

ENFANTS AUTISTES : comment les protéger des charlatans ?

■ POUR LA SCIENCE

Avril 2011 - n° 402

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Dinosaures

On a retrouvé du sang dans leurs fossiles

À quoi servent les supraconducteurs ?

De l'imagerie médicale
aux réseaux d'électricité

Les Vikings en Normandie

Une intégration réussie

Les insectes-robots

Des scarabées en vol téléguidé



M 02687 - 402 - F: 6,20 €

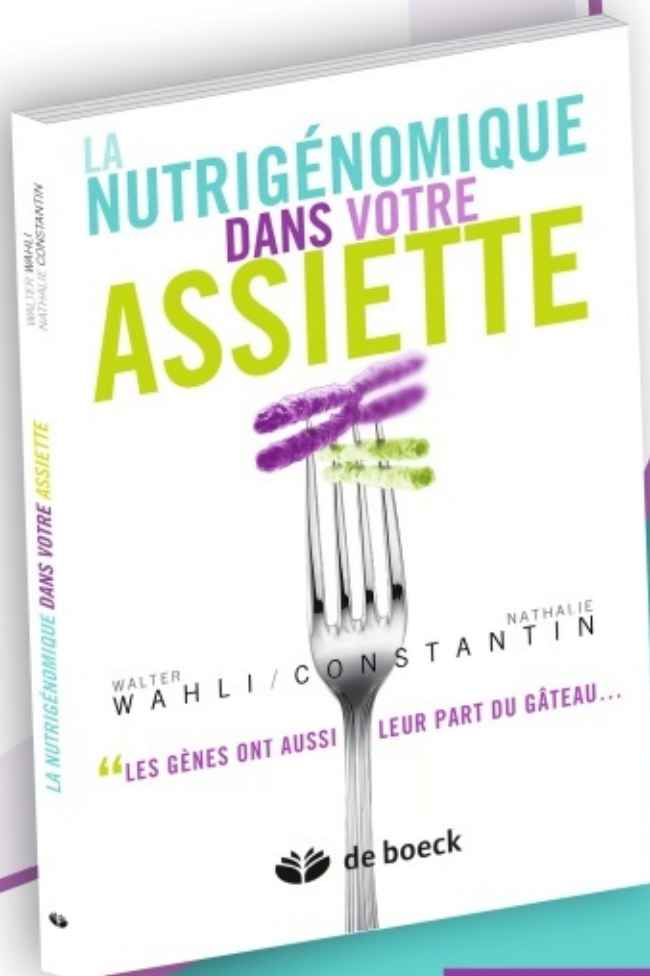


France métro : 6,20 € - DOM s : 7,30 € - BEL : 7,20 € - CH : 12 FS - CAN : 10,95 \$ can - Grèce : 7,60 € - LUX - Italie - PORT cont : 7,20 €
- AND : 6,20 € - ALL : 9,30 € - MAR : 60 DH - TUN : 6,70 TND - REU av : 9,30 € - TOM surf : 980 F CFP - TOM av : 1770 F CFP

LA NUTRIGÉNOMIQUE DANS VOTRE ASSIETTE

W. WAHLI et N. CONSTANTIN

Les perturbations métaboliques gagnent graduellement nos sociétés. Elles reflètent l'inadéquation entre les régimes alimentaires modernes, la sédentarité croissante des populations et le patrimoine génétique que nous avons hérité de nos ancêtres. Le lecteur est invité à réfléchir sur l'énorme potentiel que constitue l'application des dernières recherches en génétique au domaine de la nutrition, principalement en matière de prévention.



NOUVEAUTÉ

32 € ■ 232 p.

UN PROJET DE PUBLICATION ?

N'hésitez pas à nous le soumettre, particulièrement dans les domaines suivants :

- Nutrition et questions de santé publique
- Pollution, toxicologie et toute question liée à l'environnement
- Sujets liés à la géographie

Contact : fabrice.chretien@deboeck.com

En librairie et sur www.deboeck.com



de boeck

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, Bénédicte Salthun-Lassalle

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot,

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 :

Alain Bousquet-Mélou, Eric Buffetaut, Bettina Debù, Guillaume
Duménil, Étienne Guyon, Évelyne Host-Platret, Philippe
Lognonné, Martine Maibeche-Coisné, Marie-Christine Maurel,
Raphaël Mercier, Nicolas Peretto, Pierre Pica, Christophe Pichon,
David Point, Laureline Porcar, Marc de Rafélis, Valérie Simon-
neaux, Jeroen Sonke, Daniel Tacquenot, Christophe Tzourio.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(j.f.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 dossiers ou de magazines :
02 37 82 06 62 [de l'étranger : 33 2 37 82 06 62]

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal,
Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châteaux, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Ricky
Rusting, 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 conte-
nus 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'adop-
tation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le
nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific Ame-
rican, 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-Augus-
tins - 75006 Paris).



Contre le dogmatisme

C'est la profonde ignorance qui inspire le ton dogmatique.
Jean de La Bruyère, *Les Caractères*, 1688

Pas plus que les autres domaines, la science n'est à l'abri des dogmes. Ils y sont même légion, mais tombent peut-être plus régulièrement qu'ailleurs, grâce aux travaux des chercheurs, quand s'impose l'évidence apportée par de nouveaux résultats. Ainsi en va-t-il en paléontologie : jamais nous ne retrouverons de restes organiques dans des fossiles de dinosaures ! Et des traces de globules rouges tapis au creux des os fossilisés se révèlent (*voir Dinosaures : on a retrouvé leur sang, page 30*). En archéologie : les Vikings sont venus en conquérants aux alentours de l'an Mil, quand ils ont envahi la vallée de la Seine ! Mais à y regarder de plus près, on constate que les noms de nombreux hameaux, villages, villes et fleuves portent la marque d'une origine nordique ; les Vikings ont davantage cherché à s'intégrer qu'à s'imposer par la force dans cette région (*voir Les Vikings de la Seine, page 38*).

En technologie : les dispositifs supraconducteurs, refroidis à l'hélium ou à l'azote liquide à des températures extrêmement basses – de l'ordre de -240 à -140 °C – ne sortiront jamais des laboratoires ! Or aujourd'hui,

Quand s'impose l'évidence...

ils sont présents dans les grands accélérateurs de particules, des réseaux de distribution d'électricité ou encore les dispositifs d'imagerie médicale (*voir La supraconductivité à l'ère industrielle, page 76*). Ou encore en astronomie : Mercure est si proche du Soleil que cette petite planète n'est certainement rien d'autre qu'un astre mort ! Pourtant, même si cette planète n'est pas beaucoup plus grosse que la Lune, elle retient une atmosphère ténue, est dotée d'un champ magnétique, et sa surface témoigne d'une activité volcanique passée (*voir Mercure : une planète dans la fournaise, page 60*).

À mesure que les connaissances progressent, l'ignorance recule, les dogmes aussi. Mais quand la science n'apporte pas les réponses attendues, le dogmatisme résiste. Ainsi, la recherche n'avance pas aussi vite que le voudraient les parents d'enfants atteints d'autisme, et, comme toujours dans ces cas-là, les charlatans profitent de la détresse des personnes concernées, assénant leurs théories fallacieuses. Ils proposent des solutions au mieux inefficaces, au pire dangereuses (*voir Autisme, attention aux charlatans !, page 46*). Il est urgent de donner aux chercheurs et aux médecins les moyens nécessaires pour améliorer la prise en charge de ces enfants, dont le nombre ne cesse d'augmenter. ■

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES

Didier Nordon

Actualités

6 Un cœur superfluide
dans les étoiles à neutrons

9 Lucy avait le pied arqué

11 L'argile, berceau de la vie ?

12 Le cannibalisme
nutritionnel de Gough's Cave
... et bien d'autres sujets.

14 ON EN REPARLE

Opinions

16 POINT DE VUE
Moins d'antibiotiques :
chez l'animal aussi !

Antoine Andreumont

17 ÉCONOMIE
Le pouvoir,
c'est la nudité du roi...

Ivar Ekeland

18 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Comment gérer la grande
faune sauvage ?I. Mauz, C. Granjou, A. Doré
et C. Mounet20 VRAI OU FAUX
Le lait est-il
une boisson saine ?

Jean-Marie Bourre

22 COURRIER DES LECTEURS

24 QUESTIONS OUVERTES
Faut-il archiver le Web ?

Gildas Illien

Ce qui est affiché sur la Toile change très vite. Un archivage périodique est donc nécessaire pour en garder la mémoire, avec des difficultés qui ne sont pas seulement techniques.

Sur la totalité des numéros :
deux encarts d'abonnement pages 24 et 25.
Encarts commande de livres et abonnement pages 76 et 77.
En couverture : © Davide Littschwager

À LA UNE

30 PALÉONTOLOGIE

Dinosaures :
on a retrouvé
leur sang

Mary Schweitzer

La préservation de matériaux organiques durant plusieurs dizaines de millions d'années passait pour impossible. Pourtant, les paléontologues en trouvent de plus en plus dans des os de dinosaures.



38 ARCHÉOLOGIE

Les Vikings de la Seine

Vincent Carpentier

Les Vikings n'ont laissé pratiquement aucune empreinte archéologique en Normandie, mais seulement des traces linguistiques et historiques. Elles attestent de leur volonté de s'intégrer dans la société carolingienne.



46 MÉDECINE

Autisme, attention
aux charlatans !

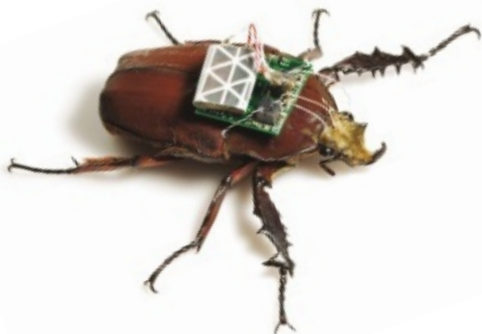
Nancy Shute

Le nombre d'enfants diagnostiqués autistes est en constante augmentation. Or aucun médicament efficace n'existe et seules les thérapies comportementales auraient un effet. Les parents se tournent vers des traitements douteux, souvent risqués.



52 ROBOTIQUE**Scarabées en vol... téléguidé***Michel Maharbiz et Hirotaka Sato*

Des chercheurs conçoivent de minuscules robots volants, mi-insectes, mi-machines. Ces hybrides du vivant et de l'électronique pourraient un jour sauver des vies en cas de catastrophes ou de guerres.

**60 PLANÉTOLOGIE****Mercure : une planète dans la fournaise***S. Murchie, R. Vervack Jr. et B. Anderson*

Après trois survols, la sonde MESSENGER s'est mise en orbite autour de Mercure pour observer en détail cette planète méconnue.

66 BIOPHYSIQUE**Onduler pour avancer***Daniel Goldman et David Hu*

Pour se déplacer, les serpents et d'autres animaux se tortillent. Leurs ondulations se ressemblent, mais sont en fait régies par des mécanismes très différents suivant le support.

76 TECHNOLOGIE**La supraconductivité à l'ère industrielle***Pascal Tixador et Philippe Lebrun*

Certains matériaux perdent toute résistance électrique au-dessous d'une certaine température. Ce phénomène découvert il y a tout juste 100 ans a des applications méconnues, mais de plus en plus présentes.

Regards**84****HISTOIRE DES SCIENCES****Madame d'Arconville, femme de sciences au temps des Lumières***Patrice Bret*

De la traduction scientifique à ses travaux sur la putréfaction, cette femme du XVIII^e siècle, savante reconnue par ses pairs, mit un point d'honneur à rester dans l'anonymat.

88**EN IMAGES****Ventouses sous pression***Frank Grasso***90****LOGIQUE & CALCUL****Du rêve à la réalité des preuves***Jean-Paul Delahaye*

Les ordinateurs ne savent pas prouver seuls des théorèmes profonds. Cependant, grâce aux assistants de preuve, ils garantissent les démonstrations découvertes par les mathématiciens.

96**ART & SCIENCE****Le fantôme de Louis XV***Loïc Mangin***98****IDÉES DE PHYSIQUE****Sonner comme une cloche***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik***101****SCIENCE & GASTRONOMIE****Quand le sucre fond***Hervé This***102****À LIRE**

Rendez-vous sur **POURLA 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

→ TOI AUSSI, MON MAÎTRE...

Une statistique affligeante vient d'être publiée. Dès la fin de leur première année de retraite, 80 pour cent des professeurs de mathématiques ont oublié la formule donnant $\sin(a+b)$. Au bout de deux ans, ils sont 95 pour cent à ne plus savoir pourquoi moins par moins fait plus. Qu'une troisième année s'écoule, et ils se mettent à hésiter sur l'orthographe de leur ancienne discipline. Matématiques ? Mathématiques ? Matématiques ?

Toujours pressé dans sa lutte contre les incompetents, le ministre de l'Éducation va instituer des cours de recyclage obligatoires afin de maintenir les ex-professeurs de mathématiques à un niveau digne de la fonction qu'ils ont autrefois occupée.

Tant qu'on n'est pas mort, on n'est jamais tranquille... surtout pas en avril.



sées, de tant de gens. Les extrémistes (il s'en trouve toujours) affolent les débats par leurs surenchères et en faussent l'issue. Quand d'innombrables volontés s'entrechoquent, le choix retenu n'exprime la volonté de personne. Il peut être sensé dans le contexte où il a été opéré, et exercer ses effets dans un contexte où il ne l'est plus. Aucune décision ne répond à tous les aspects du problème qu'elle prétend résoudre. Certains acteurs la feront servir à des fins que nul n'imaginait. Dans la masse énorme des mesures prises pour gérer des populations, les contradictions, les incohérences, les lacunes, sont inévitables. Quelques-uns sauront les utiliser à leur profit, d'autres en seront victimes.

