéré à l'âge de 20 ans pour diverses prises de position violentes. Libéré au bout de six mois, il ne sort que pour tomber amoureux et meurt lors d'un duel engagé pour sa belle. La nuit précédant le combat, il rédige son grand mémoire aux idées encore fécondes aujourd'hui. Le lecteur suivra ce génie tourmenté dans les méandres de l'histoire.



Réf. 075112

Éditions Belin/Pour la Science 2011

144 pages – 18,00 euros – ISBN 978-2-8424-5112-7

Histoires de géomètres... et de géométrie

Jean-Louis Braham

L'arpenteur babylonien mesure les parcelles agricoles, le jardinier d'Ératosthène donne de la grâce au jardin de son maître, le maçon picard voyage dans la France gothique où l'architecture défie la pesanteur... et Léonard de Vinci nous explique comment tromper l'œil, comment simuler la profondeur et la lumière... Tous mettent en scène des pratiques vivantes de la géométrie.



Réf. 090585

Éditions le Pommier 2011

288 pages – 27 euros – ISBN 978-2-7465-0585-8

LA SÉLECTION

POUR LA
SCIENCE
C'EST AUSSI...

Virus & hommes, un destin commun ?

Frank Ryan

Éditions le Pommier 2011

408 pages – 27 euros

ISBN 978-2-7465-0512-4

Réf. 090512



La science de Sherlock Holmes

E.J. Wagner, Traduction
de Sarah Gurcel

Éditions le Pommier 2011

264 pages – 22 euros

ISBN 978-2-7465-0552-0

Réf. 090552



À contre-idées Pour jouer avec les mots... et les idées

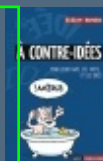
Didier Nordon

Éditions Belin/Pour la Science 2011

224 pages – 19 euros

ISBN 978-2-8424-5110-3

Réf. 075110



Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie *

ou en renvoyant le bon de commande ci-dessous.

* Pour commander les titres édités par Le Pommier : www.editions-belin.fr

BON DE COMMANDE

à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tél. : 0 808 655 255 • e-mail : pourlascience@daudin.fr

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

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

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

C.P. : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél.* : _____

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ par carte bancaire

Numéro _____

Date d'expiration _____

☐ par mandat administratif

Signature obligatoire

Belin
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777



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

DPL411

HISTOIRE DES SCIENCES

Les dinosaures nains de Transylvanie

Au début du XX^e siècle, le baron Nopcsa, un aristocrate hongrois, déduisit de l'étude de fossiles transylvaniens des hypothèses sur l'évolution des dinosaures. Il était en avance sur son temps de plusieurs décennies.

Gareth DYKE

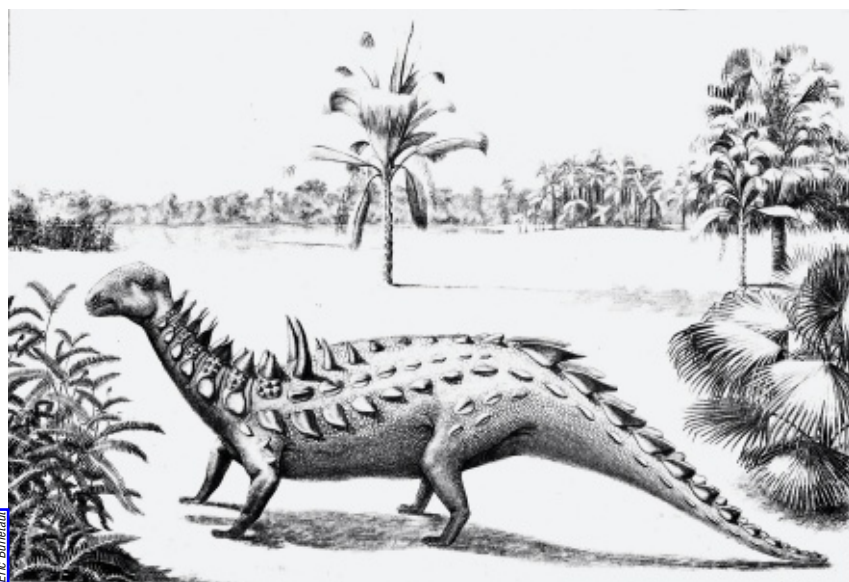
Un matin de printemps 1906, dans le hall d'entrée du *British Museum*, à Londres, un petit homme en tenue chic, coiffé d'un chapeau melon et muni d'une canne, marche près du squelette géant d'un diplodocus. Il dégage avec précaution un des os géants de l'orteil du dinosaure de son armature en fer, le bascule davantage, puis le remet en place. Jetant un coup d'œil autour de lui, il constate que sa manœuvre n'est pas passée inaperçue : les gardiens du musée fondent sur lui de tous côtés. Quelques minutes plus tard, ils jettent le visiteur pimpant dans la rue.

L'homme qu'ils viennent d'expulser est Franz Nopcsa (prononcé « nopcha »), baron de Szacsal, en Transylvanie. Cet aristocrate hongrois fait alors autorité en matière de dinosaures et autres fossiles. Ayant noté que l'orientation de l'orteil du diplodocus était incorrecte, le baron avait simplement essayé de le replacer. L'histoire lui a été bien plus reconnaissante que les gardiens du musée : pour les paléontologues actuels, il est celui qui a découvert et décrit certains des premiers dinosaures d'Europe centrale.

Néanmoins, les détails de la vie personnelle de Nopcsa ont souvent éclipsé son héritage intellectuel. Aventureux, excentrique et

ambitieux, Nopcsa était un personnage haut en couleur. Il servit comme espion pendant la Première Guerre mondiale et tenta de devenir roi d'Albanie. Il était également ouvertement homosexuel.

Il y a cependant bien plus à dire sur sa collection de fossiles que sur ses affaires personnelles et politiques. D'une part, il a inventé des techniques d'analyse de fossiles qui sont toujours de rigueur pour la recherche paléontologique. D'autre part, selon des recherches récentes, ses théories sur l'évolution des dinosaures avaient plusieurs décennies d'avance sur leur temps. Nopcsa insistait sur le fait que ses dinosaures transylvaniens permettaient de comprendre l'évolution des dinosaures à l'échelle mondiale. Grâce à la découverte de nouveaux fossiles, les scientifiques mesurent aujourd'hui à quel point il avait raison.



1. RECONSTITUTION SUIVANT LE BARON NOPCSA (page ci-contre) d'un des dinosaures de Transylvanie, l'ankylosaure *Struthiosaurus* (réalisée en 1929, cette reconstitution est aujourd'hui quelque peu surannée).

Nanisme insulaire

Nopcsa toucha des fossiles pour la première fois en 1895 quand sa sœur, Ilona, découvrit de grands os dans l'un des domaines de la famille, en Transylvanie, qui faisait alors partie de l'Autriche-Hongrie. Il se précipita sur les vestiges et les emporta à Vienne, où il faisait ses études, pour les montrer à l'un de ses professeurs de géologie. Le professeur lui indiqua qu'il s'agissait de dinosaures et lui offrit l'aide d'un technicien du département pour collecter davantage de restes et préparer une description formelle. Mais, malgré sa formation succincte en paléontologie, le jeune Nopcsa décida, à 18 ans, d'agir seul et travailla jour et nuit pour apprendre l'anatomie des grands rep-

tiles. Il fut rapide : en deux mois, il rédigea un article décrivant les os trouvés par Ilona comme étant ceux d'une nouvelle espèce d'ornithopode de Transylvanie, qui sera nommée plus tard *Telmatosaurus*.

Cet article marqua le début d'une carrière longue et productive : au cours des 35 années suivantes, Nopcsa écrivit plus de 100 articles scientifiques sur des fossiles, dont bon nombre étaient innovants. Il fut l'un des premiers à rechercher comment l'anatomie d'animaux éteints et la façon dont ils avaient été fossilisés ensemble pouvaient aider à comprendre leurs interactions de leur vivant ; il a soutenu l'idée selon laquelle les oiseaux étaient une sorte de dinosaures et non de lointains cousins des reptiles – un point de vue aujourd'hui partagé par la majorité des paléontologues ; il a également établi la carte géologique de vastes régions d'Europe centrale.

Les recherches de Nopcsa l'amènèrent à voyager loin, mais son résultat le plus important fut le fruit de découvertes effectuées sur ses terres. Le baron nota que le *Telmatosaurus*, le sauropode nain *Magyarosaurus* (décrit et nommé par le paléontologue allemand Friedrich von Huene), et d'autres dinosaures trouvés sur ses domaines étaient plus petits que d'autres espèces étroitement apparentées. Le *Magyarosaurus*, par exemple, mesurait six mètres de long, alors que les autres sauropodes atteignaient 15 à 20 mètres.

Géologue accompli, Nopcsa savait que le *Magyarosaurus* vivait en Transylvanie à la fin du Crétacé, il y a environ 70 millions d'années, alors qu'une mer chaude et peu profonde nommée Téthys recouvrait une grande partie de l'Europe du Sud, ne laissant que quelques îles aux animaux terrestres. Il savait aussi qu'au fil de l'évolution, certains mammifères insulaires, tel l'éléphant de Méditerranée récemment éteint, avaient rapetissé, vraisemblablement en raison d'une adaptation à la diminution des ressources alimentaires disponibles dans leur environnement. En faisant le rapprochement, Nopcsa émit l'hypothèse, en 1914, que ses dinosaures avaient vécu sur une île née de l'inondation de l'Europe par la Téthys – île qu'il nomma Hâtszeg : selon lui, la petite taille de ces dinosaures était le résultat du nanisme insu-

laire qu'avaient subi leurs espèces sur cette île hypothétique au fil de leur évolution.

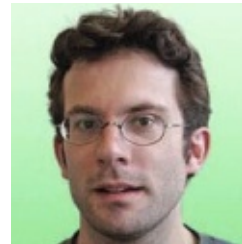
Bien que les contemporains de Nopcsa aient eu connaissance des éléphants nains de Crète et d'autres îles méditerranéennes, personne n'avait imaginé qu'une telle diminution de taille avait pu se produire chez les dinosaures. La théorie audacieuse du baron fut en grande partie ignorée. Ce n'est qu'à la fin des années 1970, lorsque les animaux de Transylvanie du Crétacé suscitèrent de nouveau l'intérêt, que la théorie du nanisme de Nopcsa refit surface. Depuis lors, elle a été confirmée, en partie par les dimensions des dinosaures découverts ultérieurement : ceux de Hâtszeg étaient bien de taille réduite par rapport à leurs homologues du reste de l'Europe, de l'Asie et de l'Amérique du Nord.

Dinosaures petits ou juvéniles ?

Notamment, mes travaux ont récemment soutenu les idées de Nopcsa. Dans une collection d'os fossiles de la fin du Crétacé mise au jour dans les années 1970 dans une mine de bauxite de Transylvanie, j'ai étudié des restes d'oiseaux et de ptérosaures de petite taille datant du début du Crétacé, il y a 120 millions d'années. D'après les éléments d'aile préservés, ces animaux étaient probablement capables de voler sur de longues distances – une caractéristique que l'on pourrait s'attendre à trouver sur une île isolée. En fait, à l'instar de celles trouvées à Hâtszeg, à plusieurs dizaines de kilomètres à l'Est, les espèces préservées dans la mine de bauxite semblent avoir été insulaires. La mine faisait sans doute partie d'une autre île de l'archipel créé par la Téthys au Crétacé.