Un morceau de bravoure apprécié des journaux est de pourfendre « les absurdités du système » – le système étant, selon l'idéologie du journal et les sujets du moment, l'enseignement en France, la finance internationale, la politique tarifaire de telle entreprise, etc. Les journaux se donnent là un beau rôle facile. Les systèmes qu'ils accusent n'y peuvent mais. Être nombreux est une absurdité en soi !

Les hypertextes ne nous affranchissent pas de la linéarité de la lecture, puisque la contrainte temporelle n'a pas changé : nous devons lire une ligne après l'autre. Pouvoir en lire plusieurs à la fois, voilà qui serait une expérience sans précédent. Cette façon de lire nous ferait accéder à une compréhension riche comme une polyphonie : l'effet musical créé par des sons simultanés n'a rien à voir avec ce qui se produit si les notes de chaque accord sont égrenées l'une après l'autre. Le plaisir de la lecture serait métamorphosé, comme le plaisir du palais est métamorphosé par la cuisine : déguster un gâteau est un délice incomparable avec la sensation que causerait l'absorption successive de l'œuf, du sucre, de la farine, de la levure, du sel, etc., qui composent celui-ci.

Vivement l'hyperlecture ! Camarades inventeurs, tâchez de trouver un procédé par lequel nous pourrions lire plusieurs textes simultanément, d'un seul et même coup d'œil. En vous inspirant de la musique et des gâteaux, vous devriez y parvenir.

→ À QUAND LA LOI

DES PETITS NOMBRES ?

À moins que vous ne soyez vous-même probabiliste, n'invoquez jamais « la loi des grands nombres ». Vous risquez trop de tomber sur un probabiliste qui vous accusera d'employer cette expression mal à propos. Plusieurs théorèmes portent ce nom et, visiblement, vous l'ignorez !

Les conseils étant faits pour être suivis par ceux qui les reçoivent, non par ceux qui les donnent, je vais maintenant, quoique n'étant pas probabiliste, énoncer la loi des grands nombres.

Loi des grands nombres : « Dès que le nombre de gens impliqués dans une affaire devient assez grand, le triomphe de l'absurde est un événement certain. »

Démonstration. Si le nombre de gens concernés par une affaire se compte en millions, la décision résultant de l'interaction de tous les intérêts en jeu ne peut avoir de pertinence que partielle. Il n'y a pas de rationalité commune aux besoins, aux désirs, aux manœuvres, aux arrière-pen-



→ TEXTES POLYPHONIQUES

Grâce aux hyperliens, nous pouvons, en pleine lecture d'un texte, nous mettre soudain à lire quatre lignes d'un deuxième texte, puis cinq lignes d'un troisième avant de revenir au premier pour en lire huit de plus, et ainsi de suite. Mais – à part la facilité des va-et-vient – il n'y a là rien de nouveau. On peut pratiquer le même genre de lecture avec des livres.

→ DESSEIN PAS INTELLIGENT

Depuis des millions d'années, les poussées telluriques suscitent des reliefs que la pluie, le vent, la mer, érodent. Ces phénomènes se répètent inlassablement, soumis à des lois immuables. Éternel recommencement de mêmes causes produisant les mêmes effets. Com-

bat sans fin de forces obtuses, aussi obstinées les unes que les autres.

Du côté de la vie, ce n'est pas mieux. Des millions de formes de vie apparaissent au petit bonheur la chance. Qu'importe si une forme est non viable. L'évolution a des millions d'années derrière elle, des millions d'années devant ; elle a eu et elle aura tout le temps d'essayer autre chose. Là encore, l'idiotie règne : revenir à la charge indéfiniment, à l'aveugle, jusqu'à ce que ça marche.

Du côté des hommes, c'est pire. Dans son pullulement de tentatives, l'évolution est tombée sur de la vie intelligente. Quel accident bête ! Les hommes n'ont pas su s'adapter à l'intelligence, ils s'en servent de travers, et elle leur apporte des déboires sans nombre. Le succès d'un imbécile ; un homme intelligent agissant en dépit du bon sens ; la victoire du plus buté, ou du plus menteur, sur le plus fin – ces spectacles sont quotidiens. Convaincre les anciennes générations d'une vérité nouvelle est impossible, constatait Planck ; il faut attendre qu'elles meurent. Mais la vision des jeunes n'est pas toujours juste ! Seulement, il en va là comme dans la nature : l'élément décisif pour gagner est d'avoir avec soi la force brute du temps. C'est un tour pas malin que la nature a joué à l'humanité en la dotant d'une intelligence qui lui fait faire tant de bêtises et d'une habileté qui lui fait se tendre à elle-même tant de pièges dangereux.

Qu'un Dessein gouverne tout cela, j'en doute. Mais qui le sait ? Il y a cependant une certitude à laquelle on peut se raccrocher : si un Dessein mène le monde, alors c'est un Dessein Stupide.



Le congrès des sociétés historiques et scientifiques se tient chaque année dans une grande ville universitaire. Trait d'union entre la recherche universitaire et la recherche bénévole, cette manifestation scientifique – lieu de rencontre privilégié des membres des sociétés savantes – est largement ouverte aux universitaires, aux élèves des grandes écoles, aux membres des centres de recherche. Il permet également aux jeunes chercheurs de faire leurs premières communications sous la direction de personnalités scientifiques de premier plan.

Le congrès de Perpignan se déroulera du 2 au 7 mai 2011, dans les locaux de la faculté des lettres et sciences humaines de l'université de Perpignan Via Domitia, sur le thème « Faire la guerre, faire la paix ».



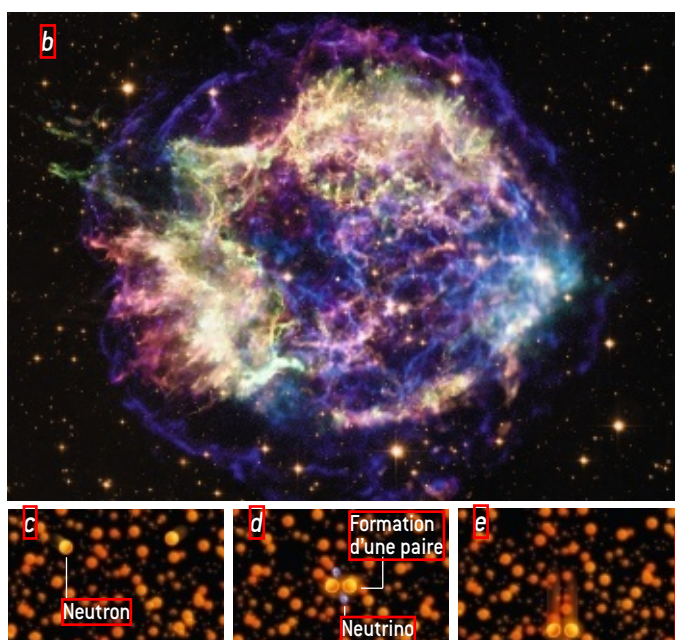
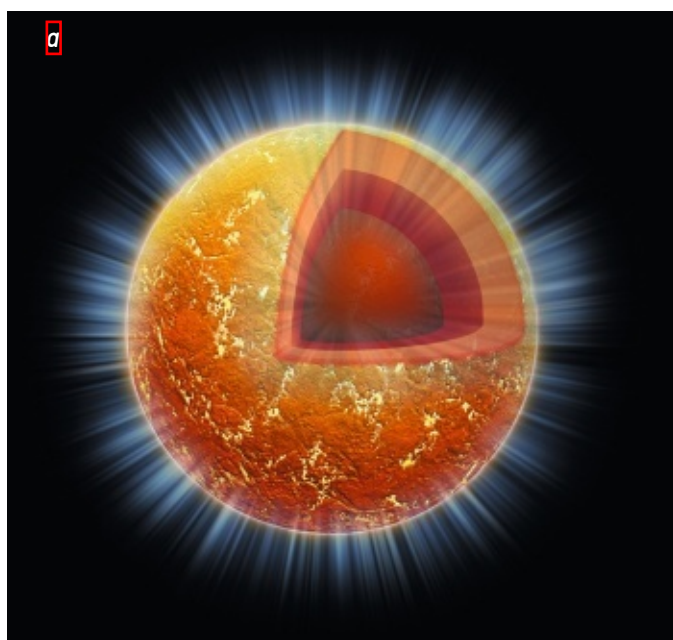
Pour tout contact

Comité des travaux historiques et scientifiques
136^e congrès
110, rue de Grenelle, 75357
Paris cedex 07
tél. : 33 (0) 1 55 95 89 64
fax : 33 (0) 1 55 95 89 66
congres@cths.fr
www.cths.fr

Astrophysique

Un cœur superfluide dans les étoiles à neutrons

Le refroidissement rapide d'une jeune étoile à neutrons s'expliquerait par la transition de son cœur vers une phase superfluide.



Une étoile à neutrons (a, vue d'artiste) présente des couches de densité de plus en plus élevée, de la croûte (en orange) au noyau interne (en rouge foncé). Cassiopee A, distante de 11 000 années-lumière, est le vestige d'une étoile massive ayant explosé entre 1667 et 1680 (b, image qui superpose des vues en rayons X et en lumière visible). Elle abrite en son centre une étoile à neutrons, et le cœur de cet astre serait superfluide. La formation de cette phase (c, d, e) suppose un appariement des neutrons, avec émission de neutrinos. Ces particules, qui interagissent très peu, évacueraient efficacement l'énergie du cœur de l'étoile (a, rayons bleutés). Cela expliquerait le refroidissement rapide de l'étoile.

La superfluidité est un état de la matière étonnant, où la viscosité du fluide est nulle et sa conductivité thermique infinie. En laboratoire, l'hélium, refroidi à une température proche du zéro absolu, devient superfluide. Selon les calculs menés indépendamment par deux équipes d'astrophysiciens, conduites par Dany Page, de l'Université de Mexico, et par Peter Shternin, de l'Institut Ioffe à Saint-Petersbourg, le cœur des étoiles à neutrons serait également dans un état superfluide.

Les étoiles à neutrons sont des résidus d'étoiles ayant explosé en supernova. Ce sont les objets les plus denses connus : de l'ordre de un milliard de tonnes par centimètre cube. La pression y est telle que les électrons fusionnent avec les protons, formant des neutrons. L'intérieur est ainsi une soupe de noyaux riches en neutrons, de protons et de neutrons libres, ces derniers étant de plus en plus

majoritaires à mesure que l'on s'approche du centre de l'étoile.

Dans quel état est cette matière exotique ? Les données du satellite à rayons X *Chandra* concernant la jeune étoile à neutrons située au centre de Cassiopee A, le vestige d'une supernova qui a explosé il y a environ 330 ans, montrent une diminution rapide de la température de l'astre, de l'ordre de quatre pour cent sur les dix dernières années.

Selon les deux équipes, ce refroidissement très rapide ne peut s'expliquer par la dissipation thermique de la région superficielle de l'étoile. D'après leurs calculs, ce serait le résultat d'une transition vers une phase superfluide des neutrons dans le noyau de l'étoile. En effet, la superfluidité peut être décrite par un modèle analogue à celui de la supraconductivité (la théorie BCS), où des particules identiques s'associent deux à deux pour former des « paires de Cooper ». Dans le

cas d'un fluide de neutrons, la formation d'une paire s'accompagne de l'émission de deux neutrinos. Ces particules, qui interagissent très peu avec la matière, évacuent efficacement l'énergie de l'intérieur de l'étoile.

D'après les astrophysiciens, la rapidité du refroidissement implique que les protons résiduels sont aussi dans un état superfluide. Comme ils portent une charge électrique, ils forment un milieu matériel supraconducteur.

Le modèle de D. Page et ses collègues leur a permis d'estimer la température critique (très difficile à calculer directement) au-dessus de laquelle les neutrons deviennent superfluides : entre 500 millions et un milliard de degrés. La température critique des protons serait plus élevée encore.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 411(3), pp. 1977-1988, 2011 ; *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, 081101, 2011

Préhistoire

Madagascar habitée il y a 4 000 ans ?



D. GOMMERY, CLAPPIN & OMERS



Peuplée au 1^{er} millénaire de notre ère, l'île de Madagascar était censée avoir été abordée pour la première fois entre 400 et 200 avant notre ère. Une équipe du CNRS et de l'Université malgache de Mahajanga, menée par Dominique Gommery, a découvert les traces d'un repas pris par des hommes quelque 2000 ans avant notre ère : des os d'une espèce aujourd'hui disparue d'hippopotames nains, qui portent de nombreuses traces de découpe (ci-contre, en bas) sur les zones d'attaches musculaire et tendineuse. Ils ont été trouvés dans la grotte d'Anjohibe (ci-contre), au Nord-Ouest de la Grande île, donc à proximité des deux voies les plus courtes pour une colonisation humaine : celle du Nord-Ouest passant par les Comores (colonisation d'origine africaine) et celle du Nord-Est (colonisation d'origine asiatique). Cette découverte indique que l'homme a cohabité avec la grande faune disparue de l'île, puisqu'il en a consommé l'une des espèces. Or l'extinction il y a quelques millénaires de ces grands vertébrés, notamment de grands lémuriers, est expliquée. L'homme aurait-il joué un rôle ?

→ Maurice Mashaal

D. Gommery et al., Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (série Palevol), à paraître, 2011

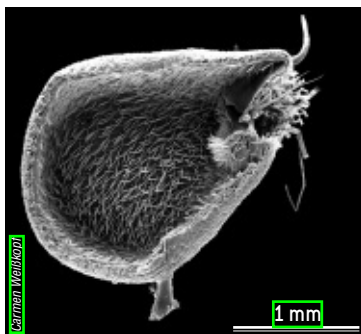
Biophysique

La plante carnivore la plus rapide du monde

On a élucidé les mécanismes du piège ultrarapide d'une plante aquatique carnivore.

Drame dans la mare. La larve d'insecte s'approche d'une feuille anodine quand soudain, après avoir touché l'un de ses poils, elle est aspirée et se retrouve enfermée dans une outre – la feuille s'est gonflée – où des enzymes digestives sont déjà en action. La capture a duré moins d'une milliseconde. La plante en question est l'utriculaire, une plante carnivore commune dans les marais. Philippe Marmottant, du Laboratoire interdisciplinaire de physique (CNRS), à l'Université Joseph Fourier, à Grenoble, et ses collègues ont dévoilé le mécanisme de ce piège foudroyant.

Ils ont enregistré à l'aide d'une caméra ultrarapide les mouvements en jeu dans la brusque aspiration. Les images révèlent un processus de flambage de la porte qui ferme hermétiquement, au repos, l'entrée de l'outre : lorsque les poils sensitifs déclenchent la capture, le clapet, bombé vers l'extérieur, inverse sa courbure et, ce faisant, s'ouvre en un instant (l'eau



Carmen Venturini



O. Vincent et al.

Le piège, nommé utricule, de l'utriculaire (*Utricularia vulgaris*) et une coupe longitudinale (à gauche) de ce piège vue au microscope électronique à balayage. Armé, le piège est plat et emmagasine de l'énergie élastique.

et la proie sont aspirées). Auparavant, des petites glandes ont évacué, en une heure environ, l'eau de l'intérieur du piège vers l'extérieur, créant ainsi une dépression qui se traduit par un aplatissement de la feuille et par le stockage d'énergie élastique dans les parois.

Un modèle numérique a décrit les deux phases du piège : d'une part, l'expulsion lente et active de l'eau et, d'autre part, l'aspiration passive et rapide. Ce modèle com-

bine la description des parois du piège sous la forme d'un maillage triangulaire dont les éléments sont définis par leur tension et leur courbure, et le calcul de l'évolution temporelle de la position de chaque sommet des mailles. Les simulations obtenues sont en accord avec les enregistrements vidéo.

→ Loïc Mangin

O. Vincent et al., Proc. of the Roy. Soc. of Lond. B, sous presse, 2011 ; M. Joyeux et al., Physical Review E, sous presse, 2011

En bref

HIBERNER AU CHAUD

On pensait que pendant l'hibernation, le métabolisme de l'ours noir américain (*Ursus americanus*) diminuait d'environ 50 pour cent quand sa température baissait de 10°C. Mais des biologistes de l'Université de l'Alaska ont montré que la température de l'animal ne passe que de 37°C à 32°C, tandis que sa consommation d'oxygène, par exemple, baisse de 76 pour cent. Ainsi, chez les ours noirs, le métabolisme baisse proportionnellement beaucoup plus que la température.

L'ILLUSION DU DEMI-SHIVA

Des neurologues ont réussi à créer l'illusion d'avoir trois bras ! Des individus, assis à une table, avaient à leur droite la prothèse d'un membre entier : ils voyaient donc trois bras. Les expérimentateurs caressaient les deux « mains droites » de la même façon, de sorte que le cerveau était face à un conflit : « Quelle main droite est touchée ? » La solution passerait par l'acceptation du membre factice comme sien. Pour preuve, menacer avec un couteau la main en plastique ou la vraie entraîne une sudation identique.

SOLIDE PARADOXAL

Les cristaux de monohydrate de méthanol, mélange à parts égales d'eau (H₂O) et de méthanol (CH₃OH), sont singuliers : une équipe anglo-française a établi qu'en chauffant l'échantillon sous pression atmosphérique, il se dilate beaucoup dans une direction et se contracte dans les deux autres. Mais si on le chauffe en lui appliquant une pression, l'échantillon se dilate dans deux directions et se contracte dans la troisième. Des propriétés dues à son architecture moléculaire.

Astrophysique

Premières étoiles : naissance en groupes

Comment se sont formées les premières étoiles ? Ces astres, dits de population III, étaient sans doute très massifs. Des simulations réalisées par l'équipe de Paul Clark, de l'Université de Heidelberg, en Allemagne, suggèrent en outre que les premières étoiles naissaient en groupes.

Dans l'Univers primordial, en l'absence d'éléments lourds (créés par les étoiles), l'énergie se dissipait moins bien dans les nuages de gaz en contraction. La masse minimale du cœur dense susceptible de donner une étoile pouvait ainsi atteindre 1000 masses solaires. Si chaque cœur engendrait une étoile, celle-ci pouvait atteindre 300 masses solaires.

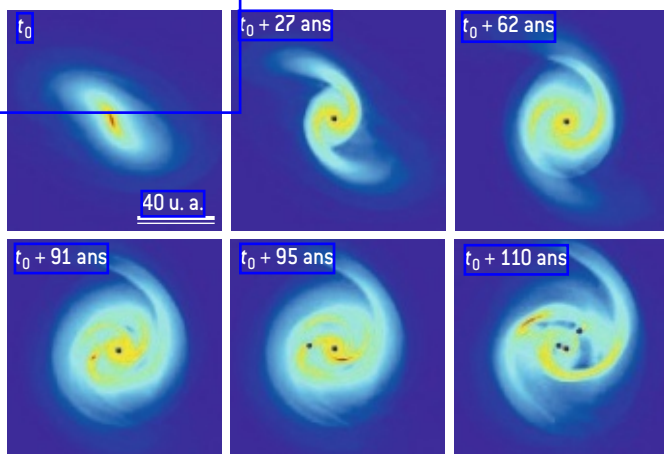
Les nouvelles simulations, d'une résolution inédite, ont per-

mis de suivre l'effondrement de ces cœurs jusqu'à la formation des premières protoétoiles.

Classiquement, un disque d'accrétion se forme ; la matière du nuage de gaz intègre d'abord le disque et, de là, tombe en spirale sur l'étoile. Mais les simulations montrent que dans le cas des premières protoétoiles, le cœur dense alimente le disque d'accrétion bien plus vite que le rythme auquel l'étoile accrete le gaz. Le disque grossit alors de façon excessive et devient gravitationnellement instable, au point de se fragmenter. Des protoétoiles se forment ainsi en cascade dans le disque d'accrétion, en se partageant la masse disponible.

→ Ph. R.-G.

P. C. Clark et al., *Science Express*, 3 février 2011



SIMULATION RESEARCH GROUP, UNIVERSITÉ DE HEIDELBERG

Sur cette simulation du disque d'accrétion qui entoure une protoétoile de première génération, on distingue des bras spiraux où la densité de gaz est élevée (densité croissante du bleu vers le rouge). Des effondrements gravitationnels successifs donnent naissance à trois autres protoétoiles (petits carrés noirs) en moins d'un siècle.

Mardi 26 avril 2011 à 18h30
au Palais de la Découverte
Avenue F.-D. Roosevelt • 75008 Paris

Raconte-moi un chercheur

Pour la Science, en partenariat avec le Palais de la Découverte, vous convie, chaque mois, à passer une heure avec un scientifique.

Comment est-il devenu chercheur ? Quelles sont les différentes facettes de son métier ? En quoi consiste son travail au quotidien ?

En vous faisant partager leur expérience et en rendant leur métier plus concret, ces chercheurs ont une ambition : vous communiquer leur passion pour la science !

Invitée

Laure Saint-Raymond

Laure Saint-Raymond, mathématicienne, est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et responsable de la Formation interuniversitaire de mathématiques fondamentales et appliquées (FIMFA) à l'École normale supérieure, à Paris. Elle consacre ses travaux à des problèmes mathématiques liés à la mécanique des fluides et à la physique des plasmas.

Palais de la Découverte **SCIENCE**

Des spécialistes du globe et des Andes ont noté d'énormes froids sur une planète qu'ils ont vue minée. Ils ont constaté l'absence de volutes volcaniques au niveau de l'abîme qui en perce la croûte tapée par des sortes de traits oblongs à l'endroit précis où les failles baissent et les côtes s'écroulent. Pour ce faire, les chercheurs ont simulé par des comptes précis, puis mesuré grâce à d'énormes radars les sections de ces « objets troueurs ».



En analysant l'écho usé de radars trouvés derrière d'antiques paillasses et qui captaient encore des bips émergeant de la croûte, des doctorants japonais ont déniché plusieurs gros impacts sur la croûte, qu'ils ont pu dater sur le tard, plus étendus que ceux mis en évidence par leurs directeurs de thèse qui se battaient : ils se sont avérés à moitié fêlés par la dilatation.

Ces jeunes Nippons ont ainsi mis en évidence d'encore plus considérables froids, prouvant une fois de plus qu'un jeune chercheur est bonifié par la thèse.

Maël Jortin

Maël Jortin a proposé ici 21 contrepéties – y compris le titre – et, le 1^{er} avril, vous trouverez quelques indices sur notre site.

www.pourlascience.fr



L'os étudié est le quatrième métatarsien, l'un des os longs du pied (ci-dessus en position dans un pied d'homme moderne).

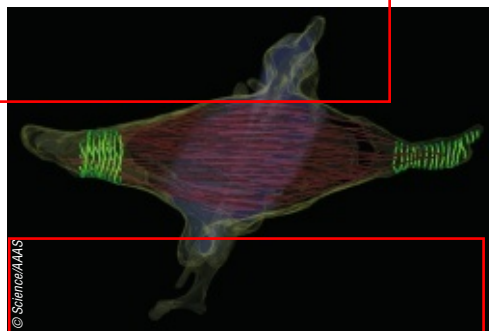
Biologie cellulaire

Comment les cellules coupent le cordon

Lors de la division d'une cellule, les constituants des deux futures cellules filles sont d'abord fabriqués, puis répartis de part et d'autre du cytoplasme, avant qu'une scission s'amorce et conduise à l'individualisation des deux cellules. L'une des dernières étapes est l'abscission, lorsque l'étréot tube qui relie encore les deux cellules filles se rompt. Les travaux de Julien Guizetti, de l'Institut polytechnique de Zurich, en Suisse, et ses collègues éclairent les mécanismes et les acteurs de ce phénomène.

Les chercheurs ont étudié des cellules humaines à l'aide de diverses techniques d'imagerie (microscopie à fluorescence, tomographie...). Ils ont constaté que le pont qui relie les deux cellules filles est rempli d'un faisceau de microtubules, des fibres protéiques qui participent au transport d'éléments à l'intérieur de la cellule. Les biologistes ont également identifié des filaments, protéiques eux aussi, de 17 nanomètres de diamètre, agencés en hélice.

Lors de l'abscission, ces fibres hélicoïdales s'installent aux deux extrémités du pont ; elles forment des collets qui se resserrent peu à peu, par un effet de constriction, à mesure que des microtubules sont éliminés par des enzymes. Enfin, l'une des cellules se détache, puis l'autre quelques minutes plus tard, laissant entre les deux un petit corps intermédiaire, qui s'évanouit rapidement, dégradé dans le milieu extracellulaire.



Reconstruction tridimensionnelle du pont cellulaire peu avant la séparation des deux cellules issues de la division d'une cellule mère : on distingue les microtubules (en rouge) et les deux collets de fibres hélicoïdales (en vert). La partie située entre ces derniers formera un corps intermédiaire voué à disparaître après la division cellulaire.

Les chercheurs ont en outre montré que des protéines nommées ESCRT-III sont nécessaires à l'assemblage des filaments hélicoïdaux. Ces protéines sont connues pour participer à la déformation des membranes lors de la production de vésicules (des endosomes).

→ L. M.

J. Guizetti et al., Science, prépublication en ligne, 2011

Paléontologie humaine

Lucy avait le pied arqué

Lucy, l'australopithèque femelle découverte en 1974 en Éthiopie, allait debout, mais pouvait-elle courir ? Jusqu'à présent, comme on n'avait pas retrouvé d'os fossiles du pied, on ne pouvait pas savoir si *Australopithecus afarensis*, hominidé qui a vécu entre 3,7 et 2,9 millions d'années, était, comme nous, capable de marcher ou de courir sur de grandes distances. L'analyse d'un os de pied d'australopithèque suggère aujourd'hui que les congénères de Lucy avaient un pied arqué comparable au nôtre, et donc adapté à la course.

Autour de Carol Ward, de l'Université du Missouri aux

États-Unis, une équipe vient d'étudier en détail le quatrième métatarsien (os situé entre le tarse et les phalanges du pied) d'un australopithèque particulièrement bien conservé qui, comme Lucy, a été trouvé récemment sur le site de Hadar en Éthiopie. Les chercheurs ont établi que les deux extrémités de cet os, vieux de 3,2 millions d'années, sont reliées par un arc osseux, dont la pente devient relativement grande vers l'orteil. Nombre des caractéristiques de ce métatarsien sont par ailleurs les mêmes que chez l'homme moderne.

Ces observations suggèrent que les australopithèques avaient

un pied arqué et suffisamment raide pour, d'une part, amortir les chocs et, d'autre part, emmagasiner de l'énergie dans la plante du pied lors de chaque poussée au sol.

Ainsi, la transition d'un mode de vie arboricole vers une station debout au sol, qui incluait la course et une exploitation de l'environnement à plus grande échelle, semble avoir été déjà accomplie il y a environ 3,7 millions d'années. Elle constitue l'une des grandes étapes de l'hominisation, la course étant nécessaire à la transformation des charognards-cueilleurs en chasseurs-cueilleurs.

→ François Savatier

Science, vol. 331, pp. 750-753, 2011

Biologie moléculaire

L'invasion du méningocoque

Dans 20 à 25 pour cent des cas, les méningites – des infections des méninges qui entourent le cerveau – sont dues à une bactérie spécifique à l'homme, le méningocoque. Or cette bactérie est présente dans la gorge de 10 à 30 pour cent des individus, mais sous forme non pathogène : elle ne passe pas dans le sang et n'atteint pas le cerveau. Dès lors, comment devient-elle dangereuse ? L'équipe INSERM 970 de Guillaume Duménil, à l'Université Paris Descartes, l'a découvert.