Un point faible de la théorie de Nopcsa sur les dinosaures nains, quand il la proposa pour la première fois, était qu'il ne pouvait exclure la possibilité que ses dinosaures étaient petits simplement parce qu'ils étaient jeunes. Il disparut avant d'avoir pu résoudre cette difficulté. Pourtant, il avait entre-temps mis au point une technique histologique remarquable qui, appliquée aux ossements fossiles du *Magyarosaurus*, aurait levé l'incertitude : dans un article révolutionnaire des années 1930, il explique comment, à partir de la structure

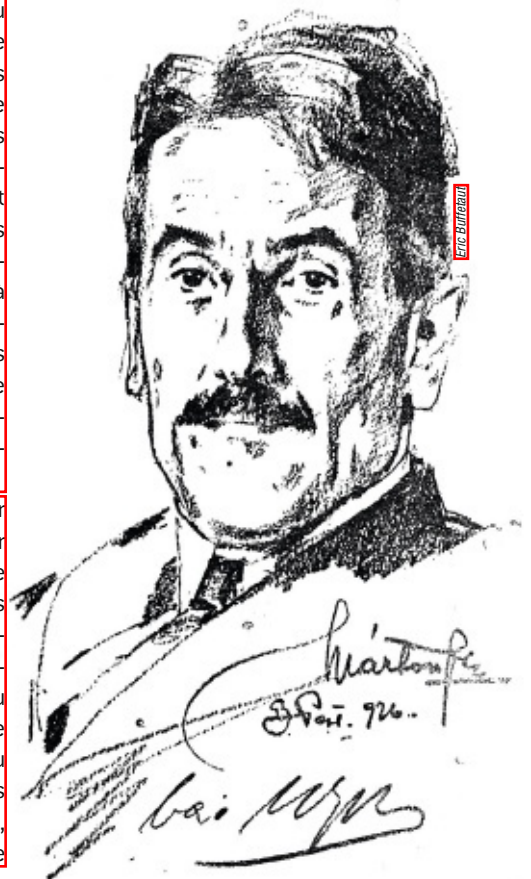
L'AUTEUR



Gareth DYKE est paléontologue à l'Université de Southampton, en Angleterre.

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 5 janvier 2012, Eric Buffetaut évoquera Nopcsa dans la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h.
www.franceculture.com



microscopique de l'os – son histologie –, il a prouvé qu'un fossile d'une soi-disant nouvelle espèce de dinosaure de type bec-de-canard d'Amérique du Nord n'était en réalité qu'un spécimen juvénile d'une espèce déjà connue. Sa méthode consiste à estimer l'âge d'un animal à sa mort grâce à l'étude de coupes minces d'os observées au microscope, un peu comme on compte les cernes de croissance d'un arbre pour déterminer son âge.

Récemment (en 2010), un groupe de paléontologues allemands, américains et roumains a entrepris de telles études histologiques sur le *Magyarosaurus*. Il en a conclu que le fameux sauropode était complètement développé, confirmant l'interprétation de nanisme insulaire de Nopcsa. De même, la méthode de Nopcsa m'a permis de montrer que les restes d'oiseaux et de ptérosaures que j'avais étudiés provenaient bien d'animaux adultes.

Les études histologiques des os, aujourd'hui courantes en paléontologie, ont éclairé d'autres sujets chers à Nopcsa, dont l'évolution des oiseaux. Par exemple, en 2009, des chercheurs allemands et américains ont rapporté que quelques oiseaux primitifs – tel l'archéoptéryx, vieux de 140 millions d'années – présentent des structures osseuses révélant une croissance jusqu'à trois fois plus lente que celle des oiseaux actuels, plus proche de celle des reptiles à sang froid. Ainsi, certaines caractéristiques des oiseaux actuels, telle la rapidité de leur croissance, ont sans doute évolué plus lentement qu'on ne le pensait.

Pour Nopcsa, les dinosaures transylvaniens avaient une signification plus profonde encore que d'apporter une preuve du nanisme insulaire des dinosaures. Il avait raison. Les spécimens transylvaniens ont fourni des pistes pour comprendre les déplacements

des dinosaures à la fin du Crétacé, une période où la majeure partie de l'Europe était recouverte par la Téthys. Plusieurs espèces retrouvées dans cette région – tel le *Telmatosaurus* de Hátaszeg – n'ont d'homologues qu'en Asie ou en Amérique du Nord, et aucun dans l'hémisphère Sud. Cette répartition suggère que la Transylvanie formait un pont important entre l'Europe et le bloc continental qui, à la fin du Crétacé, comportait l'Asie et l'Amérique du Nord. Les dinosaures européens pouvaient traverser la Téthys et rejoindre ce bloc, et réciproquement, en passant par Hátaszeg et les autres îles qui formaient un archipel entre les Alpes européennes et l'Asie du Sud-Ouest (voir la figure 2). Des travaux géologiques publiés en 2010 confirment cette hypothèse, montrant que l'île de Hátaszeg a constitué une étape pour les animaux qui se déplaçaient d'Est en Ouest à la fin du Crétacé. Ainsi, les dinosaures de Transylvanie, et ceux

Visite en Normandie

En janvier 1911, Nopcsa, de retour d'une de ses fréquentes visites en Angleterre, fait halte au Havre. Il a été invité à y décrire les restes d'un dinosaure conservés au Muséum de cette ville. Ils ont été découverts en 1898 dans des couches du Jurassique supérieur, vieilles d'environ 155 millions d'années, visibles dans

les falaises bordant la Manche à Octeville, à quelques kilomètres au Nord du Havre.

L'auteur de la découverte, Émile Savalle, un géologue amateur, avait aussitôt averti Gustave Lennier, directeur du Muséum. Les fouilles entreprises alors avaient mis au jour un squelette incomplet, qui s'était

avéré appartenir à un dinosaure. Mais à cette époque, peu de paléontologues français s'intéressaient à ce groupe d'animaux, et aucune étude détaillée n'avait été réalisée jusqu'à ce que Nopcsa entrât en scène, neuf ans après la mort de Savalle et six ans après celle de Lennier.

Fort de son expérience, le chercheur hongrois constate vite qu'il s'agit d'un dinosaure cuirassé du groupe des stégosaures. Dès la fin 1911, il fait paraître une description du squelette, qu'il attribue au genre *Omosaurus*, décrit précédemment en Angleterre. Il y voit une nouvelle espèce, qu'il nomme *Omosaurus lennieri* à la mémoire de Lennier.

Durant son séjour au Havre, Nopcsa est invité à donner une conférence sur les dinosaures, ce qui lui fournit l'occasion d'évoquer la sélection naturelle. Il conclut par ces mots : « Et si maintenant, en sortant dans la rue, vous voyez la lutte quotidienne, ne soyez pas attristés, car c'est la lutte pour l'existence qui a développé chaque espèce, qui a en-

nobli la race humaine, et c'est la lutte pour l'existence qui fait que la France marche à la tête de la civilisation et du progrès. » Dans son autobiographie, il ajoute ces remarques quelque peu désobligeantes : « Ces paroles absurdes déchainèrent chez les Français, vaniteux et facilement excitables, une tempête d'enthousiasme, d'autant plus qu'elles semblaient faire allusion aux conditions sociales des travailleurs et de la ville portuaire du Havre. Le maire du Havre me demanda de répéter ma conférence au théâtre, devant un public plus large, mais j'eus l'intelligence de refuser. »

Le squelette de stégosaure d'Octeville fut détruit, comme une grande partie de la ville du Havre, par les bombardements aériens alliés de septembre 1944. Il n'en subsiste plus que la description et les illustrations publiées par Nopcsa en 1911.

Eric Buffetaut
CNRS, Laboratoire de Géologie, École normale supérieure, Paris



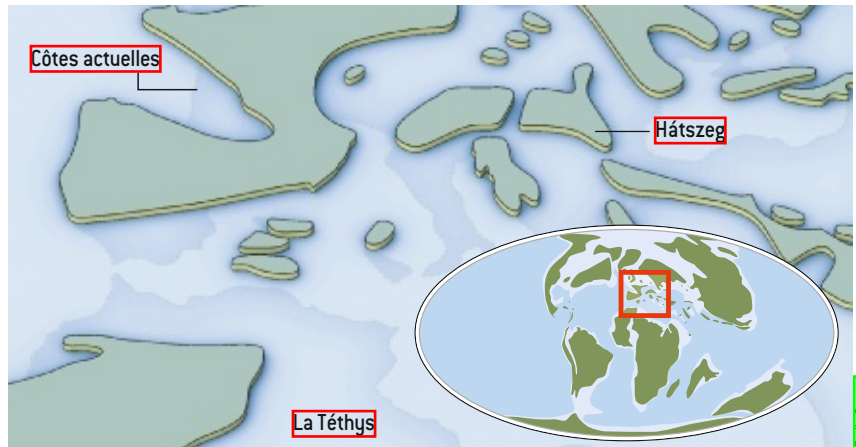
LES RESTES DU DINOSAURE D'OCTEVILLE, PRÈS DU HAVRE, que Franz Nopcsa étudia en 1911 (planche extraite de l'article qu'il publia, en français, sur cette étude).

de Hâtszeg en particulier, seront probablement déterminants pour comprendre la répartition globale des dinosaures juste avant leur apogée, il y a 65 millions d'années.

Forgées à une époque où la paléontologie et la géologie étaient encore des sciences jeunes, et où la théorie de l'évolution faisait l'objet de vives discussions, les théories de Nopcsa étaient étonnamment avant-gardistes. Nul doute qu'elles ont bénéficié de son statut d'aristocrate. De par sa richesse, Nopcsa profitait d'énormes avantages par rapport au chercheur moyen. Il effectuait librement, dans tout l'empire, ses expéditions de chasse aux fossiles et visitait les grands musées européens. Il semble qu'il aimait ces escapades, troquant volontiers sa parure de noble viennois pour la tenue grossière du berger des Balkans. Parlant plusieurs dialectes albanais, Nopcsa disparaissait des mois, voire des années, dans les collines de l'Albanie, avec pour seule compagnie son secrétaire et amant, l'Albanais Bajazid Elmasz Doda.

Une mort tragique

Pendant plus de dix ans, Nopcsa a ainsi accumulé une énorme quantité de données géologiques, météorologiques et ethnographiques, en grande partie publiées dans les principaux journaux scientifiques de l'époque. Les événements mondiaux le rattrapèrent cependant. Après la défaite, en 1918, de l'Allemagne et de ses alliés – dont l'Autriche-Hongrie –, la Transylvanie fut cédée à la Roumanie. Nopcsa, qui avait perdu ses domaines, et donc ses revenus, s'inquiéta de la façon dont il pourrait poursuivre sa vie de scientifique ambulante. Pour s'en sortir, il accepta le poste de directeur de l'Observatoire géologique de Hongrie et s'installa à Budapest. Mais la vie institutionnelle ne convenait pas à son caractère indépendant. Le baron quitta bien vite son poste pour reprendre ses voyages avec Doda, à moto dans les Balkans et en Italie, recherchant des fossiles et effectuant des relevés géologiques. Pour subvenir à leurs besoins, il vendit la majeure partie de sa collection de fossiles – y compris ses chers dinosaures de Transylvanie – au *British Museum*, qu'il avait souvent visité par le passé en tant que scientifique invité.



Quelques mois avant sa mort, Nopcsa fut invité à la Société géologique d'Anvers, en Belgique. Il fit le voyage en dépit d'une forte fièvre, mais tomba très malade la nuit qui précéda son intervention. Néanmoins, sans préparation, il tint sa conférence, en français, sur la géologie de l'Albanie, devant une assemblée enthousiaste. « À chacune de mes conférences, écrivit-il à un ami une fois rentré à Budapest, la salle est remplie de dames qui espèrent plus des récits d'aventure que des explications scientifiques. » Un exercice auquel le « baron dinosaure » se pliait volontiers.

La vie de Nopcsa s'acheva par une tragédie. Le 25 avril 1933, le chasseur de fossiles, indigent et déprimé, servit à Doda une tasse de thé drogué, puis tua son amant d'une balle dans la tête avant de retourner l'arme contre lui. Dans une lettre laissée à la police, il expliquait : « La raison de mon suicide est mon système nerveux, qui est à bout. J'ai tué dans son sommeil mon vieil ami et secrétaire, M. Bajazid Elmasz Doda, sans lui laisser entrevoir ce qui allait se passer, car je ne voulais pas l'abandonner à la maladie, la misère et la pauvreté, il aurait trop souffert. »

L'héritage scientifique de Nopcsa n'a cependant pas disparu avec lui. Les dinosaures de Transylvanie font l'objet de recherches depuis une bonne trentaine d'années, réalisées par des paléontologues roumains nombreux et actifs. Leurs recherches ont permis d'augmenter de façon spectaculaire la liste des vertébrés fossiles transylvaniens connus du Crétacé supérieur, et de mieux comprendre leurs relations paléobiogéographiques.

2. SELON NOPCSA, l'inondation d'une grande partie de l'Europe du Sud par la mer, à la fin du Crétacé, il y a 70 millions d'années, laissa émerger un archipel d'îles, qui auraient servi d'étapes aux dinosaures. Ceux qui y seraient restés auraient évolué vers des tailles inférieures, en s'adaptant aux ressources restreintes des îles. Une de ces îles, nommée Hâtszeg par le baron, aurait été située sur ses terres.