Neisseria meningitidis, le méningocoque, porte des excroissances, nommées pili, qui lui permettent d'adhérer aux parois de la gorge,

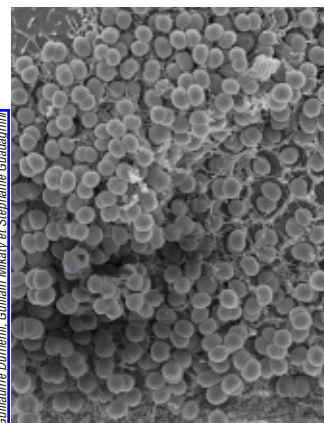
de se multiplier, puis de former des agrégats. Quand ces agrégats se fragmentent, des méningocoques s'échappent et pénètrent dans les capillaires des parois de la gorge. Pourquoi les agrégats de bactéries se défont-ils ? Une protéine, la piline, est le principal constituant des pili. Or elle peut fixer différents groupes chimiques : des phosphocholines, des phosphoéthanolamines et des phosphoglycérols. En étudiant la composition chimique de la piline par spectroscopie de masse selon le stade de développement des méningocoques, les biologistes français ont montré que la présence de phosphoglycérols déclenche la dissé-

mination de la bactérie : quand ces groupes chimiques se fixent à la piline, ses propriétés changent, et la bactérie perd alors la capacité de former des agrégats dans la gorge et se répand.

En outre, G. Duménil et ses collègues ont identifié le gène de la bactérie, *pptB*, qui commande l'ajout des phosphoglycérols sur la piline. Une surexpression de ce gène, lorsque les bactéries adhèrent aux cellules de la gorge, provoque leur dissémination. Reste à savoir pourquoi ce gène ne s'emballe que dans certains cas.

→ **Bénédicte Salthun-Lassalle**

Julia Chamot-Rooke et al., *Science*, vol. 331, pp. 778-782, 11 février 2011



Des centaines de méningocoques, vus en microscopie électronique, forment ici un agrégat qui adhère à la paroi de la gorge.



www.pourlascience.fr

**Restez en contact
avec l'actualité scientifique.**

Retrouvez *Pour la Science* partout sur le web :



Rejoignez-nous sur Facebook

<http://bit.ly/pls-facebook>



Suivez-nous sur Twitter

<http://twitter.com/PourlaScience>



Abonnez-vous à nos flux RSS

<http://bit.ly/pls-rss>



Recevez nos lettres d'information

<http://bit.ly/pls-newsletters>



Visitez notre site Internet

<http://www.pourlascience.fr>

Botanique

La graine qui était un clone

La plupart des plantes à graines se reproduisent par fécondation sexuée : un gamète mâle, portant la moitié des chromosomes du plant mâle, féconde un gamète femelle renfermant aussi la moitié des chromosomes du plant femelle. La graine qui en résulte porte donc un mélange des caractères des deux plants parents. Mais Raphaël Mercier, de l'INRA à Versailles, et ses collègues français, indiens et américains ont réussi à produire des graines-clones portant l'intégralité des chromosomes d'un seul des plants parents.

Pour ce faire, les chercheurs ont croisé deux types de mutants de la plante modèle des généticiens, l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*). L'un de ces mutants produit des gamètes clonaux renfermant tous les chromosomes du plant mère. L'autre mutant fabrique des gamètes capables d'éliminer leurs propres chromosomes après fécondation. Quand on croise ces deux mutants, 34 pour cent des graines obtenues ne portent que les chromosomes du premier mutant. Les plantes filles sont donc identiques à la plante mère dont on veut propager les caractères.

→ B. S.-L.

M. P. A. Marimuthu et al., *Science*, vol. 331, p. 876, 18 février 2011

Plants d'arabettes des dames.

S. M. M. M.

Psychologie

Peut-on calculer sans mots ?

Cette question est soulevée par les Mundurucú, peuple d'Amazonie qui ne compte pas au-delà de cinq. Pour y répondre, des psychologues de Chicago et de Harvard, aux États-Unis, ont étudié le rapport au nombre de Nicaraguayens sourds qui vivent dans une culture utilisant la numération, notamment dans les échanges monétaires, mais qui pratiquent un code gestuel rudimentaire propre à eux. Ces individus reconnaissent la valeur relative des billets de banque, mais ils ne savent pas représenter les nombres supérieurs à trois, ni rassembler un nombre donné d'objets (plus de trois), quand on le leur demande.

Ces travaux montrent qu'il ne suffit pas d'être en contact avec un système d'échange monétaire pour développer une représentation des nombres, suite croissante d'éléments ; le langage jouerait un rôle déterminant dans l'adoption ou non de cette représentation.

Pour Pierre Pica, linguiste au CNRS, ce résultat soulève surtout une autre question : pourquoi ces individus – et les Mundurucú – n'intègrent-ils pas la numération dans leur gestuelle, alors qu'ils auraient la capacité de le faire (certains de leurs compatriotes sourds le font) ?

→ Marie-Neige Cordonnier

E. Spaepen et al., *PNAS*, vol. 108, n° 8, pp. 3163-3168, 2011

Chimie

L'argile, berceau de la vie ?

Comment les premières cellules sont-elles apparues dans la nature ? Des physiciens de Harvard, Brandeis et Princeton, aux États-Unis, ont peut-être trouvé un élément de réponse. Ils ont mis au point des conditions physico-chimiques simples dans lesquelles des molécules de montmorillonite, une argile qui s'organise en feuillets, s'agencent pour former des vésicules micrométriques robustes et semi-perméables. Ces vésicules ont pu servir de niche protectrice aux premières réactions chimiques qui ont donné les molécules de la vie.

Les chercheurs ont utilisé des conditions simples qui pourraient se produire dans la nature : ils ont écrasé une goutte d'une suspension de feuillets de montmorillonite dans de l'eau qu'ils ont placée entre deux lamelles. Ils ont ensuite fait glisser les lamelles l'une sur l'autre. Sous l'effet de ce mouvement, les feuillets d'argile s'assemblent autour des bulles d'air piégées dans le liquide lors de la manipulation. Lorsqu'on remplace l'eau par de l'éthanol ou du méthanol, qui mouillent mieux l'argile que l'eau, le liquide s'infiltre dans la coquille de montmorillonite ainsi formée. L'air s'y dissout, laissant une vésicule d'argile résistante et stable remplie de liquide.

Quand les chercheurs ont ajouté à la préparation des acides gras, ils ont constaté qu'ils pénétraient dans les vésicules et s'y

assemblent en compartiments – des liposomes –, qui y restent confinés. La formation spontanée de liposomes dans ces vésicules suggère que des compartiments similaires ont pu se constituer au sein de telles vésicules dans la nature. Or une cellule n'est autre qu'un liposome dont la membrane est parsemée de protéines et qui contient toute la machinerie biologique nécessaire à sa survie. Les premiers ancêtres des cellules étaient probablement des liposomes, qui se seraient peu à peu enrichis de diverses molécules.

Encore fallait-il pour cela un environnement assez stable pour permettre ces interactions. Des vésicules d'argile pourraient avoir offert ce cadre, d'autant que la montmorillonite est connue pour son rôle catalyseur dans la formation de biostructures, telles que les membranes constituées de lipides, ou les brins d'ARN formés de nucléotides – les « briques » de l'ADN et de l'ARN.

Pour tester leur scénario, les physiciens étudient la formation d'autres types de liposomes dans leurs vésicules d'argile. Quant à trouver de telles structures dans la nature, autant chercher une aiguille dans une botte de foin. Qui sait ? Les carrières de montmorillonite de Montmorillon, dans la Vienne, qui ont donné leur nom à l'argile, recèlent peut-être le secret de la vie.

→ M.-N. C.

A. Subramaniam et al., *Soft Matter*, doi: 10.1039/c0sm01354d, 2011

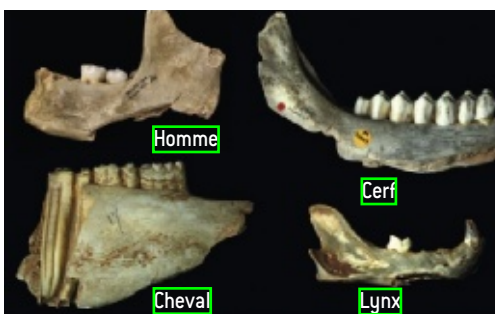
Des liposomes se sont formés dans une vésicule de montmorillonite. Trop gros pour ressortir, ils restent piégés dans la vésicule où ils s'organisent.

En vidéo sur www.pourlascience.fr

Paléanthropologie

Le cannibalisme nutritionnel de Gough's Cave

La découverte de trois crânes façonnés pour en faire des coupes à boire révèle, d'une part, la maîtrise de leurs artisans, et, d'autre part, des pratiques cannibales.



Trois crânes humains transformés en coupes à boire (en haut, l'un d'eux) et datant de quelque 15 000 ans ont été découverts en Grande-Bretagne. La façon dont les os des mâchoires ont été travaillés (en bas) indique que les techniques de dépeçage des animaux ont été appliquées à l'homme.

Ils scient le crâne au-dessous des sourcils, et le nettoient. Les pauvres se contentent de le revêtir par dehors d'un morceau de cuir de bœuf, sans apprêt; les riches non seulement le couvrent d'un morceau de peau de bœuf, mais ils le dorent aussi en dedans, et s'en servent, tant les pauvres que les riches, comme d'une coupe à boire.
Hérodote, Histoire, Livre 4, LXV

C'était une coutume chez les Gaulois, mais aussi les Scythes, les Mongols, les anciens Polynésiens, les Amérindiens, les Chinois et les Indiens de l'Antiquité... L'art de transformer les têtes des ennemis en coupes à boire a été pratiqué partout. Une équipe de l'Institut d'archéologie de Londres vient de révéler comment les invités d'un repas cannibale le pratiquaient déjà il y a 15 000 ans en Angleterre.

Les chercheurs ont étudié sous toutes les sutures des ossements humains retrouvés mêlés à ceux d'animaux dans la grotte de Gough (Gough's Cave) dans le Somerset. Découverts entre 1929 et 1987, ces os comprennent notamment ceux d'un enfant de trois ans, de deux adolescents et de deux jeunes adultes. Ils datent d'environ 14 700 ans, comme l'a révélé le carbone 14, c'est-à-dire du tout début de la reconquête, par des hommes modernes de culture magdalénienne (il y a 17 000 à 10 000 ans), de la péninsule Européenne que formaient alors les futures îles britanniques.

En ces temps de déglaciation rapide, un groupe de chasseurs avait manifeste-

ment installé sa boucherie à l'abri des frimas dans la grotte de Gough. La paléontologue Silvia Bello a constaté qu'ils y dépeçaient les carcasses humaines avec les mêmes outils en silex et la même dextérité que les carcasses animales. La méticulosité avec laquelle, par exemple, ils brisaient le bas de la mandibule pour en sucer la moelle, atteste de l'importance de tout exploiter. Le traitement des crânes illustre aussi cette habileté: après avoir découpé la langue et les muscles hyoïdiens et enlevé la mandibule, les chasseurs détaient la face; ensuite, après le scalp de la tête, ils éliminaient le cerveau (pour le consommer?) et égalisaient les bords du crâne sur une enclume à l'aide d'un outil. Trois coupes à boire ainsi obtenues ont été retrouvées à Gough.

D'autres coupes similaires avaient déjà été découvertes dans les grottes magdaléniennes d'Isturitz dans le Pays basque et du Placard en Charente. C'est cependant la première fois que de tels objets sont trouvés dans un contexte clairement cannibale. D'après Bruno Boulestin, du Laboratoire d'anthropologie des populations passées et présentes de l'Université de Bordeaux 1, ces coupes ont pu représenter une sorte de trophée pris à l'ennemi, comme ce fut le cas plus tard chez les Scythes ou les Gaulois. Ainsi, nos ancêtres chassaient l'homme, et le consommaient, car ils lui prêtaient une valeur nutritive. Et symbolique aussi sans doute.

→ F.S.

S. Bello et al., PLoS One, vol. 6(2), 2011

DERNIÈRE minute ...

SOUS LES CALOTTES ANTARCTIQUES

Intrigués par les curieuses images radar de la calotte glaciaire de l'Est de l'Antarctique, des glaciologues de l'Université Columbia viennent de montrer qu'elle croît par le bas. Sous l'effet de l'énorme pression qui règne à sa base et de la chaleur produite par son frottement sur le socle rocheux, la glace fond, ce qui produit de l'eau et lubrifie son déplacement. Toutefois, cette eau s'accumule quand elle rencontre un obs-

tacle, et est susceptible de regeler, ce qui déforme la calotte. Environ 24 pour cent de l'énorme masse que l'on nomme le Dôme A résulteraient de ce mécanisme.

PLASTIQUE ÉLECTROPERFORÉ

Les gaines plastiques qui enrobent les fils électriques peuvent s'abîmer avec le courant. Trois physiciens de l'Université Duke ont étudié l'instabilité responsable du phénomène. Lorsque le

champ électrique atteint une certaine intensité, qui dépend du matériau, une multitude de petits plis naissent sur une feuille de plastique initialement plane et collée à un support. Quand le champ augmente encore, la taille des plis et leur densité augmentent, puis des trous se forment.



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

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

soit **4 € seulement par numéro** au lieu de 5,20 €

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
dès leur parution.



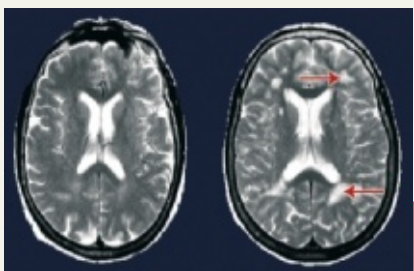
Oui, je m'abonne
à *Pour la Science* 100 % numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

Je préfère découvrir toutes
les offres d'abonnement disponibles
en cliquant ici.