BIBLIOGRAPHIE

E. Buffetaut, *Chercheurs de dinosaures en Normandie*, Ysec, 2011.

G. Dyke *et al.*, Early cretaceous (Berriasian) birds and pterosaurs from the cornet bauxite mine, Romania, *Paleontology*, vol. 54, n°1, pp. 79-95, 2011.

European island faunas of the Late Cretaceous – The Hateg island, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 293, n°3-4, 2010.

K. Stein *et al.*, Small body size and extreme cortical bone remodeling indicate phyletic dwarfism in *Magyarosaurus dacus* (sauropoda : titanosauria), *PNAS*, vol. 107, n° 20, pp. 9258-9263, 2010.

G. Erickson *et al.*, Was dinosaurian physiology inherited by birds ? Reconciling slow growth in *Archaeopteryx*, *PLoS ONE*, vol. 4, n° 10, e7390, 2009.

LOGIQUE & CALCUL

L'autoréplication maîtrisée ?

Les astucieux travaux pour perfectionner et simplifier le modèle d'autoréplication de von Neumann nous font réfléchir à ce qu'est l'autoreproduction du vivant.

Jean-Paul DELAHAYE

Les êtres vivants sont des agrégats compliqués de composants simples et, selon toute théorie probabiliste ou thermodynamique raisonnable, ils sont très improbables. La seule chose qui explique ou atténue ce miracle est le fait qu'ils se reproduisent : si, par accident, il en apparaît un seul, alors les principes des probabilités ne s'appliquent plus et il s'en produit beaucoup.
John von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, 1966.

Un des grands sujets de la science-fiction est l'autoreproduction (ou autoréplication) : la réalisation de robots qui pourraient se dupliquer, sans que, après lancement du processus, il faille intervenir autrement que par apport de matière première et d'énergie.

À la fin des années 1940 et au début des années 1950, le mathématicien américain d'origine hongroise John von Neumann mena une série de travaux sur le sujet. À sa mort en 1957, ses travaux furent repris par Arthur Burks qui, en 1966, les regroupa dans un livre célèbre : *Theory of Self-Reproducing Automata*. L'ouvrage a donné naissance à une multitude de projets de recherche.

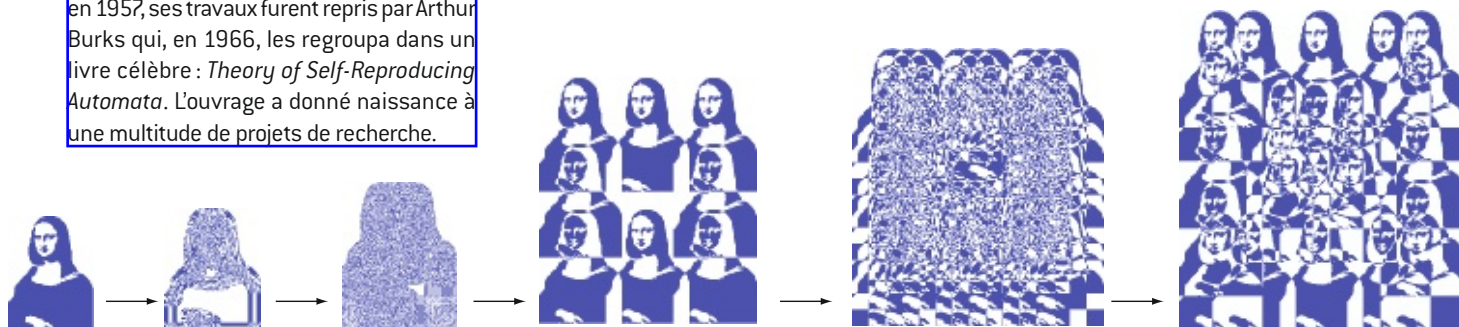
Von Neumann cherchait à démontrer la possibilité d'un robot autoréplicateur et Stanislas Ulam lui suggéra d'étudier le problème dans un monde abstrait simplifié. Le modèle retenu, aussi élémentaire que possible, fut celui des automates cellulaires. Ces calculateurs abstraits élémentaires pavant un damier infini (voir la figure 2) ont contribué à l'essor d'une discipline scientifique à la charnière des mathématiques et de l'informatique.

L'autoreproduction, dont von Neumann prouva la possibilité logique, a été étudiée sous des angles théoriques et pratiques. En robotique, on s'intéresse à la mise au point de dispositifs autoreproducteurs de grande taille ; dans les nanotechnologies, on envisage des systèmes microscopiques aptes à se multiplier spontanément, par exemple des circuits.

La configuration autoreproductrice décrite par von Neumann est extraordinairement complexe et si, mathématiquement, elle est bien définie, le texte de von Neumann reste théorique et n'explique pas, cellule par cellule, comment on pourrait la réaliser.

Il a fallu attendre 1995 pour qu'une configuration complète soit mise au point par Renato Nobili et Umberto Pesavento. Pour en faciliter la réalisation, le modèle italien modifiait légèrement celui de von Neumann : les cellules avaient 32 états au lieu de 29. La configuration autoreproductrice comporte alors 6 329 cellules et un ruban de codage (une sorte de génome définissant sa constitution interne) long de 145 315 cellules. Sa duplication (ruban de codage compris) exige 63 milliards d'étapes. Longtemps, la puissance informatique disponible n'a pas permis de répliquer leur construction sur écran d'ordinateur, mais ce fait d'armes a été réalisé récemment.

La programmation complète d'une configuration autoreproductrice suivant exactement l'automate cellulaire à 29 états de von Neumann a enfin été réalisée en 2008 par William Buckley. Elle comporte 18 589 cellules, le ruban de codage en compte 294 844 et il faut 261 milliards d'étapes pour que s'opère la réplication. En quelques dizaines de minutes, nos ordinateurs permettent l'exécution complète du processus d'autorepro-



duction, et l'on a ainsi pu admirer pour la première fois le fonctionnement du système conçu par von Neumann ! Grâce au programme gratuit *Golly* (<http://golly.sourceforge.net/>), vous pouvez sur votre micro-ordinateur assister à cette étonnante pièce de théâtre mathématique restée injouable pendant plus de 50 ans, soit dans sa version Nobili-Pesavento, soit dans sa version Buckley, plus fidèle à von Neumann, mais encore très lente aujourd'hui.

Des modèles simplifiés d'autoréplication

Nous n'avons pour l'instant évoqué que les versions d'autorépliques qui suivent de près le schéma adopté par von Neumann. Toutefois, reprenant le problème de l'autoréplication sur des bases parfois éloignées, d'autres modèles, mécaniques ou informatiques, ont été conçus et, dans certains cas, mis en œuvre.

Un délicat problème, qui semble avoir suscité quelques contresens, a fini par se poser. Les simplifications importantes du modèle d'autoréplication de von Neumann, proposées par exemple par Christopher Langton en 1984 (voir la figure 4), ont mené à des configurations bien plus petites que celle de von Neumann, comportant parfois moins d'une dizaine de cellules au départ. De ce fait, on a été tenté de conclure que von Neumann avait été maladroit en concevant un automate cellulaire d'une absurde complication. Nous verrons que la question est assez subtile. C'est en replaçant le travail de von

Neumann dans la perspective de son époque et en prenant en compte ses motivations liées à la biologie qu'on mesure combien son étude est novatrice et constitue une percée scientifique de première importance.

Reprenons le problème de l'autoreproduction. Pour qu'il ait un sens, il faut bien sûr se donner un « monde » avec des « lois physiques » précises qui fixeront le théâtre de l'action. Cela peut-être le nôtre, ou cela peut être un monde simplifié décrit par des règles que le langage mathématique exprimera sans ambiguïté. Toutes sortes de modèles abstraits sont en mesure de jouer ce rôle de « monde simplifié », mais celui des automates cellulaires est particulièrement séduisant, pour plusieurs raisons qui expliquent pourquoi il fut retenu par von Neumann.

D'abord, les univers d'automates cellulaires sont discrets (pas de variables continues) ; ils sont donc faciles à programmer et n'exigent pas des calculs approchés pour en suivre l'évolution. Autre qualité, les interactions y sont, comme dans notre univers, locales : aucune interaction instantanée à distance n'est possible ; de plus les lois que l'on retient peuvent être d'une extrême simplicité. Enfin, on sait par expérience que les automates cellulaires autorisent la simulation de nombreux phénomènes physiques parfois complexes, au point qu'il a été envisagé, par exemple par Konrad Zuse dès 1967, que notre univers physique pourrait n'être, à un niveau de détail très fin, qu'une sorte d'automate cellulaire.

Un modèle d'univers étant fixé, qu'est-ce que l'autoréplication dans cet univers,

et comment peut-on la définir pour mieux comprendre l'autoréplication dans le monde vivant ? Nous envisagerons plusieurs idées et découvrirons progressivement que, si nous voulons obtenir un modèle pertinent pour la biologie, nous ne devons pas nous limiter à la définition naïve suivante :

L'autoréplication, c'est lorsqu'un objet présent en un exemplaire unique dans l'univers se retrouve plus tard en plusieurs exemplaires.

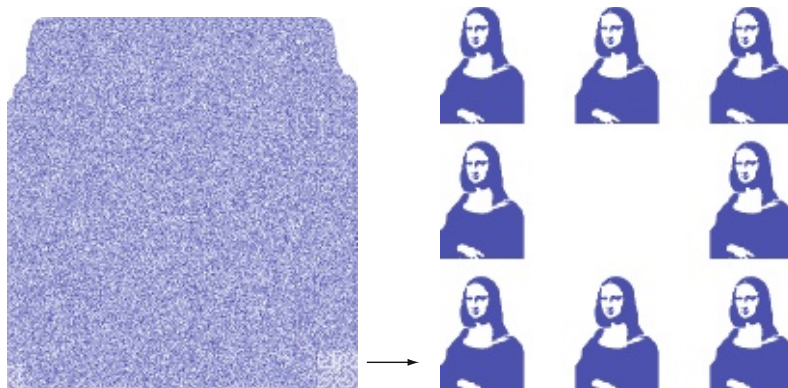
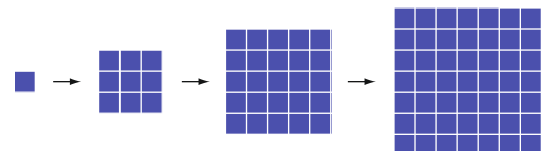
Réplication évidente

Quand les autorépliques sont le résultat direct des lois du monde retenu, elles ne nous apprendront rien d'intéressant en biologie. L'exemple le plus simple est celui de l'automate cellulaire nommé *trivial* et défini par :

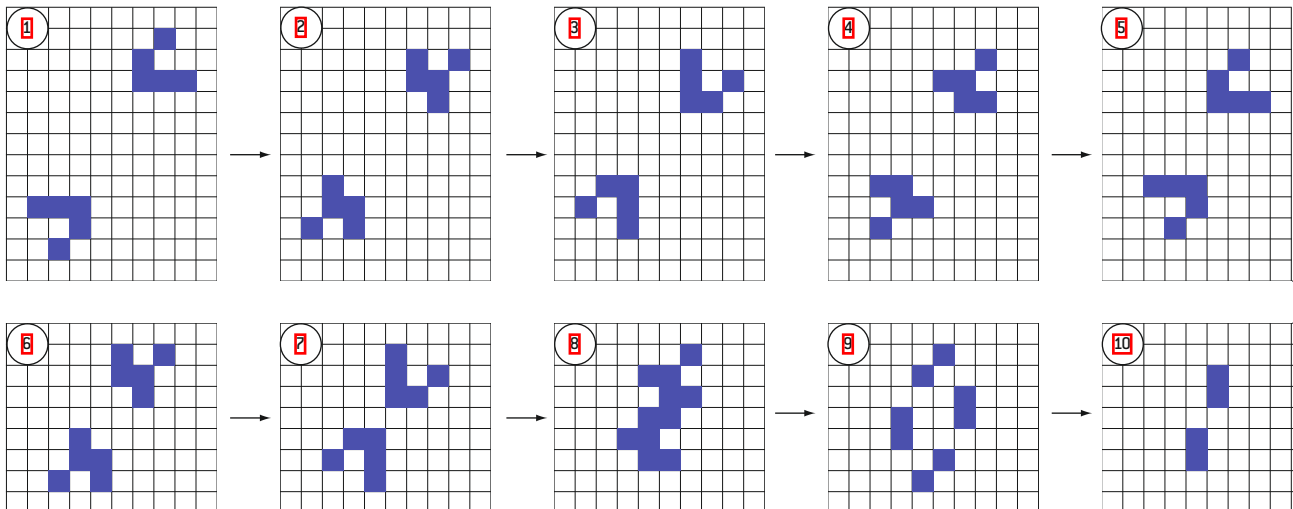
– Une cellule peut être dans l'état mort (*blanc*) ou dans l'état vivant (*bleu* sur l'illustration ci-dessous).