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ MIGRAINES SANS SÉQUELLE

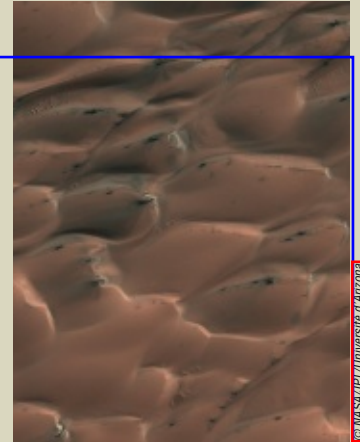
Les migraines sont des maux de tête douloureux présentant plusieurs caractéristiques – une évolution par crises durant quelques heures le plus souvent, une douleur intense accompagnée de nausées et une sensibilité à la lumière et au bruit. Ces phases n'existent pas chez tous les migraineux et les causes et les mécanismes de la migraine restent encore inconnus (voir *Le cerveau migraineux*, *Pour la Science*, décembre 2008, <http://bit.ly/plsoer374>). Toutefois, Tobias Kurth, de l'Unité Inserm Neuroépidémiologie, et ses collègues annoncent que les migraines, ainsi que les maux de tête importants et à répétition, n'augmentent pas le risque de déclin cognitif. En effet, on sait que le cerveau des migraineux présente davantage de lésions des microvaisseaux cérébraux (mais on ignore pourquoi) ; or ces lésions seraient associées à une détérioration cognitive, à un risque plus important de maladie d'Alzheimer ou d'accident vasculaire cérébral. Les chercheurs ont étudié pendant dix ans plus de 800 personnes âgées de plus de 65 ans, en réalisant des tests de cognition et des IRM cérébrales. Vingt et un pour cent des participants souffraient de céphalées importantes (pour 70 pour cent d'entre eux, il s'agissait de migraines), mais les résultats des tests cognitifs étaient identiques avec ou sans les maux de tête (*British Medical Journal*, janvier 2011). Si les migraineux avaient en effet deux fois plus de risque de souffrir de lésions cérébrales, leur mémoire et leur capacité d'apprentissage n'étaient pas davantage altérées.



En imagerie par résonance magnétique, différentes lésions sont visibles (flèches) dans le cerveau d'une personne souffrant régulièrement de céphalées (à droite), comparé à une personne n'en ayant jamais (à gauche).

→ LES DUNES DE MARS

Les dunes de Mars se seraient développées au début de l'histoire de la planète (il y a 3,5 milliards d'années). Leur sable est d'origine volcanique et elles sont immobilisées par le givre une bonne partie de l'année, surtout aux pôles. À cause notamment de l'inefficacité des vents martiens, les dunes de Mars évoluent aujourd'hui très lentement dans un climat glacial et aride, au point que certains scientifiques pensent qu'elles sont figées depuis leur apparition (voir *Mars, des dunes insolites*, *Pour la Science*, décembre 2008, http://bit.ly/plsoer374_2). Candice Hansen, de l'Institut des sciences planétaires à Tucson aux États-Unis, et ses collègues ont analysé pendant deux ans les nouvelles images de la sonde spatiale *Mars Reconnaissance Orbiter*. Ils ont montré qu'un phénomène absent sur Terre participe au remodelage, à la diversité et à la particularité des formes observées des dunes : elles subissent une remobilisation saisonnière du sable à leur surface (*Science*, février 2011). En effet, au cours de l'hiver martien, les dunes sont couvertes d'une couche de dioxyde de carbone gelé. Au printemps, ce dioxyde de carbone se sublime, favorisant alors l'érosion des dunes et les avalanches de sable.



Les dunes de Mars sont recouvertes d'une couche gelée de dioxyde de carbone ; quand ce dernier se sublime au printemps, il favorise les avalanches de sable.

→ LE CYCLE DU MERCURE DÉPEND DE LA BANQUISE... ET DU CLIMAT

Le mercure est un élément toxique, volatil et peu soluble, de sorte que des vapeurs de mercure stagnent dans l'atmosphère et diffusent tout autour du globe. Les émissions anthropiques de mercure (issues de la combustion de matières fossiles) ont dépassé les émissions naturelles (provenant des océans et du dégazage des volcans) et atteignent les régions polaires sous l'effet des courants atmosphériques. Le mercure s'oxyde alors et se dépose dans la neige et la glace, d'où il est libéré à la fonte des glaces sous forme d'une substance toxique, le méthylmercure, qui s'accumule dans les organismes vivants le long de la chaîne alimentaire (voir *Du mercure aux pôles*, *Pour la Science*, août 2004, <http://bit.ly/plsoer322>).

Depuis une vingtaine d'années, les programmes de surveillance des concentra-

tions en mercure et méthylmercure dans les régions arctiques montrent des variations géographiques et temporelles complexes. Une collaboration franco-américaine a montré que le climat influe sur le cycle du mercure (*Nature Geoscience*, février 2011). Les scientifiques ont étudié les œufs de guillemots (des oiseaux marins) récupérés dans différentes régions arctiques. Ces oiseaux se trouvent en haut de la chaîne alimentaire et représentent de bonnes espèces sentinelles pour étudier la pollution au mercure dans les écosystèmes marins ; la quantité de mercure dans leurs œufs reflète celle du métal sur le site du prélèvement à un instant donné. Les scientifiques ont montré que ces variations sont dues à la présence ou à l'absence de banquise près du lieu de ponte : la banquise empêche la dégradation du méthylmercure par le Soleil et limite les échanges de mercure entre l'océan Arctique et l'atmosphère. Ainsi, la fonte de la banquise accentue la libération du polluant dans l'atmosphère.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

Sciences métisses



Festival du livre
scientifique

Les 8, 9 et 10 avril de 10h à 19h

Couvent des Cordeliers - Place du Bourguet
04300 Forcalquier



Biodiversité
Diversité humaine

SCIENCES MÉTISSES

LIVRES EN FESTIVAL
BIODIVERSITÉ ET DIVERSITÉS HUMAINES

15/16/17 AVRIL 2011
Océanopolis Brest

Salon du livre, tables rondes,
animations, spectacles, expositions.
Avec le parrainage du Professeur Axel KHAN



Océanopolis
Brest

graphisme - Emmanuelle Prigent / www.labelgraphique.fr



L'ASTS Nord Pas de Calais présente
Le festival Sciences Métisses

Exposition **Autour du livre**
Ateliers **de vulgarisation scientifique**

Conférences

Rencontres

Animations

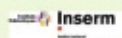
1/2/3 avril 2011

14h30 - 19h30

Entrée libre

www.sciences-metisses.org

Au Forum
départemental des
Sciences
Villeneuve d'Ascq (Nord)



POINT DE VUE

Moins d'antibiotiques : chez l'animal aussi !

Pour préserver l'efficacité des antibiotiques, il faut en réduire la consommation chez l'homme, mais aussi chez l'animal. L'usage en médecine vétérinaire reste excessif.

Antoine ANDREMONT

La campagne « Les antibiotiques : c'est pas automatique » a eu deux conséquences : la diminution de la consommation de ces médicaments et la prise de conscience

de la fin des « produits miracles ». Le temps des pionniers de l'histoire des antibiotiques, dans les années 1940 et 1950, est bien loin. Pendant les 30 années qui ont suivi leur découverte – années d'emballement collectif –, les limites du raisonnable ont été franchies. La consommation d'antibiotiques n'a cessé de croître, notamment dans notre pays, sans que les indications ne soient toujours justifiées. Seuls le dynamisme et l'ingéniosité de l'industrie pharmaceutique, qui mettait régulièrement sur le marché des nouvelles molécules, ont permis de masquer l'apparition de la résistance des bactéries aux antibiotiques. Personne n'a mesuré alors les risques qu'il y avait à ne pas prendre en compte les capacités du vivant à faire face aux situations et aux contraintes nouvelles : une évolution darwinienne accélérée de la résistance se déroulait sous nos yeux, mais personne ne voulait la voir.

Puis, au début des années 1980, la découverte et la mise sur le marché de nouveaux antibiotiques ayant cessé, l'avance que nous avions prise sur les bactéries s'est réduite. L'époque de la maîtrise des infections bactériennes par les antibiotiques touchait à sa fin. Aujourd'hui, des bactéries résistant à tous les antibiotiques disponibles apparaissent, sans doute quelques dizaines par an en France encore seulement, mais on

ignore comment évoluera ce nombre. Nous sommes entrés dans une période d'incertitude. Les antibiotiques sont devenus une ressource limitée qu'il faut préserver. Un usage raisonné et parcimonieux s'impose.

Depuis une dizaine d'années, un plan national visant à préserver l'efficacité des antibiotiques a été mis en place en médecine humaine. Son efficacité est avérée : selon la Direction générale de la santé, la consommation d'antibiotiques a diminué de près de 15 pour cent entre 2002 et 2009, avec 40 millions de prescriptions inutiles évitées depuis le début des actions, soit

UNE ÉVOLUTION DARWINIENNE accélérée de la résistance se déroulait sous nos yeux, mais personne ne voulait la voir.

l'équivalent d'un hiver de prescriptions. Le recul le plus fort touche les enfants : on a enregistré une diminution de 31 pour cent pour les enfants de moins de cinq ans, et de 36 pour cent pour les 6-15 ans. Dans le même temps, la fréquence des pneumocoques peu sensibles à la pénicilline a diminué [ils représentaient 53 pour cent des souches en 2001 contre 32 pour cent en 2008]. Néanmoins, après des années de baisse, on constate une reprise de la consommation depuis deux ans. Les actions de sensibilisation aux risques d'une surconsommation doivent se poursuivre.

Toutefois, quelle que soit son efficacité, un plan pour le contrôle de la consom-

mation des antibiotiques chez l'homme ne suffira pas, car les humains ne sont pas les seuls gros consommateurs : plus de la moitié des antibiotiques utilisés en France le sont par les animaux. Or si les bactéries responsables des maladies chez l'homme et chez l'animal diffèrent généralement, les familles d'antibiotiques utilisés par les médecins, d'une part, et les vétérinaires, éleveurs et agriculteurs, d'autre part, sont les mêmes.

Les antibiotiques favorisent la survie et la prolifération de bactéries résistantes et, par conséquent, la multiplication des gènes de résistance. L'homme et l'animal étant traités avec les mêmes familles d'antibiotiques, les gènes de résistance qu'ils sélectionnent sont les mêmes. Or les gènes – notamment les gènes de résistance – se transmettent d'une population bactérienne à une autre, qu'elle soit humaine ou animale, pathogène ou non, et les conditions actuelles de mondialisation de l'élevage et de distribution des produits facilitent ces échanges. De surcroît, les animaux domestiques vivent à proximité des humains et peuvent échanger bactéries et gènes de résistance. L'antibiothérapie vétérinaire et d'élevage a une influence notable sur la résistance des bactéries humaines. Ainsi, les principales organisations mondiales de santé humaine et animale, ainsi que d'agriculture, cherchent à faire adopter une liste d'antibiotiques dont l'utilisation chez les animaux devrait être proscrite afin d'en préserver l'efficacité chez l'homme.

Or, dans ces conditions, c'est tout un secteur qui sera confronté à de graves difficultés économiques. Si les éleveurs utilisent moins d'antibiotiques, les risques d'épidémies se multiplieront, entraînant des pertes parmi les animaux malades, et les autres acteurs de la filière seront également touchés : les producteurs d'antibiotiques, et les vétérinaires, souvent à la fois prescripteurs et distributeurs. Un pan entier d'un secteur important de l'économie nationale devra trouver un nouvel équilibre pour conserver sa compétitivité.

Et pourtant, avons-nous le choix ? Les antibiotiques doivent rester des médicaments actifs pour soigner les infections bactériennes des hommes, au risque de voir réapparaître d'anciens fléaux. Devant cette réalité, l'utilisation des antibiotiques chez l'animal, pour importante qu'elle soit éco-

nomiquement, devient secondaire, sauf à la repenser. C'est la tâche à laquelle se consacre, en France, le nouveau Comité national de coordination pour un usage raisonné des antibiotiques en médecine vétérinaire, en concertation avec les autres agences européennes du médicament animal.

Plusieurs pistes sont envisagées, par exemple mieux surveiller l'apparition et l'évolution des bactéries résistantes et mieux utiliser les antibiotiques actuels ; en un mot, traiter aussi bien en consommant moins. Aujourd'hui, lors d'un épisode infectieux, tout le troupeau reçoit la même dose. Or diverses équipes, dont celle d'Alain Bousquet-Mélou, de l'École nationale vétérinaire de Toulouse, ont montré que la dose administrée et le moment où l'on intervient sont déterminants : un animal traité très tôt a besoin de moins d'antibiotiques. On pourrait ainsi apprendre

à ajuster les doses administrées en fonction du stade de la maladie, par une détection plus précoce des animaux infectés. En l'absence de recherches visant à découvrir de nouveaux antibiotiques, on est face à un défi : préserver l'efficacité de molécules qui ont permis à l'homme de s'affranchir des épidémies qui ont jalonné son histoire, mais contre lesquelles les bactéries résistent tous les jours un peu mieux. ■

Antoine ANDREMONT est microbiologiste à la Faculté de médecine de l'Université Paris-Diderot.

A. Andremont et M. Tibon-Cornillot, *Le triomphe des bactéries : la fin des antibiotiques ?*, Max Milo, 2006.

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

ÉCONOMIE

Le pouvoir, c'est la nudité du roi...

... dont le peuple n'ose affirmer qu'il n'a pas (ou plus) l'étoffe d'un chef d'État.