– Une cellule reste vivante à l'instant $n + 1$ si elle l'est à l'instant n ; une cellule passe de l'état mort à l'état vivant si l'une de ses huit voisines est vivante.

Partant d'une cellule vivante à l'instant 0, on obtient successivement neuf copies d'elle-même, puis 16, puis 25, puis 36, etc. Cette autoréplication est conforme à la définition naïve, mais elle est tellement simple qu'elle



1. UNE ÉTONNANTE DÉCOUVERTE a été faite par Edward Fredkin et par Serafino Amoroso et Gerald Cooper : il existe des automates cellulaires, comme l'automate *Replicator*, qui dupliquent toute structure, aussi complexe soit-elle. Les règles de l'automate sont : une cellule peut être dans l'état mort (*blanc*) ou dans l'état vivant (*bleu*) et d'un instant au suivant, une cellule reste vivante ou passe de l'état mort à l'état vivant, si, parmi ses huit cellules voisines, un nombre impair sont vivantes. On a représenté ici quelques étapes du processus de multiplication d'une figure complexe : la silhouette de la *Joconde*. Après 256 étapes de l'application de la règle, le motif est reproduit huit fois. Il est assez facile de prouver la propriété de multiplication de toute configuration et de la généraliser. On peut, si on le souhaite, utiliser un automate ayant plus de deux états, mais il faut que le nombre d'états soit un nombre premier. On peut, au lieu d'obtenir huit copies du motif initial, n'en obtenir que deux, ou n'importe quel nombre fixé à l'avance.



2. JOHN VON NEUMANN A UTILISÉ LES AUTOMATES CELLULAIRES pour démontrer la possibilité de l'autoreproduction. Chaque case (ou cellule) carrée d'un damier infini porte le même petit automate. Cet automate peut être dans un état pris parmi un nombre fini d'états fixés à l'avance. L'évolution se fait selon un temps discret : l'état de l'automate à l'instant $n + 1$ est déterminé par son propre état et ceux de ses voisins (par exemple les huit automates disposés autour de lui, ou une autre combinaison fixée une fois pour toutes) à l'instant n . L'automate cellu-

laire le plus étudié est l'automate du *Jeu de la vie* de John Conway : chaque cellule-automate est dans l'état vivant (*bleu*) ou mort (*blanc*) ; si une cellule est vivante et qu'elle est entourée de deux ou trois cellules vivantes elle reste vivante, sinon elle meurt ; si une cellule est morte et qu'elle est entourée de trois cellules vivantes, elle passe dans l'état vivant, sinon elle reste morte. On a représenté ici les dix étapes de la rencontre de deux configurations glisseurs (configuration se déplaçant en diagonale) conduisant à leur annihilation mutuelle à l'étape suivante.

ne nous apprend rien ! Dans notre univers, les lois de conservation de l'énergie et de la matière interdisent ce type d'autoréplication. Il n'est cependant pas impossible d'avoir des situations proches, où par exemple une particule et de l'énergie produisent deux particules identiques. Les prions anormaux qui provoquent la maladie de la vache folle se multiplient par contact en transformant la molécule *Prp-c* (normalement présente et sans effet nocif) en molécule *Prp-sc* (le prion anormal), tout comme le fait une cellule bleue de l'automate *trivial* qui transforme les cellules blanches qui l'entourent. Notons que dans ce type d'autoréplication, seuls des objets élémentaires se multiplient.

Un autre type d'autoréplication évidente, cette fois par gros blocs, est possible dans notre univers. Si l'on impose à l'univers une loi de conservation de la matière, le système autoréplicateur doit aller chercher les composants de son double dans son environnement et les assembler. C'est ce qui se passe dans le monde vivant ; l'idée que des composants sont disponibles et que s'autoréplicier, c'est les collecter et les assembler, n'est ainsi pas à exclure.

Un cas extrême et facile à réaliser en robotique est le suivant. Le robot A-B est formé de deux morceaux A et B (par exemple une tête et un corps) qui, isolément, sont inertes. Assembler deux éléments A et B se fait facilement, par exemple à l'aide d'aimants qui, dès que A et B sont proches, les solidarisent. On suppose aussi que la mise en contact de A et de B met en marche le robot A-B. Le sol environnant contient des morceaux A et B, inertes, car isolés. On programme le robot A-B de telle façon que, dès sa mise en marche, il recherche un morceau A et un morceau B, puis les assemble, ce qui donne alors un autre robot A-B, qui lui-même se met en marche, etc.

Certaines réalisations en robotique sont des systèmes autoréplicateurs dans ce sens : le robot assemble quelques pièces complexes déjà présentes dans son environnement et produit ainsi un double de lui-même. Les cristaux, et peut-être même les virus, sont autoréplicateurs dans ce sens.

De telles autoréplications ne sont pas satisfaisantes pour décrire ce que l'on observe dans le monde des êtres vivants évolués : dans un véritable processus d'autoréplica-

tion, il faut que l'objet qui se multiplie soit lui-même complexe et ne résulte pas de l'assemblage d'un petit nombre de composants complexes déjà là. En clair, à la définition naïve donnée précédemment, il faut ajouter :

Pour qu'il y ait vraiment autoréplication, l'objet qui se multiplie ne doit pas être trop simple et ne doit pas résulter de l'assemblage de quelques morceaux complexes présents dans son environnement.

Malheureusement, cette modification n'est pas encore satisfaisante. Ni dans un monde semblable au nôtre ni dans un monde d'automates cellulaires, les nouvelles exigences ne garantiront une autoréplication semblable dans sa logique à celle observée chez les êtres vivants.

Autoréplication d'une structure complexe

Commençons par le montrer dans le cas des automates cellulaires. Von Neumann l'ignorait (sinon il l'aurait mentionné), mais il existe une famille d'automates cellulaires simples et remarquables qui ont la très étonnante propriété suivante.

Quelle que soit la configuration placée seule sur le damier à l'instant 0, et même si elle est complexe, en attendant suffisamment longtemps, on retrouvera la configuration en plusieurs exemplaires : toute configuration s'autoréplique spontanément et indéfiniment ! Le plus simple de ces automates cellulaires est l'automate dénommé *Replicator* (voir la figure 1).

Le spectacle de cette autoreproduction est fascinant, car avant de voir réapparaître les copies de la configuration initiale placée sur le plan, un désordre complet semble régner. Ce miracle de l'autoreproduction de toute structure se démontre mathématiquement. Ce n'est, finalement, que la conséquence d'une propriété arithmétique qui n'a rien à voir avec le monde vivant et que celui-ci, bien sûr, n'utilise pas.

Il n'y a pas que dans le monde des automates qu'une multiplication d'objets complexes peut se dérouler sans que cela soit comparable avec la reproduction biologique. Dans notre monde physique, nous connaissons la photocopieuse. La feuille, quelle que soit la complexité de ce qui y est imprimé ou écrit, se trouve dupliquée par la machine. Il

existe aussi des photocopieuses 3D qui reproduisent certains objets par stéréolithographie. On peut imaginer que, dans le futur, les techniques pour réaliser de tels appareils se perfectionneront et aboutiront, comme dans les romans de science-fiction, à des systèmes quasi parfaits dupliquant atome par atome tout objet qu'on y place. Un être présent dans un univers où de telles machines existent a la capacité de s'autorépliquer : il lui suffit de se placer dans la machine et de la faire démarrer.

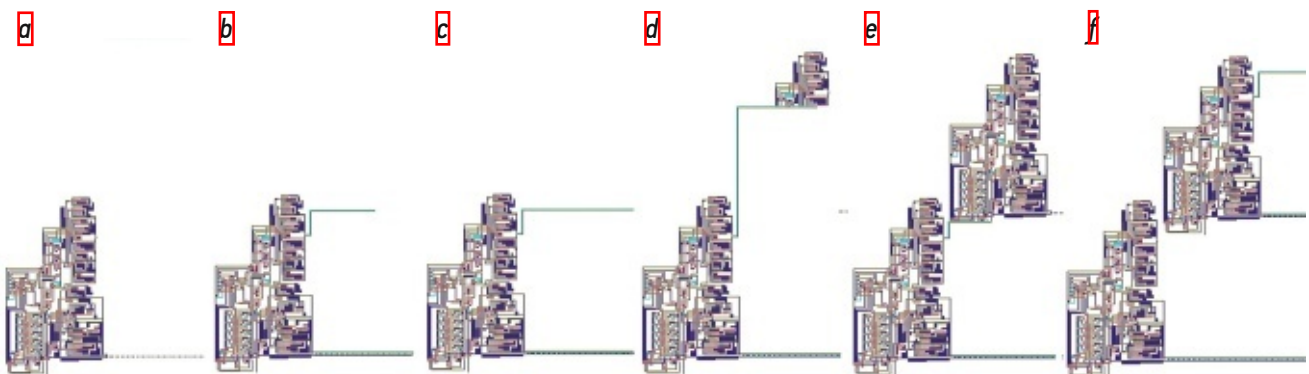
Un cas tout à fait extrême d'autoréplication physique de structures complexes et n'ayant rien à voir encore avec la biologie est celui proposé par Hugh Everett qui, dans sa théorie des mondes multiples, imagine que l'univers dans sa totalité s'autoréplique à chaque instant.

Ainsi, l'autoréplication de structures complexes est parfois possible sans pour autant correspondre à celle des êtres vivants. Poursuivons donc notre recherche d'une bonne définition. On sait que chaque cellule vivante porte dans ses molécules d'ADN le plan de sa structure (ou en tout cas une partie importante de ce plan). Lorsqu'un orga-

nisme vivant se duplique, le « code » de sa structure est, d'une part, traduit en protéines qui forment le nouvel organisme et, d'autre part, copié pour qu'il ait lui aussi le plan permettant sa réplication. Ce double mécanisme de traduction/copie est essentiel chez tout être vivant évolué. Une autoréplication susceptible de nous aider dans notre compréhension du vivant doit donc fonctionner selon un tel schéma « génétique ».

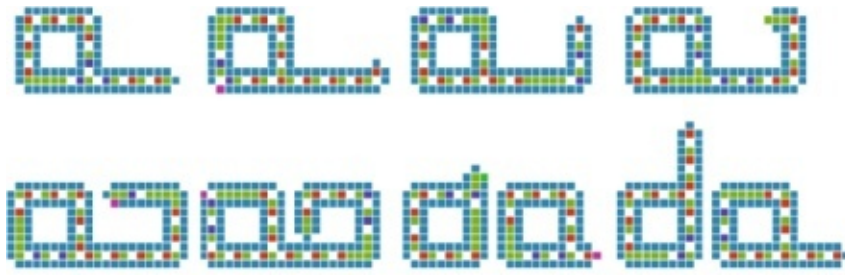
Un schéma génotype-phénotype

C'est ce qu'avait compris von Neumann, et cela bien avant que la structure de l'ADN n'ait été découverte. Le fonctionnement de la configuration autorépliquatrice, que ce soit dans la version de Nobili-Pesavento ou dans celle de Buckley, respecte ce schéma génétique « machinerie + ruban » (voir la figure 3). Il y a bien l'équivalent d'un génome dans la configuration (la ligne horizontale partiellement représentée). De plus, lors de l'autoréplication, le ruban est copié en un second identique. Ensuite, il est lu et traduit en une structure en deux dimensions : le

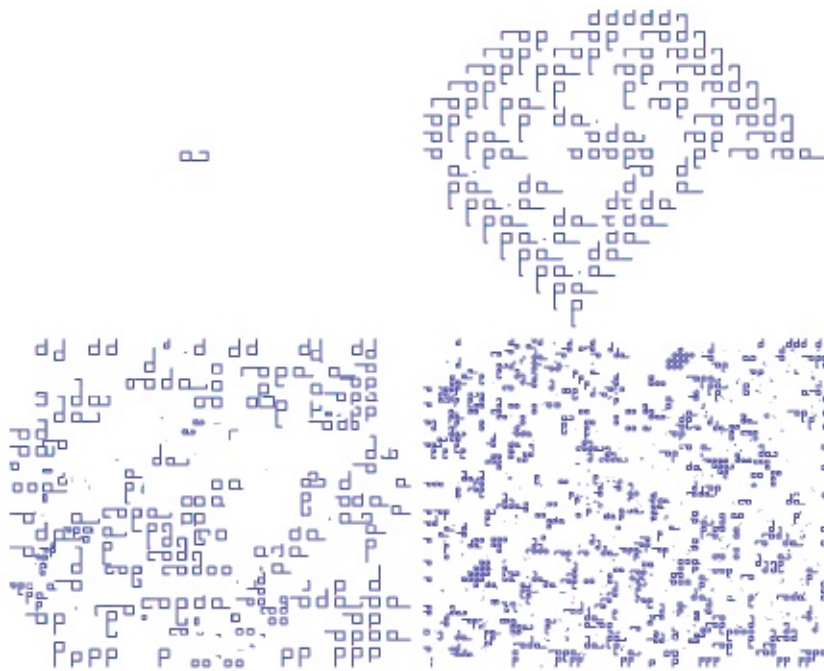


3. VON NEUMANN A CONÇU UNE CONFIGURATION autoreproductrice si complexe qu'il ne put la faire fonctionner à la main, ni avec les ordinateurs disponibles à son époque. Il fallut attendre 2008 pour que cette configuration, légèrement simplifiée par Renato Nobili et Umberto Pensavento en 1995, et mise en forme cellule par cellule par Tim Hutton, fonctionne dans un programme. Ce programme nommé *Golly* a été élaboré par la communauté des passionnés d'automates cellulaires (voir la bibliographie). La configuration de von Neumann (dans la version de Nobili-Pesavento) comporte deux parties : une machinerie qui commande et exécute la réplication, et un ruban qui contient sous forme codée le plan de la machinerie. Ce ruban, assimilable à un génome, est extrêmement long et représenté partiellement ici. L'autoréplication comporte deux phases : dans un premier temps, la machinerie lit et copie le

ruban pour en fabriquer un second placé au-dessus du premier (a, b, c). Dans un second temps, la machinerie exploitant les données du ruban à l'aide d'une sorte de bras mobile (composés de cellules de l'automate) interprète ces données et place, une à une, toutes les cellules de la partie machinerie de son double (d, e, f). Quand cette mise en place est terminée, la nouvelle machinerie est enclenchée et se met à son tour à produire une copie de son ruban et d'elle-même. Plus de 50 ans après sa conception, il est ainsi possible d'admirer le spectacle de la duplication de la configuration autoreproductrice de von Neumann. Notons que bien que le *Jeu de la vie* de Conway soit le plus étudié des modèles d'automates cellulaires et qu'on sache qu'il est possible de fabriquer des configurations autoreproductrices avec lui, personne pour l'instant n'a su en concevoir une et la faire fonctionner.



4. LA BOUCLE DE LANGTON ET QUELQUES ÉTAPES DE SON ÉVOLUTION. L'autoréplication des automates de la figure 3 ne fonctionne pas du tout comme celle des êtres vivants, car notre univers n'est pas un automate cellulaire de type *Replicator* produisant systématiquement la multiplication de toute structure. Pour modéliser d'une manière satisfaisante le type d'autoréplication observé dans le monde vivant, il faut exiger qu'elle procède selon le schéma « génétique » : génotype + phénotype → génotype + phénotype. Autrement dit, il faut imposer que la réplique se fasse en deux étapes : (a) copie d'un ensemble d'informations en général présent sur un ruban et constituant le génotype ; (b) traduction de ce codage en structure. L'ordre (a)-(b) peut être inversé. C'est d'ailleurs le mode de fonctionnement de l'autoréplication du système proposé par von Neumann. Peut-on faire plus simple dans le monde des automates cellulaires tout en respectant le schéma génétique ? Oui, et la boucle de Christopher Langton (1984) en est la preuve.



5. LES BOUCLES ÉVOLUTIVES. Les boucles de Langton sont incapables de construire une grande variété d'autres objets et encore moins capables de donner naissance à des boucles d'une autre forme qui elles-mêmes s'autoreproduiraient. Les recherches récentes ont conduit à la mise au point de boucles pouvant construire un ensemble varié d'autres objets complexes quand on échange le génome. Les boucles *EvoLoop* de Hiroki Sayama donnent naissance à des boucles de formes et de tailles différentes. Les formes créées sont en compétition. Dans un espace ensemené avec une seule boucle *EvoLoop*, on voit se dérouler une micro-évolution darwinienne. Dans un premier temps, la boucle se multiplie sans presque changer. Quand l'espace (fini) devient insuffisant, les collisions entre boucles provoquent des mutations des génomes et des boucles nouvelles apparaissent, parfois très brièvement car elles ne sont pas viables. Dans la compétition pour l'espace, les boucles de petites tailles, moins fragiles, tendent à dominer. Les dessins représentent quatre phases de cette évolution compétitive entre organismes simulés.

plan de la « photocopieuse » est exploité pour construire une seconde « photocopieuse ». Au final, on obtient deux fois le même ensemble machinerie + ruban.

Nous comprenons pourquoi von Neumann ne s'est pas contenté d'un automate cellulaire de type *trivial* ou *Replicator*. Mais, en imposant aux systèmes autorépliqueurs de fonctionner selon le modèle génétique, peut-on envisager plus simple que son énorme et très lente machine ?

Boucles de Langton

Oui ! La découverte date de 1984 et est due à Christopher Langton. Une boucle de 86 cellules au départ est composée d'une sorte de tuyau protégeant un « génome ». En fonctionnant, cette boucle émet une excroissance qui, en 150 étapes, engendre une seconde boucle à l'intérieur de laquelle le génome de la première a été copié. Ces deux boucles en engendrent alors de nouvelles et, progressivement, tout le plan se recouvre de copies de la boucle initialement présente en un seul exemplaire (voir la figure 4).

Étonnamment, la boucle de Langton a été simplifiée plusieurs fois. On a fait disparaître le tuyau protecteur (en fait inutile) et on est arrivé, avec la boucle de Chou-Reggia en 1993, à une configuration autorépliquatrice de six cellules possédant une sorte de génome. Cependant, quand on voit fonctionner cette boucle, le génome est devenu difficile à identifier et on a même quelques doutes sur sa véritable nature de génome. En fait, il semble qu'on en arrive plutôt à un schéma proche de l'automate *trivial*. Il y a une continuité entre l'automate *trivial* et la boucle de Langton !

L'explication de cette troublante situation est qu'on a oublié quelque chose qui, aux yeux de von Neumann, était essentiel : le système génétique doit être puissant. Il doit autoriser non seulement l'autoréplication, mais aussi la création d'autres structures. Autrement dit : il faut qu'on puisse, en modifiant le génome de nos configurations, construire d'autres configurations différentes (qui seront autorépliquatrices ou non). C'est une telle condition qui assure qu'une

évolution par variation peut se dérouler. Comment exprimer cette condition sur la puissance du système génétique ?

La notion de constructeur est la solution. On va exiger qu'une large classe de configurations puissent être produites par la machinerie de notre configuration autoreproductrice quand on en change le ruban génétique.

La configuration autoreproductrice de von Neumann satisfait cette exigence nouvelle. Quelle que soit la configuration C (prise dans une large classe de configurations), il y a un génome G qui, quand on le présente à la machinerie, produit C. La boucle de Langton n'a pas cette propriété ; ainsi, elle est certes plus simple que la configuration de von Neumann, mais ne modélise pas convenablement l'autoréplication des êtres vivants évolués.

Signalons aussi qu'une façon d'obliger les automates autoreproducteurs à n'être pas trop simples, ce que von Neumann ne perd jamais de vue, est d'exiger qu'ils soient capables de mener tout calcul réalisable par ordinateur. Il ne semble pas que cette fonctionnalité doive être prise en compte systématiquement quand on cherche à modéliser l'autoreproduction des êtres vivants, puisqu'on sait bien qu'ils n'ont pas cette capacité de tout calculer.

Dans le monde réel, tout n'est pas génétiquement productible par n'importe quelle cellule vivante utilisée comme machinerie de synthèse. Si l'on souhaite construire des modèles fidèles aux schémas logiques de la vie, il faut donc imposer des conditions de constructibilité larges, mais raisonnables, et ne considérer les conditions de calculabilité que comme des options facultatives. En adoptant une telle attitude, il semble bien que nous soyons arrivés à une notion satisfaisante, qui rend compte du vivant et du type d'autoréplication à l'œuvre.

Le modèle auquel nous sommes arrivés de ce qu'est un être autoreproducteur du type des êtres vivants est pertinent, mais sous une forme moins mathématique qu'on pouvait l'espérer. Ce défaut résulte de l'imprécision sur la classe des configurations que la machinerie d'un être autoreproducteur doit être capable de fabriquer et de l'imprécision sur le type de complexité que doit

posséder le système. Von Neumann n'a proposé ni l'automate *trivial*, ni le *Replicator*, ni les boucles de Langton, car il voulait un modèle assez proche du modèle observé en biologie et qui permet l'évolution dès qu'un mécanisme aléatoire de modification des génomes est ajouté.

Le fait qu'il ait réussi à élaborer un tel système autoreproducteur dans l'univers des automates cellulaires prouve que, sur un plan logique, le type d'autoreproduction observé dans le monde vivant n'est pas miraculeux. Cette preuve directe que le modèle génétique de la vie peut s'appuyer sur une physique discrète et relativement simple est une grande avancée.

Notons que, si les boucles de Langton ne sont pas des structures autoreproductrices du type de celles recherchées par von Neumann, elles ont cependant inspiré de nouvelles recherches qui ont abouti à des simplifications de la machinerie de von Neumann. C'est le cas des boucles de Gianluca Tempesti, un peu plus compliquées que celles de Langton (148 cellules contre 86), mais qui ont une capacité de construction assez générale. D'autres modèles, comme le *Evoloop* de Hiroki Sayama, conduisent à une famille de boucles autoreproductrices de tailles et de formes variées, en même temps qu'à un processus de compétition entre ces boucles. Dans un univers très simplifié d'automates cellulaires, on assiste alors à des dynamiques ressemblant assez fidèlement dans leurs principes logiques à celles qu'on voit dans le monde vivant et dont il est certain qu'elles auraient enchanté von Neumann (voir la figure 5).

Galilée et Newton ont montré que si les lois physiques sont comme ils les ont formulées, alors les planètes n'ont pas besoin que Dieu s'occupe d'elles à chaque instant. De même, von Neumann a montré que la vie n'a pas besoin d'un miracle continu pour fonctionner et que le type d'autoreproduction qu'elle pratique s'obtient simplement en respectant le schéma génétique et en autorisant l'évolution. Son travail met un terme définitif aux arguments de type vitaliste qui affirmaient que la vie est trop complexe pour être réduite à de la physique.



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

BIBLIOGRAPHIE

A. Trevorrow et T. Rokicki, *Golly*, [programme et configurations permettant d'exécuter les systèmes autoreproducteurs mentionnés dans l'article] 2011 : <http://golly.sourceforge.net/>

M. Holzer et M. Kutrib, *Cellular automata and the quest for non trivial artificial self-reproduction*, dans *Membrane Computing*, Lecture Notes in Computer Science n° 6501, pp. 19-36, Springer, 2011.

R. Freitas et R. Markle, *Kinematic Self-Reproduction Machines*, Landes Bioscience, 2004.

D. Mange et A. Stauffer, *Sur la piste des machines autorépliquantes*, *Pour la Science* n° 323, pp. 62-68, septembre 2004.

B. McMullin, John von Neumann and the evolutionary growth of complexity : looking backwards, looking forwards, *Artificial Life*, vol. 6(4), pp. 347-361, 2000.

C. Langton, *Self-reproduction in cellular automata*, *Physica D*, vol. 10, pp. 135-144, 1984.

J. von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata*, University of Illinois Press, 1966.

ART & SCIENCE

Léonard et la formule de l'arbre

Léonard de Vinci avait identifié une règle portant sur les diamètres des branches d'un arbre. Des modèles numériques la valident et montrent qu'elle correspond à la meilleure résistance au vent.