Ivar EKELAND

À l'heure où j'écris, Ben Ali et Moubarak ont perdu le pouvoir, et celui de Kadhafi ne tient qu'à un fil. Mais qu'est-ce que le pouvoir ? Est-ce vraiment un objet que l'on puisse perdre, comme une paire de clefs qui glisse de votre poche quand vous vous levez, ou une épée qui se détache du plafond au moment où l'on ne regarde pas ?

On sait par exemple que le pouvoir du roi de Suède est matérialisé par un sceptre d'or, dit hérité de son ancêtre Ottokar, qu'il doit présenter au peuple tous les ans lors de la fête nationale. Le vol du sceptre, perpétré en plein jour par d'audacieux conspirateurs, aurait entraîné *ipso facto* la chute de la monarchie et la prise du pouvoir par les

mécréants si Tintin n'était pas parvenu à le récupérer *in extremis*. Mais hors des aventures de Tintin, les bijoux de la Couronne n'ont



jamais une telle importance, et la Marque Jaune, par exemple, peut dévaliser la Tour de Londres sans que la monarchie britannique ne vacille sur ses fondements.

Je trouve beaucoup plus éclairant le conte d'Andersen sur les habits de l'empereur. Celui-ci est nu, mais on a annoncé à son de trompe qu'il était vêtu d'habits magnifiques, ouverts à l'admiration de tous les bons patriotes et honnêtes gens, mais invisibles aux traîtres et à tous ceux qui ont quelque chose à se reprocher. Chacun donc, soucieux de ne pas se singulariser, se joint au concert de louanges sur la beauté de ces vêtements, et l'empereur lui-même, convaincu par l'admiration générale, se croit propriétaire du plus bel habit du monde.

C'est un bel exemple de ce que les économistes appellent un équilibre. L'habit n'existe pas en tant qu'objet matériel, c'est une pure convention, un contrat moral entre plusieurs personnes. Chacun le respecte, car le dénoncer, c'est se dénoncer soi-même comme traître et mauvais citoyen : on peut le pardonner à un enfant, qui ne sait pas ce qu'il dit, mais un adulte s'exposerait à l'opprobre public et aux enquêtes de moralité, sinon pas. La situation ainsi créée est donc stable : le nouvel habit de l'empereur n'est pas seulement magnifique, il est facile d'entretien, inusable, intouchable, indéchirable, impendable. Elle durera tant que les déviants ne s'avoueront pas mutuellement leurs opinions, et ne se regrouperont pas pour proclamer ensemble que l'empereur est nu. S'ils sont suffisamment nombreux, ils entraîneront d'autres, et la société basculera vers un nouvel équilibre.

Lequel ? Question délicate, car si les équilibres sont stables, ils sont aussi arbitraires.

Si l'on dit à Untel d'aller se rhabiller, sur qui se portera l'admiration aveugle des foules ? La théorie est muette sur ce point. Elle dit quand il existe un équilibre (c'est le fameux théorème de John Nash, qui lui a valu un prix Nobel d'économie 50 ans plus tard) et quand il en existe plusieurs, mais elle ne dit pas comment l'on en choisit un, ou comment on passe de l'un à l'autre. Sur ce chapitre, elle n'enseigne que quelques évidences. Le point essentiel est que la multiplicité est un facteur d'instabilité : plus il y a d'équilibres possibles, plus il sera difficile d'en choisir un. Pour lever cette indétermination, pour se coordonner sur l'un d'eux, les acteurs feront en général intervenir des facteurs mineurs, qui au premier abord sembleraient étrangers au problème. Dans l'euphorie de la victoire, on couronnera Untel plutôt que Telautre, non parce qu'il a plus de qualités pour faire un empereur, mais parce qu'un de ses partisans a été le premier à crier « Vive Untel ! Vive l'empereur ! ».

Le pouvoir, c'est l'illusion du pouvoir. Les gens obéissent parce qu'ils croient que les autres vont obéir. Tous ces manifestants qui ont occupé les places publiques pendant des semaines, au péril de leur vie, n'ont pas attendu 40 ans pour se faire une opinion sur leurs dirigeants. Mais il a fallu 40 ans pour qu'ils sachent que les autres pensaient comme eux, et qu'ils étaient prêts à descendre dans la rue pour le dire. On sait en physique que les changements d'états sont difficilement calculables.

Ces prises de conscience n'auraient peut-être pas été possibles sans les nouveaux moyens de communication, comme Facebook ou Twitter, car les médias traditionnels sont sous le contrôle des pouvoirs économiques et politiques. L'équilibre ancien est détruit. Quel sera le nouveau ? Il est trop tôt pour le dire, mais on peut déjà saluer l'émergence d'une nouvelle forme de démocratie.

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Comment gérer la grande faune sauvage ?

Scientifiques, éleveurs, écologistes et politiques doivent apprendre à dialoguer.

Isabelle MAUZ, Céline GRANJOU, Antoine DORÉ et Coralie MOUNET

La nature est souvent tenue pour immuable. Et pourtant, elle change parfois vite. En France, par exemple, les animaux sauvages ne sont plus les mêmes qu'il y a seulement 20 ans, que l'on considère leur diversité, leur nombre, leur localisation et jusqu'à leur comportement et leur aspect. La petite faune s'est raréfiée, tandis que la diversité, l'abondance et les territoires des grands animaux ont augmenté – à l'exception de l'ours, dont les effectifs, déjà faibles au milieu du XX^e siècle, ont continué de diminuer.

Moins de perdrix, de hérissons, de libellules, de grenouilles, d'escargots et de

couleuvres, mais plus de cerfs, de chevreuils et de sangliers, et un retour dans certaines régions des lynx et des loups. Ainsi, environ 500 000 sangliers et chevreuils et 50 000 cerfs ont été tués au cours de la saison de chasse 2009-2010, soit une forte augmentation en dix ans. Et l'un des indicateurs de la population de loups en France, « l'effectif minimum retenu », indique qu'il y en avait environ 70 en 2009-2010, dans le Sud-Est du pays.

Notre monde urbanisé, appauvri en biodiversité, s'est donc paradoxalement ensauvagé. La présence du loup, du lynx et de l'ours, qui attaquent le bétail, se révèle pério-

diquement conflictuelle, tandis que d'autres espèces défrayent moins la chronique, à l'exemple du cormoran, accusé de dépeupler les étangs. Ces conflits opposent hommes et animaux, en raison de ces déprédations et de la concurrence qu'ils se livrent pour l'espace et le gibier ; ils opposent aussi les hommes entre eux – tels éleveurs et écologistes – quand ils débattent du comportement à adopter à l'égard de la grande faune sauvage.

Alors, peut-on « gérer » la faune sauvage ? Ou plutôt, comment explorer, collectivement, les voies de sa cohabitation avec l'homme ? Pour notre part, nous pen-

sons, avec d'autres chercheurs, qu'il n'y a pas d'un côté des sociétés humaines, de l'autre la nature, mais que les hommes et les animaux sauvages forment, ensemble, des communautés en constante recombinaison, précisément parce que les uns et les autres changent du fait de leurs alliances et de leurs antagonismes.

Instaurer une cohabitation avec les animaux sauvages demande de saisir tous ses enjeux. Ils sont multiples, aussi bien scientifi-

LES ENJEUX SONT MULTIPLES, aussi bien scientifiques, techniques, économiques, sociologiques, juridiques, qu'éthiques.

ques, techniques, économiques, sociologiques, juridiques qu'éthiques. L'arrivée ou l'extension géographique de certaines espèces a stimulé les recherches ainsi que la mise en place de réseaux de suivi des grands prédateurs.

Ainsi, en modélisant l'évolution de la population d'ours en fonction de différents scénarios de gestion, des biomathématiciens ont formulé des recommandations sur le nombre de mâles et de femelles à introduire dans les Pyrénées. Dans le cas du loup, les recommandations des scientifiques portent notamment sur le nombre d'animaux qui peuvent être abattus sans nuire à l'espèce. Mais il reste beaucoup à faire pour saisir la dynamique et le comportement des populations sauvages.

Si les avis scientifiques ne sont pas toujours suivis par les décideurs – le gouvernement a ainsi stoppé le programme de renforcement de l'ours dans les Pyrénées –, l'exploration des relations de l'homme avec les animaux sauvages s'appuie désormais sur des données de plus en plus robustes. D'autres acteurs expérimentent des dispositifs techniques qui pourraient faciliter la résolution des conflits homme-animal. Ainsi, des éleveurs confrontés à la présence de l'ours ou du loup s'adjoignent le concours de chiens de protection, ou testent des parcs de regroupement nocturne.

Améliorer nos relations avec la faune sauvage exige aussi d'explorer les questions économiques. Certains veulent savoir combien coûte, ou rapporte, l'adaptation de leurs pratiques à la présence d'animaux sauvages. Par exemple, quelles pertes directes, par prédation, et indirectes, du fait de mesures de protection limitant l'engraissement des agneaux, la présence de loups occasionne-t-elle à l'élevage des moutons ? Que rapporterait à l'économie locale une valorisation de la faune sauvage par l'écotourisme, par exemple ?

De même, il faut redéfinir le droit pénal et le droit administratif national ou international, et s'interroger sur leurs modalités d'application. Les procès de personnes ayant tué un loup ou un ours sont devenus des lieux de confrontation entre les associations de protection de la nature et les défenseurs de corporations économiques. Le droit apparaît souvent là moins appliqué que négocié, ce qui ne diminue en rien son importance.

Enfin, nos relations avec la faune sauvage ne pourront progresser sans réflexion éthique. Dans les zones où la faune est protégée, il est par exemple nécessaire que les partisans de la « naturalité », réticents à toute forme d'intervention sur la faune, débattent avec les tenants d'une intervention à visée scientifique ou conservatoire.

C'est donc en articulant les différentes questions et explorations touchant aux relations de l'homme et de l'animal, dans le cadre d'institutions démocratiques faisant place à tous les acteurs concernés, que des politiques durables de la faune sauvage et de la nature pourront voir le jour. À cette condition, elles pourront affronter les questions inédites soulevées par l'évolution des relations entre hommes et animaux sauvages, et apporter peut-être des solutions aux conflits, fussent-elles provisoires.

Isabelle MAUZ et Céline GRANJOU sont sociologues, Coralie MOUNET est géographe, et Antoine DORÉ est doctorant dans l'Unité Développement des territoires montagnards du CEMAGREF, à Saint-Martin d'Hères, près de Grenoble.

Gestions durables de la faune sauvage, Natures Sciences Sociétés, vol. 14, Suppl. 1, 2006, www.nss-journal.org



MUSÉUM NATIONAL
D'HISTOIRE NATURELLE

Biodiversité



The Natural History of Santo

edited by
**Philippe Bouchet,
Hervé Le Guyader
& Olivier Pascal**

Les îles du Pacifique sont célèbres pour le très haut niveau d'endémisme et la grande vulnérabilité de leurs faunes et de leurs flores. L'île d'Espirito Santo, ou Santo, cumule les superlatifs : la plus grande et la plus haute du Vanuatu, Santo est un extraordinaire microcosme géographique et culturel, avec récifs, grottes, montagnes, îles et îlots satellites, et une occupation humaine qui remonte à 3000 ans. Renouant avec l'esprit des « Grandes Expéditions Naturalistes », l'expédition Santo 2006 avait mobilisé sur le terrain plus de cent cinquante scientifiques, bénévoles et étudiants de vingt-cinq pays. Petit tour de force éditorial avec plus de 100 auteurs, ce *Natural History of Santo* est un éloge de la biodiversité de cette « île-planète ». À la fois beau livre richement illustré et bilan des connaissances scientifiques, *Natural History of Santo* se veut un outil de connaissance pour sa conservation durable. Il s'adresse autant aux acteurs locaux du développement et de l'éducation qu'aux naturalistes du monde entier.

ISBN: 978-2-85653-627-8 • format 210 x 297 mm
texte en anglais • impression quadrichromie
nombreuses photos • 544 p. • 59 € TTC

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES DU MUSÉUM

Commandes et renseignements :
Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier • 75231 Paris cedex 05
Tél. : 01 40 79 48 05 • Fax : 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr • <http://www.mnhn.fr/pubsci>

VRAI OU FAUX

Le lait est-il une boisson saine ?

Oui, rien ne prouve le contraire. Dans une alimentation équilibrée, le lait est nécessaire au même titre que les autres classes d'aliments.

Jean-Marie BOURRE



© SHUTTERSTOCK

Alors que leur implication dans l'équilibre nutritionnel et la santé est avérée (pour leur apport en calcium, zinc, iode, vitamines et même certains acides gras), les produits laitiers, et surtout le lait, suscitent discussions et controverses, en particulier dans le grand public. Ces attaques sont fondées sur des interprétations erronées ou abusives d'études scientifiques pourtant sérieuses, quand il ne s'agit pas d'affabulations. Leur accorder crédit peut engendrer un véritable problème de santé publique ; d'autant que remplacer le lait par de faux « laits », en général des jus de végétaux, menace la santé, notamment celle des enfants, comme l'ont récemment rappelé le Comité nutrition de la Société française de pédiatrie et les Académies de médecine et d'agriculture. Rétablissons la vérité à la faveur des données scientifiques et médicales.