Loïc MANGIN

Léonard de Vinci a toujours eu le souci du réalisme dans ses œuvres. C'est notamment le cas des arbres qui semblent plus vrais que nature, par exemple dans *L'Adoration des Mages*, conservée à Florence, ou dans différents dessins (voir la figure page ci-contre). Pour parvenir à ce degré de réalisme, il s'est nourri d'observations qui l'ont conduit à formuler une hypothèse. On peut la lire dans *Les carnets de Léonard de Vinci* (page ci-contre, des croquis sont présentés dans les cartouches) : les branches d'un arbre, à quelque hauteur que ce soit, ont, quand elles sont rassemblées, la même section que le tronc. En d'autres termes, quand une branche de diamètre D se subdivise en N branches secondaires de diamètres d_i (i varie de 1 à N), la relation suivante est vérifiée : $\pi D^2/4 = \pi d_1^2/4 + \pi d_2^2/4 \dots + \pi d_N^2/4$. De façon plus concise, on peut écrire $D^\Delta = \sum d_i^\Delta$ pour i variant de 1 à N et, ici, $\Delta=2$.

Cette règle, dite de Léonard, est utilisée dans la plupart des programmes informatiques lorsqu'il s'agit de représenter un arbre réaliste. Pour autant, cette règle empirique est-elle vérifiée ? Peu de spécialistes s'y sont intéressés, mais parmi ceux qui ont testé l'hypothèse de Léonard de Vinci, le plus célèbre est le mathématicien français Benoît Mandelbrot. En compilant les quelques études disponibles, il a montré que, pour de nombreuses espèces d'arbres, l'exposant Δ est légèrement inférieur à 2. Les observations donnent donc raison à Léonard de Vinci. Toutefois, qu'exprime la valeur de cet exposant ? Hasard évolutif ou loi physique ?

Dans les années 1960 et 1970, deux modèles ont été élaborés pour rendre compte

de la règle. Le premier postule que les arbres sont des faisceaux de vaisseaux identiques courant des racines aux feuilles. Dans ce cas, les branches secondaires résulteraient d'une division du bouquet de vaisseaux de la branche mère. La règle de Léonard devient alors une évidence, puisqu'il y aurait autant de vaisseaux, de diamètre identique, avant et après la bifurcation.

Le second modèle est fondé sur l'idée que, dans un arbre, la déflexion d'une branche secondaire par rapport à sa branche mère,

Le diamètre des branches est une conséquence de l'adaptation de l'arbre au vent.

sous l'effet de son propre poids (et donc de son diamètre), est identique du tronc aux plus fines brindilles. Toutefois, ces deux modèles résistent mal à l'analyse. Par exemple, dans les grosses branches et le tronc, seuls cinq pour cent de la section d'une branche sont dévolus aux vaisseaux conducteurs de sève, et non la totalité comme le suppose le premier modèle. Le second n'est étayé par aucun argument évolutionniste.

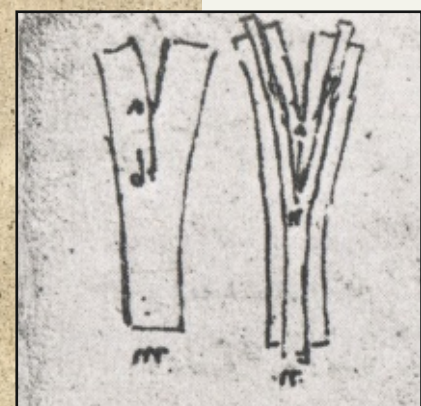
Christophe Eloy, de l'Université d'Aix-Marseille, propose une autre explication, de nature structurelle. Selon le physicien, la clef de la règle de Léonard réside dans la résistance de l'arbre au vent. Pour le montrer, il a tenté, dans une sorte de processus d'ingénierie inverse, de construire

une structure arborescente avec le moins de matière possible (on suppose que l'arbre économise ses ressources) et qui résiste le mieux au vent. D'abord, cette structure doit être fractale, avec une dimension comprise entre 2 et 3, ce qui correspond à ce que les botanistes connaissent de l'architecture des arbres. Elle s'explique par la nécessité de capter le maximum de lumière avec le minimum de matière. Cette nature fractale impose les longueurs de chaque branche. Le physicien a également supposé que la résistance à la rupture par le vent est uniforme dans tout le végétal.

Ce modèle d'arbre a ensuite été soumis à un vent virtuel de façon à tester sa résistance. Ce souffle crée des forces de traînée sur chaque branche et entraîne, au-delà d'un seuil, leur rupture. Pour un vent donné, la seule variable était l'épaisseur des branches que l'on a modifiée afin d'obtenir l'arbre le plus robuste. Au final, on retrouve bien la règle que Léonard avait déduite de ses observations ! Le diamètre des branches est une conséquence de l'adaptation de l'arbre au vent.

Ce phénomène de croissance adaptée aux contraintes mécaniques est nommé thigmomorphogenèse par les botanistes. Les arbres dissymétriques qui poussent dans des régions où le vent est unidirectionnel et fréquent, notamment en bord de mer, en sont de bons exemples. Comme le soutenait Léonard de Vinci : « Dans la nature, tout a toujours une raison. »

Ch. Eloy, *Leonardo's rule, self-similarity and wind-induced stress in trees*, *Physical Review Letters*, à paraître, 2011.



IDÉES DE PHYSIQUE

Bien glisser sur la neige

Pour réduire les frottements, il faut adapter à l'état de la neige la rigidité des skis, leurs semelles et leur fartage.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Pour améliorer les performances des skieurs de compétition, notamment les vitesses atteintes, les équipes sportives attachent un grand soin à la préparation de la semelle du ski. En fonction de la température, de l'état de la neige, de l'humidité ambiante, etc. les experts choisissent l'état de surface plus ou moins lisse qu'ils vont donner à la semelle du ski et la nature du fart dont ils vont l'enduire pour mieux glisser. Un savoir-faire qui peut utilement s'appuyer sur une connaissance de la physique mise en jeu.

Pour le débutant, tenir sur des skis est périlleux : il a le sentiment qu'ils glissent sur la neige au moindre déséquilibre. Le frottement sur de la neige sèche est un frottement solide, proportionnel à la force perpendiculaire exercée par les skis sur le sol, soit le poids du skieur pour une piste horizontale. Aux faibles vitesses, le coefficient de proportionnalité est de l'ordre de 0,04, c'est-à-dire 20 fois inférieur à celui du contact d'un chausson d'escalade sur de la roche !

Bien que faible, ce frottement est plus important que la force de traînée aérodynamique qui s'exerce sur le skieur aux vitesses modérées. Prenons l'exemple d'un skieur de 75 kilogrammes et mesurant 1,80 mètre, en tenue de compétition. Le produit du coefficient de traînée par la surface frontale vaut, d'après les mesures, 0,65 mètre carré lorsque le skieur est debout, et 0,23 mètre carré lorsqu'il est en position de l'œuf. Cela signifie qu'à une vitesse de dix mètres par seconde, la force de traînée aérodynamique, proportionnelle au carré de la

vitesse, varie de 15 à 40 newtons selon la position adoptée. La force de frottement solide approche alors les 30 newtons, valeur comparable à celle de la traînée à dix mètres par seconde. Quand la neige est humide, le frottement est plus élevé et domine la traînée jusqu'à une vitesse de 20 mètres par seconde.

Skis souples ou non, selon la neige

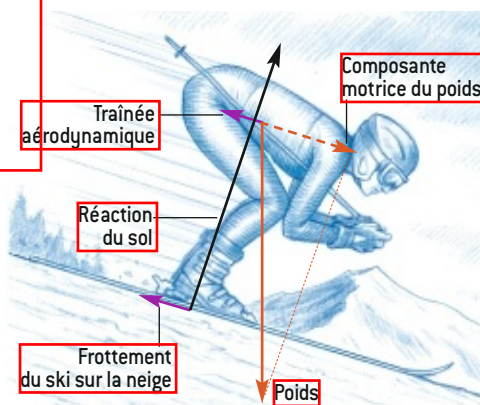
Réduire le frottement est donc un enjeu sportif considérable. Pour ce faire, il ne faut pas oublier le remodelage macroscopique de la neige soumise à la pression du ski, notamment lorsque cette neige est peu compacte. Car la formation d'un sillon est à l'origine d'un ralentissement : compaction

de la neige par le ski, déplacement, voire éjection, de la neige sont autant de sources de dissipation d'énergie qui agissent comme une force de frottement.

Le skieur peut toutefois s'en accommoder en choisissant bien ses skis. Pour une neige tendre, il prendra des skis souples, qui n'exercent qu'une faible pression à l'avant et à l'arrière. Cela permet de réduire la résistance due à l'impact du ski (car l'avant du ski ne s'enfonce pas sous la neige) et à la compaction de la neige. En revanche, pour une neige dure et compacte, il chaussera plutôt des skis rigides.

Pour aller plus loin, il faut se demander pourquoi un ski glisse sur la neige. Le mécanisme principal a été proposé en 1939 par Philip Bowden et T. Hughes, deux physiciens de Cambridge. Le frottement du ski dégage de la chaleur qui fait fondre la neige et il se forme un film d'eau d'épaisseur micrométrique qui lubrifie le contact entre la neige et le ski. Il s'ensuit un coefficient de frottement peu élevé, mais dont la valeur précise dépend de l'épaisseur du film liquide. Si cette épaisseur est très faible, le contact sera de nature solide/solide sans lubrification. Le frottement sec provient alors de la déformation, de la fracture et du fléchissement des aspérités des deux surfaces en contact.

Si l'une des surfaces est beaucoup plus dure que l'autre, les aspérités « dures » vont se frayer un chemin à travers le matériau « mou », ce qui accroît le frottement. Il convient alors d'adapter la dureté de la semelle du ski à celle de la neige : ni trop dure, ni trop souple.



1. LE SKIEUR EST FREINÉ PAR DEUX FORCES : la force de traînée aérodynamique, c'est-à-dire la résistance de l'air, et la force due au frottement du ski sur la neige. La traînée aérodynamique est proportionnelle au carré de la vitesse, la force de frottement est proportionnelle à la composante du poids perpendiculaire à la surface de contact. Les intensités de ces deux forces sont souvent comparables.

Et si le film liquide est trop épais, des effets d'attraction capillaire et de ventouse apparaissent. On peut en faire l'expérience en mettant de l'eau sur une table et en faisant avancer à plat une règle en plastique. Si toute la surface de la règle est mouillée, celle-ci colle à la table : au lieu de lubrifier, l'eau augmente considérablement le frottement ! Dans ce cas, on cherche plutôt à éviter l'apparition de ponts liquides entre la neige et le ski, en rendant la semelle hydrophobe.

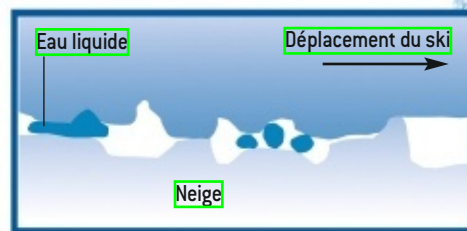
La semelle imbibée des molécules de fart

En pratique, les deux frottements – le frottement sec et *via* un film liquide – sont présents simultanément et leurs parts respectives dépendent beaucoup de la température, de la présence préalable d'eau liquide, de la vitesse du skieur et du ski lui-même. Pour les réduire, la solution moderne est une bonne semelle de base, sur laquelle on applique un fart adapté aux conditions de course attendues.

La plupart des semelles sont aujourd'hui constituées de polyéthylène de très grande masse moléculaire, très résistant à l'usure. Constitué de très longues chaînes carbonées (de centaines de milliers d'atomes), ce matériau a d'abord le bon goût d'être très hydrophobe. En revanche, sa dureté est supérieure à celle de la glace et il nécessite donc l'application d'un fart plus mou. Justement, ce

polyéthylène est constitué de parties cristallines, où les chaînes carbonées sont alignées et réparties périodiquement, et des parties amorphes. Les parties amorphes sont moins denses que les parties cristallines et peuvent absorber le fart, contrairement aux parties cristallines, trop compactes.