Deux séries d'arguments, utilisées par les détracteurs, doivent être contrecarrées. La première prétend se fonder sur des données médicales et scientifiques concernant des cancers, le syndrome métabolique (incluant l'hypertension, le diabète, l'obésité, etc.), l'ostéoporose, l'allergie et l'intolérance, ainsi que les acides gras. Ainsi, certaines affirmations lient la consommation de lait et les fractures dues à l'ostéoporose, prenant comme preuve que celles-ci sont légion en France, alors qu'elles seraient exceptionnelles en Papouasie-Nouvelle-Guinée, où la consommation de lait est faible. C'est occulter que, là-bas, l'espérance de vie est réduite (elle ne permet pas à la maladie de se développer), et surtout que les structures de diagnostic et de soins sont rares, empêchant de comp-

tabiliser le nombre de malades. Les mêmes affabulations concernent les Chinois, qui boivent peu de lait, alors que leurs besoins en calcium sont similaires à ceux des Occidentaux. D'ailleurs, les autorités chinoises distribuent maintenant du lait dans les écoles pour éviter les effets délétères d'un déficit en calcium. Les experts prévoient en effet une augmentation considérable du nombre de fractures liées à l'ostéoporose dans le continent asiatique d'ici 2050.

Dans le cadre de la diversité alimentaire, les produits laitiers diminuent le risque de cancers du côlon, voire du sein. Pour le cancer de la prostate, un excès de calcium (plus de 1 500 milligrammes par jour, soit un camembert et demi !) serait néfaste, mais les données sont encore confuses. Le lait ne fait pas maigrir et ne guérit pas le diabète ; en revanche, sa consommation diminue le risque de surpoids, de diabète et d'hypertension.

De bons acides gras

L'intolérance au lactose et l'allergie sont deux phénomènes différents. La première correspond à une hypolactasie, c'est-à-dire une diminution physiologique, au moment de la diversification alimentaire, de l'expression du gène de l'enzyme qui dégrade le lactose, le sucre du lait. Elle peut entraîner des signes de malabsorption quand les quantités de lactose sont importantes ; elle touche environ la moitié des adultes français, mais n'interdit pas une consommation modérée et fractionnée de lait, encore moins de yaourts ou de fromages, qui ne contiennent pas de lactose. L'allergie aux protéines de lait de vache met en jeu un mécanisme immunologique ;

elle touche deux à trois pour cent des jeunes enfants. Elle disparaît pour 80 pour cent d'entre eux dès l'âge de trois ans. Quant aux acides gras des lipides du lait, leur profil est particulier et varié ; certains ont des effets favorables pour la santé. L'ANSES (l'Agence nationale de sécurité sanitaire) a d'ailleurs revu à la hausse les recommandations liées aux graisses (leur contribution calorique passant de 30 pour cent à 35-40).

La seconde série d'arguments relève de l'irrationnel, mais bénéficie malheureusement d'un certain impact auprès du consommateur. Ainsi, le lait serait réservé à l'espèce qui le produit. Mais pourquoi la viande de vache serait bonne pour l'homme, et pas son lait ? Autres arguments : on n'a jamais vu une espèce boire le lait d'une autre, et les laits de chèvre et de brebis seraient plus recommandables, car ils sont semblables au lait humain... Absurdité, d'autant que la concentration en calcium de ces laits est plus importante que celle du lait humain, laquelle est proche de celle du lait de vache. Et le lait de brebis est bien plus gras que le lait de vache.

Que faire en pratique ? La recommandation est de trois produits laitiers quotidiens. Ce qui représente un verre de lait le matin, une portion de fromage le midi (soit 1/8^e de camembert) et un yaourt le soir. Dans une alimentation diversifiée, ne pas utiliser les produits laitiers est dangereux pour la santé : chaque classe d'aliments présente un intérêt spécifique et aucune ne doit être négligée. ■

Jean-Marie BOURRE est membre de l'Académie de médecine et ancien directeur des Unités Inserm de neurotoxicologie, puis de neuropharmacologie-nutrition. Il est l'auteur de *Le lait, vrais et faux dangers*, Odile Jacob, 2010.

universcience présente

esuper.fr

OCEAN CLIMAT ET NOUS

EXPO > 6 AVRIL 2011 > JUIN 2012

© PORTE DE LA VILLETTE / UNIVERSCIENCE.FR



EN PARTENARIAT AVEC :

Ifremer



SCIENCE



VALEURS
VERTES



Nature
& Découvertes

FUTURA - SCIENCES

thalassa





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

✓ DE L'ANALOGIE EN BIOLOGIE

Dans l'article *Les mots de la biologie sont-ils bien choisis ?* (*Pour la Science* n° 399, janvier 2011, http://bit.ly/pls399_pointdevue), Pierre-Henri Gouyon et Marc-André Selosse plaident pour une « vision unifiée du vivant » qui justifierait en biologie l'emploi de termes issus du vocabulaire courant, tels que « gène égoïste » ou « stratégie tricheuse », sans quoi nous encourrions le risque d'une surenchère de mots nouveaux et d'une dissociation maintenue entre les humains et les processus naturels.

Mais la vraie question est de savoir si, entre l'image métaphorique et ce qu'elle illustre, les mécanismes sous-jacents sont les mêmes. Les métaphores biologiques procèdent par analogie. Une analogie est une ressemblance de rapports. Supposons qu'un mécanisme A explique les relations entre des entités du monde humain et que, par ailleurs, les rapports entre des entités du monde naturel ressemblent à ceux qu'entretiennent les entités du monde humain. Le mécanisme A est alors transposé métaphoriquement pour suggérer une explication des relations naturelles, et cette transposition sert de justification pour supposer l'existence d'un mécanisme B similaire à A.

Le problème, c'est que l'analogie ne garantit pas que la transposition soit adéquate, et ne peut alors pas avoir valeur de démonstration. Elle ne peut qu'être suggestive. S'il s'avérait que les mécanismes sous-jacents étaient différents, l'usage d'un mot commun serait pire que l'usage de mots différents, car au nom d'un rapprochement entre l'homme et la nature, nous laisserions le mot commun nous tromper, au moins potentiellement, sur ce qui rapproche vraiment de l'homme. Or nous sommes en droit de douter que ce que nous appelons « stratégie » chez un humain corresponde, dans le processus même désigné par ce nom, à une « stratégie » adaptative d'une population ou d'une espèce.

Enfin, il ne faut pas craindre les mots nouveaux, si ceux-ci sont justifiés. C'est le rôle des sciences que de donner accès rationnellement aux objets et aux mécanismes qui échappent au sens commun, et donc pour lesquels nous n'avons pas de mots disponibles dans la langue vernaculaire. C'est en gagnant de la précision avec des mots nouveaux que l'homme se rattachera de la façon la plus exacte au reste du vivant.

Guillaume Lecoindre, MNHN, Paris

✓ LE NOM DES LANGUES

L'article *L'arrivée des langues indo-européennes en Europe*

(*Pour la Science* n° 400, février 2011, http://bit.ly/pls400_langues) a suscité plusieurs réactions. En voici deux :

– Dans l'arborescence italique de l'arbre de parenté des langues indo-européennes, on trouve une langue inexistante : le valachien. Le terme correct est plutôt « valaque ».

Mais même ainsi, cette dénomination est impropre, car il s'agit d'un adjectif désignant des régions géographiques et des populations, et non des langues. Le nom exact de la branche est le roman oriental, qui se ramifie en aroumain, daco-roumain, istro-roumain et mégléno-roumain.

Ion Cepleanu

– Le néerlandais est indiqué sous la dénomination de sa variante dialectale belge, le flamand. N'est-ce pas inexact ?

Elisabeth Hooghe-Peters

→ RÉPONSE DE LA RÉDACTION

Le terme « flamand » est bien celui de l'auteur, Ruth Berger (*Flämisch* en allemand). Par ailleurs, bien que le nombre de néerlandophones soit plus élevé aux Pays-Bas qu'en Belgique, cela ne rend pas l'usage du terme flamand faux pour autant sur le plan linguistique, si l'on admet que le terme flamand désigne toutes les formes dialectales du néerlandais au Sud du Rhin, c'est-à-dire une très grande partie des néerlandophones du monde.

✓ EN ORBITE AUTOUR DE RIEN ?

Selon l'article *Le télescope spatial James Webb, un observatoire origami* (*Pour la Science* n° 398, décembre 2010, http://bit.ly/pls398_jwst), cet instrument sera mis en orbite autour du point de Lagrange L₂. Comment peut-on se mettre en orbite autour d'un point qui n'attire rien ? Ne suffit-il pas de rester en ce point ?

Hugo Roca

→ RÉPONSE DE LA RÉDACTION

Si l'on se place dans le référentiel héliocentrique tournant avec la Terre, les points de Lagrange sont des points d'équilibre entre l'attraction du Soleil, de la Terre, et la force centrifuge. Un objet

placé en l'un de ces points (il en existe cinq) décrit une trajectoire autour du Soleil ayant la même période que la Terre.

Le point de Lagrange L₂, situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre dans la direction opposée au Soleil, et son symétrique L₁, à la même distance dans la direction du Soleil, sont des points instables : un corps situé à proximité – et un objet étendu ne peut se trouver en un seul point – finit toujours par s'en éloigner, avec un temps caractéristique de l'ordre du mois. Une sonde placée en L₂ ne peut donc pas tourner sur une orbite stable comme le ferait un satellite en orbite terrestre. Mais il suffit de petites corrections de trajectoires répétées pour se maintenir au voisinage de L₂. Les orbites ainsi décrites (dites de Lissajous) sont des trajectoires complexes, très différentes des ellipses classiques.

✓ INSECTES PHOTONIQUES

Dans l'article *Des insectes à la photonique*, (*Pour la Science* n° 401, mars 2011, http://bit.ly/pls401_photonique), l'auteur attribue les changements de couleur du *Morpho godarti* au changement de l'indice de réfraction de l'air produit par les vapeurs d'acétone ou de trichloréthylène. L'indice de réfraction indiqué pour la vapeur d'acétone est en fait celui de l'acétone liquide. Celui de la vapeur d'acétone est 1,001090, bien peu différent de celui de l'air (1,0003). Comment ce faible changement d'indice peut-il entraîner un changement de couleur ?

Louis Peralta

→ RÉPONSE DE SERGE BERTHIER

Louis Peralta a parfaitement raison. La faible différence d'indice de la vapeur d'acétone et de l'air ne peut expliquer le changement drastique de couleur. Cela montre en fait que le matériau volatil se trouve en phase liquide dans la structure. Tout vient de ce que l'on appelle « vapeur ». Dans le cas présent, et dans les expériences menées en particulier en Hongrie, l'acétone se trouve sous forme de micro/nanogouttelettes qui pénètrent dans la structure et adhèrent à sa surface, formant un film liquide continu, donc d'indice plus élevé. La surface développée de la structure est énorme et permet une condensation efficace des vapeurs. C'est tout l'intérêt de cette technique.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

Pour ne rien manquer
de l'actualité scientifique mondiale

Pour la Science (12 numéros) **+**
Dossier Pour la Science (4 numéros)

Votre abonnement couplé
1 an • 76 € seulement !



BULLETIN D'ABONNEMENT

à retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnements • Pour la Science • 8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

POUR LA SCIENCE

☐ Oui, je m'abonne et reçois **12 numéros de Pour la Science + 4 numéros de Dossier Pour la Science** pendant **1 an** au prix de **76 €* (au lieu de 102,50 €, prix de vente au numéro)**. Je bénéficie également de leur version numérique sur www.pourlascience.fr.

☐ Je préfère m'abonner uniquement à la **version numérique de Pour la Science + Dossier Pour la Science** pendant **1 an** au prix de **65 € (au lieu de 92,80 €, prix de vente en ligne par numéro)** soit **16 numéros consultables et téléchargeables** sur www.pourlascience.fr.

* Offre valable uniquement en France métropolitaine. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : France d'Outre-Mer et Europe 16 € - autres pays 35 €.

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

* facultatif

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



☐ J'accepte de recevoir également les informations des partenaires de Pour la Science.

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

Signature obligatoire _____

Cle _____
les 3 chiffres au dos de votre CB

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre 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, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier adressé au Service Abonnements.

PLS402

QUESTIONS OUVERTES

Faut-il archiver le Web ?

Ce qui est affiché sur la Toile change très vite. Un archivage périodique est donc nécessaire pour en garder la mémoire, avec des difficultés qui ne sont pas seulement techniques.

Gildas ILLIEN

Brewster Kahle, ingénieur américain diplômé du MIT, a inventé le premier système de publication sur l'Internet, WAIS (*Wide Area Information Service*). En 1995, il rend visite à des amis travaillant à Palo Alto sur le grand moteur de recherche de l'époque, *Alta Vista*. Il y découvre que la quasi-totalité du Web d'alors, 16 millions de pages indexées, tient dans l'équivalent de deux distributeurs automatiques de café : le voilà qui enlace, littéralement, tout l'Internet !

Marqué par cette expérience et fasciné par le mythe de la Bibliothèque universelle d'Alexandrie, B. Kahle fonde l'année suivante *Internet Archive*, un organisme à but non lucratif qui se fixe pour objectif d'archiver tout le Web afin de conserver la mémoire numérique du monde et de la rendre accessible à tous. Son site, www.archive.org, basé à San Francisco, permet depuis 1997 de retrouver ce que les bibliothécaires appellent les incunables de l'Internet (par exemple les premières pages du site Web du quotidien *Le Monde*).

Les pouvoirs publics étant toujours un peu plus lents face à l'innovation, il faudra attendre août 2006 pour que le Parlement français vote la loi DADVIS qui institue un dépôt légal des « signes, signaux, écrits, images, sons ou messages de toute nature » publiés dans le cadre d'une communication au public par voie électronique – c'est-à-dire un dépôt légal de l'Internet. Celui-ci est confié à la Bibliothèque nationale de France (BnF), chargée de la collecte des sites français, à l'exception des sites des émetteurs de la radiotélévision qui relèvent, eux, de l'Institut national de l'audiovisuel (INA).

Cependant, les bibliothèques nationales – la BnF, mais aussi ses homologues de Grande-Bretagne, de Suède, du Danemark ou d'Australie – n'ont pas attendu la mise en place d'une législation pour engager des expérimentations visant elles aussi à mettre le Web en boîte à des fins patrimoniales. L'aventure de l'archivage du Web a débuté il y a plus de dix ans. Les ingénieurs pionniers ont d'abord vu le défi technique d'une telle entreprise. Aujourd'hui, alors que notre mémoire du monde numérique commence à faire défaut, beaucoup s'aperçoivent que cet archivage soulève aussi des questions de société : peut-on vraiment tout conserver ? À qui et à quoi un Web archivé pourra-t-il servir ?

Oubli ou mémoire ?

Google n'a que 15 ans, *Wikipedia* 10 ans, *Facebook* à peine 5 ans. Et nous ne savons pas ce qu'il restera en ligne, dans un an ou dix, des blogs et des réseaux sociaux ayant contribué à la propagation des révoltes en Tunisie et ailleurs. Faute de recul, il est difficile de savoir ce qui mérite d'être conservé et ce qui n'a pas été fait pour durer. Cette problématique n'est pas nouvelle, mais est centrale dans tout projet patrimonial. Les contours et les usages du patrimoine « numérique » (c'est-à-dire issu du Web, et non de la numérisation des livres) sont, de fait, encore difficiles à cerner.

Internet est un média éphémère, où l'instantanéité est la règle, mais nous y accumulons une quantité croissante de données numériques : photographies, conversations, enregistrements sonores et filmés, publications sur des blogs, des réseaux sociaux...

Avec le Web 2.0, ces contenus qui constituent des pans entiers de notre vie numérique ne sont pas seulement (voire pas du tout) conservés sur nos disques durs, mais directement sur la Toile.

Le déluge de données est tel que la difficulté n'est plus tant de trouver les informations que de les trier et de supprimer celles n'ayant pas d'utilité. À première vue, ce grand ménage semble se faire tout seul. Les webmasters évaluent la durée de vie moyenne des sites à deux ou trois ans : le Web s'évaporerait ainsi naturellement. Et au fond, l'idée que les données d'hier disparaissent à mesure que de nouvelles strates s'ajoutent serait plutôt rassurante : à quoi bon une mémoire numérique si les marées du Web peuvent, d'elles-mêmes, nous éviter de trier ?

Cathy Marshall, de la Société *Microsoft Research*, a étudié les comportements des Américains confrontés à leur propre mémoire numérique. Beaucoup estiment qu'il n'est pas utile de se préoccuper de leur conservation au motif que « d'autres » (« quelqu'un », *Google*, le Gouvernement fédéral, la Bibliothèque du Congrès...) s'en chargeraient déjà. Elle a même perçu chez certains un « amour du risque », pour qui la disparition volontaire ou accidentelle de leurs données aurait l'effet d'une libération – ce serait une page de sa vie que l'on pourrait enfin tourner : affranchi de son existence numérique, on peut tout recommencer à zéro.

Le principe même d'une mémoire numérique n'est-il pas fondamentalement dangereux ? Les grands moteurs indexeurs comme *Google* assureraient une mémoire totale, capable de conserver vos meilleurs souve-

nirs comme les pires et de ruiner votre réputation. Selon une récente enquête du CRÉDOC (Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie), les Français seraient préoccupés par la confidentialité et la protection des données sur Internet, et l'opinion se montrerait très favorable au « droit à l'oubli numérique » cher au sénateur président de la CNIL (Commission nationale de l'informatique et des libertés), Alex Türk, et à l'ancienne secrétaire d'État à l'économie numérique, Nathalie Kosciusko-Morizet. En effet, 91 pour cent des personnes interrogées estiment que « les sites Internet devraient permettre à chacun d'effacer simplement les informations personnelles qui ont été communiquées ».

Le spectre de « Big Brother »

Dans cette actualité où la mémoire peut sembler à la fois superflue et dangereuse, on peut donc se demander pourquoi une institution publique, telle la BnF, s'évertue à archiver des échantillons du grand fatras du Web ; serait-elle capable de trouver une juste mesure entre le spectre de *Big Brother* et la perspective tout aussi angoissante d'un monde privé d'histoire ?

Les internautes manquent peut-être de distance historique sur leurs propres pratiques pour se préoccuper de questions longtemps réservées aux chercheurs et aux conservateurs du patrimoine. C. Marshall observe cependant que la « non-politique » de conservation pratiquée par la majorité d'entre nous permet, assez paradoxalement, de retrouver par hasard des données oubliées. On compare souvent cette pratique de la « redécouverte » des fichiers oubliés dans les tréfonds des répertoires à l'expérience magique « d'une boîte à chaussures dans laquelle on retrouverait, pêle-mêle, de vieilles photographies, des coupures de presse, des lettres d'amour ». Une image qui n'est pas sans rappeler, pour les plus anciens,

1. LES MAGASINS NUMÉRIQUES de la Bibliothèque nationale de France, qui contiennent les archives du Web français stockées sur disques et sur bandes magnétiques.



L'AUTEUR



Gildas ILLIEN est conservateur et chef du Service Dépôt légal numérique à la Bibliothèque nationale de France, à Paris.

l'expérience du furetage dans un grenier familial, voire... dans une bibliothèque.

Alors, garder la trace du Web aurait peut-être et malgré tout quelque chose de bon ? Une histoire tristement ordinaire et contemporaine l'illustre. Symbole de l'industrie dans l'Est de la France, l'entreprise *Vogica*, spécialiste depuis 1976 des cuisines et salles de bain faites sur mesure, a été placée en liquidation judiciaire le 8 novembre 2010. Une quarantaine de magasins ont fermé, laissant un millier de salariés sans emploi. Consulté un mois après, le site www.vogica.fr avait entièrement disparu ; à sa place, figurait un avis de 12 lignes signé du mandataire chargé de la liquidation judiciaire.

Où les anciens salariés de l'entreprise peuvent-ils retrouver la mémoire numérique de leur entreprise et, par exemple, montrer que six mois avant sa fermeture, la rubrique « offres d'emploi » du site proposait encore 28 postes ? Où les chercheurs qui, dans 10 ou 30 ans, écriront l'histoire du déclin du tissu industriel français retrouveront-ils les traces du développement, puis de la chute de cette société ? Où, enfin, les amateurs

de publicités retrouveront-ils les clips qui ont fait la popularité de l'enseigne ?

Toutes ces informations sont conservées à la BnF, dans ses « archives de l'Internet ». L'histoire du site de *Vogica* illustre la problématique fondamentale du patrimoine : ce qui semble anecdotique et sans valeur aujourd'hui peut, un jour ou l'autre, devenir une source précieuse pour l'histoire collective et intéresser nombre de nos concitoyens. Et le Web étant devenu un média de masse, où publier est désormais à la portée de chacun, le patrimoine national ne peut plus se limiter à la production des élites et des spécialistes. Pour la première fois, il est possible de l'étendre aux propos des citoyens les plus ordinaires. Le dépôt légal du Web répondrait-il au défi que représente l'invention d'une mémoire de masse ?

Le dépôt légal, né d'une ordonnance royale de François I^{er} en 1537, a permis de réunir la plus grande part des collections de la BnF. Il oblige tout éditeur, imprimeur, distributeur ou importateur à déposer des exemplaires de chaque document qu'il édite, imprime, produit, distribue ou importe sur le territoire français, à l'un des organismes dépositaires (BnF, INA, etc.). Le dépôt légal s'est étendu à tous les supports et modes de diffusion, jusqu'à la révolution numérique. Ainsi, depuis le vote de la loi de 2006, la BnF archive chaque jour, au moyen de robots moissonneurs, des centaines de sites Web. À chaque connexion, le robot d'archivage s'identifie auprès des serveurs de l'éditeur, déclarant son identité et les raisons légales de sa visite. La BnF archive les contenus récoltés dans de vastes baies de stockage – ses magasins numériques. Des copies des sites de journaux, de revues savantes, de créations artistiques, mais aussi des blogs, des jeux en ligne, des sites publicitaires ou commerciaux côtoient désormais les vénérables collections d'estampes, de cartes et de manuscrits. Et depuis 2008, ces archives sont accessibles au public.

À la différence du dépôt légal usuel, le dépôt légal des sites Web n'implique aucune démarche active de la part des éditeurs ou des webmasters. Les collectes se font automatiquement au moyen d'un robot du nom de *Heritrix*. C'est un logiciel libre, comme

Le circuit de traitement d'une archive Web

Une archive Web se constitue en trois étapes – collecte, conservation et signalement. Les défis à chaque étape sont la volumétrie, l'hétérogénéité et la volatilité des données : l'obtention d'une image fidèle du Web exige un parc de serveurs robustes et capables d'archiver un grand nombre de fichiers très variés dans un temps limité.

Les fichiers sont récoltés au moyen de robots logiciels nommés *crawlers* ou *spiders*, le plus utilisé par les bibliothèques nationales étant *Heritrix*. À partir d'une liste d'adresses URL, ces robots copient tous les contenus qu'ils rencontrent, comme le ferait un internaute surfant sur tous les liens d'un site. Les bases de données, les contenus payants ou accessibles par identifi-

ifiant, etc., sont un obstacle, et la moisson se limite souvent à la surface du Web. Le paramétrage des robots et leur surveillance par des professionnels permettent de choisir la fréquence et la profondeur de capture des sites.

Les archives sont stockées dans un format (WARC) qui regroupe les fichiers et les métadonnées associées à la collecte (par exemple pour dater l'archive). La sauvegarde se fait sur disques ou sur bandes, dans des entrepôts numériques bien maintenus (copie sur plusieurs sites par exemple). Pour suivre l'évolution des formats et des logiciels, des campagnes de migration (d'un format de fichier vers un format plus récent) ou d'émulation (par la reconstitu-

tion artificielle de l'environnement initial de publication des sites) sont prévues.

Des techniques d'indexation permettent la recherche et la visualisation dans les archives. L'indexation en plein texte permet de rechercher par mots, comme avec un moteur de recherche en ligne. L'application *Wayback Machine* « remonte le temps » en cherchant, à partir de l'adresse d'un site et d'une frise chronologique cliquable, toutes les anciennes versions du site. D'autres techniques offrent aux chercheurs des traitements plus pointus (fouille de données, de liens, analyses sémantiques de corpus...) et des représentations cartographiques et dynamiques des données.

tous ceux que développe le Consortium international pour la préservation de l'Internet (IIPC), organisation internationale d'une quarantaine d'institutions culturelles qui ont fait alliance avec *Internet Archive* dès 2003 afin de promouvoir et de faciliter l'archivage du Web à l'échelle planétaire.

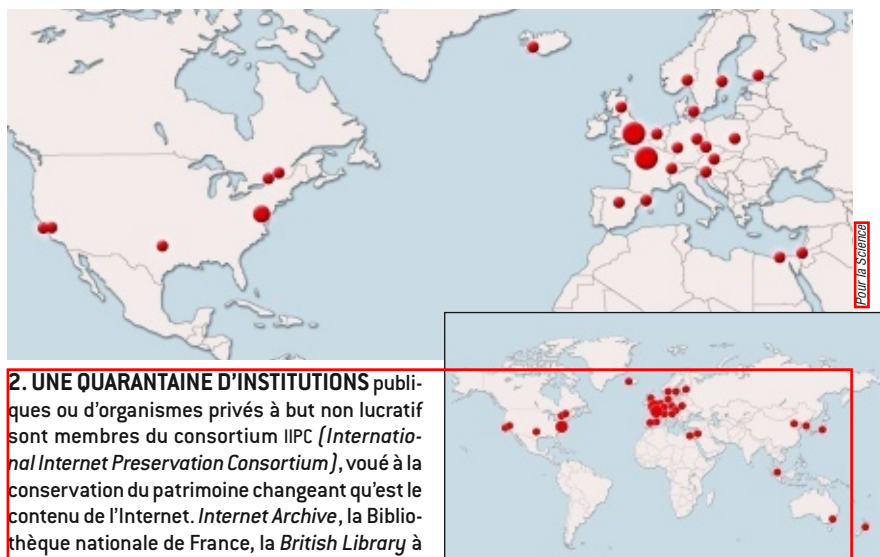
Si tout ou partie du site visité reste inaccessible au robot *Heritrix* pour des raisons techniques (base de données, contenu protégé par mot de passe, formulaire d'accès...) ou commerciales (contenu payant, abonnement...), la loi autorise la BnF à solliciter l'éditeur pour trouver des solutions techniques lui permettant d'améliorer la collecte.

Il est impossible d'être exhaustif

Compte tenu des volumes de données en ligne, la BnF ne peut garantir l'exhaustivité de son archivage. Aussi n'a-t-elle plus l'ambition ni la mission de tout conserver. Elle procède donc par échantillonnage, fondé sur la combinaison de plusieurs types de collectes (collectes automatiques et collectes ciblées, assistées par des bibliothécaires, plus fréquentes et plus profondes). La politique de la BnF est de constituer une collection représentative de l'Internet français tout en archivant certains contenus qui sont dans la continuité de son patrimoine imprimé.

Le service du « dépôt légal numérique » créé à la BnF en 2008 pour organiser et développer cette activité emploie neuf bibliothécaires et informaticiens à temps plein... ainsi qu'une quarantaine de serveurs chargés de la collecte et de l'indexation des données, une sauvegarde étant par ailleurs effectuée à la fois sur disque (pour la diffusion) et sur bande (pour la conservation). Cela représentait fin 2010 près de 200 téraoctets de données (1 téraoctet = 1 000 gigaoctets).

Ce volume peut aujourd'hui paraître modeste, mais c'est l'une des plus grandes collections d'archives Web du monde, après *Internet Archive* (près de deux pétaoctets, soit 2 000 téraoctets). Le régime juridique du dépôt légal numérique français, similaire à celui des pays nordiques, est en effet très favorable : il lui permet de collecter des sites sans avoir à demander l'accord de chaque édi-



2. UNE QUARANTAINE D'INSTITUTIONS publiques