Enfin, ultime astuce, on applique au polyéthylène de la semelle un traitement anti-statique en y incorporant de la suie (du graphite, ce qui lui donne sa couleur noire). En effet, le frottement sur la neige charge électriquement la semelle. Le polyéthylène étant isolant, les charges pourraient s'accumuler en certains endroits et attirer fortement les cristaux de glace, notamment dans les cavités entre la semelle et la surface, ce qui augmenterait le frottement. Le graphite, au contraire, est conducteur, ce qui permet d'évacuer les charges et de réduire les effets électrostatiques.



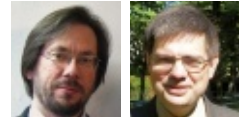
2. LES ASPÉRITÉS DES DEUX SURFACES EN CONTACT, celle de la neige et celle du ski, produisent une force de frottement par divers mécanismes. Il y a notamment la déformation de la neige et son déplacement sous la pression du ski, ainsi que des effets de capillarité – une attraction entre les deux surfaces due à la présence d'un film d'eau liquide suffisamment épais. Si ce film est peu épais, l'eau liquide joue au contraire un rôle lubrifiant.



3. LE POLYÉTHYLÈNE DONT EST COMPOSÉE la semelle du ski est un polymère dont les très longues chaînes moléculaires ont des parties cristallines et des parties amorphes. Seules les parties amorphes peu-

vent, en gonflant, absorber les molécules du fart (*points*), qui diffusent sur une certaine épaisseur de la semelle. Ces molécules sont en partie résorbées à la surface à mesure que la glisse du ski érode le fart.

LES AUTEURS



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

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Lind et S. P. Sanders,
The Physics of Skiing,
Springer (2^e éd.), 2010.

D. A. Moldestad, **Some aspects of ski base sliding friction and ski base structure**,
thèse de doctorat, Université norvégienne de science et technologie, décembre 1999.

L. Karlöf *et al.*,
Why is ice and snow slippery? The tribo-physics of skiing,
note technique, Swix Sport AS
(<http://www.swixsport.com/dav/babc49f803.pdf>).



Retrouvez les articles de
J.-M. Courty et E. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

Qu'en est-il du fart ? Il s'agit d'un mélange de cire et de paraffines qui fond facilement à chaud, avec un fer à repasser. On l'étale sur la semelle de polyéthylène et on le laisse pénétrer par simple diffusion. Généralement plus mou que la neige, il sera raboté lors de la glisse, mais il sera remplacé par le fart adsorbé dans la structure poreuse du polyéthylène, qui « transpirera » à la surface du ski.

Par ailleurs, si le fart est hydrophobe, on peut encore améliorer ses performances vis-à-vis de l'eau en rendant sa surface granuleuse. Cela semble paradoxal, mais on glisse mieux lorsque la surface du ski n'est pas parfaitement lisse. La structure granulaire permet d'écarter la semelle de la neige en cas de présence d'un film d'eau épais et de faciliter le drainage du liquide ; la taille appropriée des granularités va de

moins de un demi-millimètre pour de la neige froide et sèche, à près de un ou deux millimètres pour une neige chaude et humide.

Ainsi, le préparateur du ski devra d'abord choisir son fart, éventuellement en s'aidant de la couleur que lui a donnée le fabricant (cette couleur spécifie sous quelles conditions de neige utiliser le produit). Puis il le travaillera pour le structurer. S'il vise la performance, il ajoutera même au fart des lubrifiants solides, tel le graphite dont les lamelles glissent très bien les unes sur les autres. Dans le cas d'une neige polluée par des résidus solides non solubles, ces additifs limitent la friction sèche. Comme on le voit, la multiplicité des paramètres est telle que l'expert, même s'il s'appuie sur des critères scientifiques bien compris, peut laisser libre cours à son instinct et à son imagination.



SCIENCE & GASTRONOMIE

Un Noël de tendresse...

On évite la sécheresse de la dinde en faisant migrer du bouillon ou de la crème entre les fibres musculaires.

Hervé THIS



Occasion de grandes retrouvailles et de fraternité, le réveillon est toutefois souvent perturbé par la « sécheresse » de la chair de la dinde rôtie.

Il y a quelque temps, nous avons évoqué ici la possibilité de cuire la dinde à basse température, dans un lave-vaisselle, ce qui évite l'évaporation de l'eau et une trop complète coagulation des protéines de la chair. Toutefois, une autre solution plus « goûteuse » peut être envisagée : nous pouvons jouer intelligemment avec la structure du tissu collagénique.

Commençons par observer que la science substitue à des mots vagues des caractéristiques quantitatives : en sciences, l'article et l'adverbe doivent être remplacés par la réponse à la question « Combien ? ». La dinde est « sèche » ? À quel point ? Et puis, que signifie vraiment ce terme ? La chair peut sembler sèche, alors même que la teneur en eau n'est pas réduite.

La viande – en réalité le tissu musculaire – est un système formé de faisceaux de fibres. Ces dernières sont limitées par une peau de tissu collagénique, et contiennent de l'eau et des protéines (principalement les actines et les myosines) ; l'intérieur est analogue à du blanc d'œuf, en ce qui concerne la coagulation à la chaleur.

Au total, nous avons l'intérieur des fibres musculaires, qui durcit à la chaleur, et le tissu collagénique, qui, lui, peut être dégradé quand on s'y prend bien. En effet, ce tissu est fait de protéines de type « collagène », avec trois brins enroulés en hélice ; chaque brin est principalement un enchaînement de trois rési-

dus d'acides aminés qui sont la glycine, la proline et l'hydroxyproline. Chauffé dans l'eau, le tissu collagénique se dissocie, les trois brins des triples hélices de collagène se séparent, et chaque brin s'hydrolyse lentement, perdant des acides aminés dans le liquide aqueux où s'effectue le chauffage.

Les deux phénomènes, coagulation de l'intérieur des fibres musculaires et dissociation du tissu collagénique, sont simultanés et opposés : le premier durcit la viande, tandis que le second l'attendrit. Et c'est la raison pour laquelle la cuisine classique a bien des difficultés à produire d'un coup un résultat admissible.

En effet, quand on attendrit le tissu collagénique, on durcit les fibres, mais quand on évite le durcissement des fibres, on conserve un tissu collagénique dur... à moins qu'il soit réduit ou absent, comme dans la chair des poissons, par exemple, ou dans les morceaux les plus nobles des viandes de bœuf, tel le filet. Les cuisiniers estiment la tendreté de la viande en la pinçant : ils reconnaissent la pauvreté en collagène quand leurs doigts s'enfoncent facilement dans la chair.

La description précédente explique aussi pourquoi la viande bouillie trop longtemps laisse apparaître des fibres « sèches », séparées : le tissu collagénique dégradé laisse se séparer les fibres, qui n'ont pas perdu leur eau interne pour autant ; en revanche, les protéines de l'intérieur ont coagulé, formant comme une sorte de blanc d'œuf caoutchouteux, à l'intérieur des fibres séparées. Bref, la « sécheresse » est moins une teneur en eau réduite qu'une coagulation exces-

sive de l'intérieur des fibres musculaires (les protéines du collagène).

Analysons cette « Berezina » culinaire. Le tissu collagénique est dégradé par un chauffage ? Accentuons le phénomène, de sorte que les fibres, quand elles se séparent comme les poils d'un pinceau, absorbent un liquide goûteux (savoureux, odorant) où la viande sera cuite. Nous voulons éviter que les fibres paraissent sèches ? Il nous suffira de cuire à basse température.

La proposition, pour le réveillon, sera donc de s'y prendre très à l'avance : deux jours, trois jours même... De cuire la dinde à basse température dans un bouillon de volaille très corsé, ou, mieux, dans un bouillon corsé et additionné d'une forte quantité de crème, d'un peu de cognac, de jus de truffe... Les fibres se sépareront sans durcir, et le liquide de cuisson sera aspiré entre elles par capillarité. Finalement, on obtiendra une sorte d'éponge à bouillon ou à crème, avec en sus la saveur, dans le liquide de cuisson, des acides aminés libérés au cours de la longue cuisson.

Ainsi, la dinde étant remarquable, la réconciliation annuelle se fera dans les meilleures conditions !



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

→ ARCHÉOLOGIE

La montagne sacrée du Bego

Henry de Lumley
et Annie Echassoux

CNRS Éditions, 2011
[364 pages, 60 euros].

Dans les Alpes maritimes, une montagne de 2872 mètres d'altitude, le mont Bego, domine plusieurs vallées. Entre 3300 et 1800 ans avant notre ère, quelque 100 000 pétroglyphes y ont été créés sur des blocs et des dalles. Avec sa collaboratrice Annie Echassoux, Henry de Lumley fait le point sur les recherches entreprises depuis 1967 dans cette zone.

Le recensement, le classement et l'étude de ces signes gravés sont les principaux points approfondis dans cet ouvrage. La tradition, qui s'est maintenue plus de 1500 ans, consistant à inscrire des motifs sur les roches par percussion avec un outil de pierre, découlerait de l'existence d'un langage symbolique, sorte de protoécriture apparue en même temps que le cunéiforme ou les hiéroglyphes.

Les auteurs proposent aussi une grille de lecture fort complète des motifs et de leur signification, ou de leur interprétation. Ainsi, les figures thématiques de corniforme, d'aire, de poignard, de



hallebarde, de motif géométrique, de champs, d'humains ou de divinités sont analysées à travers des exemples caractéristiques, sous forme de relevés graphiques en noir et blanc, lisibles et très clairs. Chaque gravure est examinée dans un premier temps individuellement, puis dans son ensemble, car elle peut être composée ou construite à partir d'une figure, dite élémentaire. De fait, les compositions ou les constructions se classent soit en pictogrammes (représentations d'un objet, d'un animal ou d'un personnage), soit en idéogrammes (agencements évocateurs). De plus, pictogramme et idéogramme, selon leur association ou leur disposition sur la roche, acquièrent une signification encore différente. Afin d'étayer leurs hypothèses, les auteurs évaluent aussi les sens possibles de ces idéogrammes dans les sociétés contemporaines et ce, dans plusieurs domaines possibles.

Nous serions donc face aux témoignages des préoccupations économiques de peuples agropastoraux alpins. À travers des rites symboliques et cosmologiques, dont l'acte de graver des symboles sur les roches, ils cherchaient à s'assurer la protection et l'assistance de leurs divinités.

Incontournable, cet ouvrage est destiné aux passionnés de l'art rupestre en particulier, et aux fervents des mystères de l'archéologie en général. Didactique grâce à ses nombreuses planches et illustrations, il résume les longues recherches menées avec rigueur et cohérence par l'équipe de spécialistes qui arpente ce spectaculaire et gigantesque site montagnard depuis plusieurs dizaines d'années.

→ Nathalie Magnard
Ethnologue, spécialiste
des gravures du mont Bego

→ MATHÉMATIQUES

Questions de maths sympas

Hervé Lehning

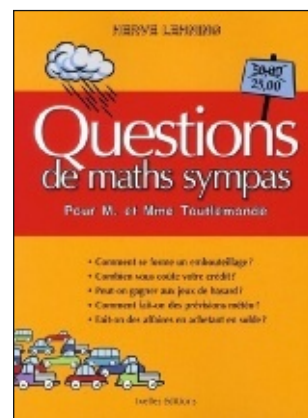
Belles, 2011
[302 pages, 17,90 euros].

Il y a une prolifération actuelle des livres de mathématiques expliquées (le terme ~~jeux mathématiques~~ serait réducteur). On peut le critiquer, mais c'est un phénomène bien-faisant pour qui aime les mathématiques : d'abord, chaque auteur a son style et ses intérêts ; ensuite, nous savons que la lecture de ces livres entraîne dépendance et accoutumance ; enfin, à côté des nouvelles découvertes, nous retrouvons avec plaisir de vieux thèmes mathématiques favoris.

Les récréations mathématiques sont aujourd'hui plus que les petites colles arithmétiques d'antan. Elles traitent de questions d'expression simple qui ont des prolongements notables dans la compréhension de notre quotidien. L'auteur de ce livre illustre cela avec le jeu de la vie et la propagation des épidémies, les sondages, la surréservation des places d'avion, l'optimisation de la surface d'un tipi, la courbe de von Koch et les fractales...

Les plus grands mathématiciens, qui affectent parfois de dédaigner ce qu'ils disent considérer comme des amusettes, sont néanmoins friands de ces applications à la fois rationnelles et magiques. André Weil, dont les travaux n'étaient pas ancrés dans le superficiel, racontait avec bonheur avoir collaboré avec Claude Lévi-Strauss pour résoudre un petit problème de cousinage.

Tout en s'ancrant dans la vie quotidienne, Hervé Lehning nous fait passer dans un autre monde, celui de la réflexion pure caracté-



risée par ce « dépaysement soudain » chanté par Alexandre Grothendieck. Le fait d'armes de H. Lehning est de nous montrer comment les mathématiques interviennent dans des domaines où le néophyte ne l'imaginerait jamais. En contraste, les mathématiques des programmes scolaires sont atrocement réductionnistes et limitées. Elles ne laissent pas imaginer combien de prolongements inattendus notre raison déductive peut élaborer : les programmes actuels sont un carcan et heureusement qu'il existe des associations comme *Math en Jeans* ou des livres comme celui-ci pour montrer l'éventail des possibles mathématiques et, peut-être, susciter des vocations de scientifiques.

→ Philippe Boulanger

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Expéditions dans les mers du Sud

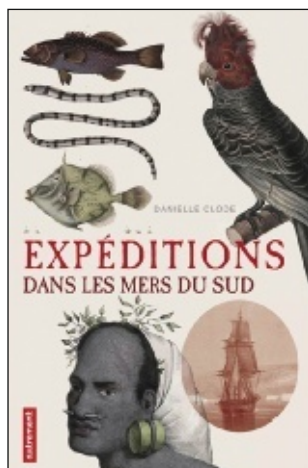
Danielle Clode

Autrement, 2011
[381 pages, 22 euros].

Ce livre s'ouvre sur la question célèbre posée, dit-on, par Louis XVI en route vers l'échafaud : « A-t-on des nouvelles de Monsieur de La Pérouse ? » Cet-

te ultime interrogation résume à elle seule l'intérêt porté en France à l'exploration des mers du Sud depuis la fin du XVIII^e siècle jusqu'aux années 1840, et cela quelles que soient les circonstances politiques, de l'Ancien Régime à la Monarchie de Juillet en passant par la Convention, le Directoire, l'Empire et la Restauration.

Pour faire revivre cette grande époque, l'auteur a choisi de se mettre dans la peau de divers personnages qui ont joué des rôles importants dans cette épopée maritime et scientifique. Il ne s'agit pourtant pas là d'un roman historique, mais d'une série de courts récits d'une lecture agréable, chacun d'entre eux fondé sur une solide documentation, dont les acteurs sont les hommes d'État, les



marins et les scientifiques qui ont joué un rôle dans la découverte des terres lointaines du Pacifique Sud, et en particulier de l'Australie. L'accent est mis sur la contribution de la France, même si quelques Britanniques sont évoqués. Le lecteur rencontre ainsi au fil des pages, parfois avec une certaine surprise, aussi bien des célébrités telles que Cuvier, Lamarck, Darwin, Dumont d'Urville et même Joséphine de Beauharnais, que des participants plus oubliés, comme le capitaine

Nicolas Baudin, acerbe et fort peu aimé de ses officiers et des naturalistes qui l'accompagnaient, le maussade botaniste Labillardière, le zoologue François Péron, à la probité douteuse, ou encore Rose de Freycinet, qui se déguise en homme pour suivre son mari à travers les océans.

Joliment illustré de gravures tirées des récits de voyage et des ouvrages naturalistes de l'époque, le livre de Danielle Clode recrée pour le lecteur les longs voyages périlleux, les maladies souvent mortelles, les rencontres avec des populations parfois hostiles, la rivalité avec l'Angleterre, les dissensions entre des hommes contraints de vivre en vase clos pendant des années – mais aussi l'étonnement des scientifiques découvrant des flores inconnues et des animaux aussi étranges que l'ornithorhynque, la fierté parfois mêlée d'appréhension des navigateurs allant au-delà des limites du monde connu jusqu'alors. Le livre se clôt ainsi en 1840, lorsque les hommes de Dumont d'Urville posent le pied, les premiers, sur le continent Antarctique. Une approche originale et plaisante de l'histoire des sciences.

→ Eric Buffetaut

CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure

→ BIOLOGIE ANIMALE

Arachna

Christine Rollard
et Vincent Tardieu,
illustré par Marcello Pettineo
Belin, 2011
[192 pages, 30 euros].

Voilà un beau livre à mettre entre les mains des amoureux de la nature et des naturalistes, qu'ils soient chevronnés ou

en herbe. Comme il l'avait fait sur l'île Espiritu Santo dans les Vanuatu, le journaliste Vincent Tardieu suit à la trace l'itinéraire de Christine Rollard à travers le maquis corse, le Mercantour, les forêts d'Auvergne, les étangs de Brenne, les falaises normandes, et même son laboratoire au Muséum de Paris. Ce chemin est illustré par les images de photographes naturalistes qui ont suivi Ch. Rollard sur le terrain et celles de professionnels comme Stephen Dalton, qui nous avait subjugués avec son livre *Pris sur le vif* sur les insectes en vol.

Arachna n'est pas seulement un ouvrage sur les araignées, c'est aussi un carnet de notes de voyage naturaliste. Il regorge d'anecdotes vivantes, de détails, de notes, de dessins sur des bouts de vieux papiers collés, froissés ou jauniss.

Marcello Pettineo y apporte son incroyable talent d'illustrateur et une grande originalité iconographique. Il y dessine à merveille au crayon, parfois avec des palettes de couleurs attenantes, fleurs, insectes, oiseaux, amphibiens, leurs comportements et même des cartes, issus de ses observations dans les milieux traversés ou d'ailleurs. En bordures de pages, il concocte des montages délicats de photos d'habitats, de plantes préparées à la manière d'un herbier, et de dessins animaliers précis. Les auteurs ont fait



Brèves

L'HOMME EST-IL UN GRAND SINGE POLITIQUE ?

Pascal Picq
Odile Jacob, 2011
(270 pages, 21,90 euros).



Les grands singes connaissent la politique et ont des « hommes politiques », qui peuvent être des femelles. Après nous les avoir présentés, l'auteur démontre que leurs comportements politiques sont, la complexité humaine en moins, les mêmes que les nôtres. Il propose ensuite une approche évolutionniste de la politique. Le lecteur se rendra compte qu'un électeur peut être à la fois un bobo et un bonobo...

POURQUOI L'ART PRÉHISTORIQUE ?

Jean Clottes
Gallimard, 2011
(334 pages, 8,90 euros).



L'art a été l'un des premiers traits de l'hominisation, ce qui rend l'étude de ses origines essentielle. L'auteur, qui l'a poursuivie toute sa vie, présente ici l'interprétation pour lui la plus féconde : il s'agirait de l'un des produits du chamanisme. Cet argumentaire minutieux s'appuie sur l'observation des groupes humains vivant près de la nature.

COMPRENNONS-NOUS VRAIMENT LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

Franck Laloe
CNRS/EDP Sciences, 2011
(353 pages, 45 euros).



Ce livre bienvenu fait le point sur ce que l'on croit comprendre de la mécanique quantique, une question actuelle. Il fait le tour des différentes interprétations proposées et précise les points de vue souvent antagonistes qui les fondent et qui peuvent s'opposer à d'autres théories admises, telles que la relativité.

Brèves

CAP SUR LES PÔLES

Fabienne Lemarchand *et al.* (dir.)
Omniscience, 2011 (224 pages, 39 euros).

À quand la prochaine éruption du mont Erebus ? Les régions polaires sont-elles polluées ? Comment les Inuits voient-ils le monde ? Qu'est-il arrivé à Alfred Wegener ? En 100 questions, 40 spécialistes de tous horizons présentent les derniers travaux sur l'Arctique et l'Antarctique. Un ouvrage accessible et illustré.

UNE VIE À RACONTER

Vittorio Luzzati
HD Témoignage, 2011
(160 pages, 21 euros).

Biophysicien, chercheur au CNRS depuis 1947, l'auteur a vécu la naissance de la biologie moléculaire et les transformations de la politique de recherche d'après-guerre. Au fil de ses souvenirs, de l'Italie fasciste à Gif-sur-Yvette en passant par Buenos Aires, Paris, New York, Strasbourg, un portrait de la recherche vue de l'intérieur se dessine, invitant à réfléchir sur son organisation en France.



NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES: ESPÉRANCES ET INQUIÉTUDES

Louis Laurent
et Jacques Villain (coord.)
Ac. des sciences/Elsevier Masson, 2011
(102 pages, 46 euros).

Dossier thématique des *Comptes rendus de l'Académie des sciences* en physique, cet opuscule rassemble les points de vue de physiciens, biologistes, ingénieurs, juristes sur les nanotechnologies : sont-elles utiles, futiles ou néfastes ? Les nano-objets sont-ils toxiques ? Quel cadre juridique définir pour évaluer leur utilité et leurs risques ? Telles sont quelques-unes des réflexions menées.

le choix de ne pas citer de référence bibliographique. Cela rend l'ouvrage plus vivant, mais ne donne pas d'orientations (comme vers l'ouvrage *Biology of spiders* de R.F.Foelix, mis à jour en 2011) pour qui souhaiterait aller plus loin dans la découverte du monde arachnéen.

L'un des grands charmes de ce livre est de nous emporter dans la passion de ses auteurs pour le terrain et la beauté de la nature. Nous nous apercevons ainsi une fois de plus que toute cette beauté est à portée de qui prend le temps d'observer, ici et maintenant, en France, ce que la nature offre.

Voilà un livre sur les araignées réalisé avec l'humanité et la grande humilité face à la nature qui caractérisent Ch. Rollard quand elle enseigne à ses étudiants ou rencontre des naturalistes amateurs. Profitez-en, ainsi que de la passion sincère des auteurs pour la nature, en lisant ce livre.

→ Roland Lupoli

Université Paris-Descartes

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Métaphysique quantique

S. Ortoli et J.-P. Pharabod

La Découverte, 2011
(142 pages, 14 euros).

Certains lecteurs potentiels pourraient réagir à ce titre légèrement provocateur par un mouvement d'humeur, une suspicion légitime : ne s'agit-il pas d'un nouveau détournement chimérique de la mécanique quantique ? Ceux qui ont lu en son temps l'excellent *Cantique des quantiques*, des mêmes auteurs, n'auront pas cette inquiétude. Car Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod n'inventent pas

mais reprennent les mots des théoriciens et des expérimentateurs qui sont les acteurs de la physique quantique. On parle ici de choses concrètes, on explique ce qui est observé, comment c'est observé, et ce que cela implique.

Et ce nouvel ouvrage est parfaitement à jour. Les auteurs ne s'attardent pas sur les débats qui ont agité le deuxième quart du XX^e siècle, avec pour participants Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Dirac et bien d'autres physiciens.

Certes géniaux, ces fondateurs ne pouvaient cependant pas prévoir les développements ultérieurs de la physique quantique, réalisés en particulier grâce à la possibilité que l'on a maintenant de produire une par une des entités quantiques telles que photons, électrons, atomes, etc., puis de les soumettre individuellement à la question.

Le livre donne au contraire la parole aux scientifiques contemporains, ceux qui, à la suite notamment de Bernard d'Espagnat, traquent, par l'expérience ou la théorie, l'étrangeté de ce monde quantique qui semble servir de soubassement au nôtre : Alain Aspect, Anton Zeilinger, David Deutsch, Roger Penrose, Serge Haroche, Jean-Michel Raimond, d'autres encore.

Six chapitres débroussaillent successivement la notion de superposition des états, celle de complémentarité, le problème de la mesure quantique, l'hypothèse des mondes multiples en bifurcation, le fait maintenant bien établi de la non-localité spatiale, et les interrogations sur la possibi-



lité d'inversion du sens du temps. Le thème de la « liberté quantique » est abordé en annexe avec le théorème du libre arbitre de Conway et Kochen.

Chaque chapitre s'ouvre par un petit apologue qui met le lecteur en appétit. Les explications qui suivent présentent de façon accessible les idées sous-jacentes qui, bien que relativement simples, sont contre-intuitives, et cela dans une langue claire, en évitant les développements mathématiques. De petits schémas aident à la compréhension.

En d'autres termes, cet ouvrage se concentre sur le sens physique qui émerge d'équations notoirement abstraites et difficiles à interpréter. La vulgarisation, particulièrement en mécanique quantique, est un exercice délicat. Avec cette *Métaphysique quantique*, il est parfaitement réussi.

→ Christophe Pichon

Institut d'astrophysique de Paris



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr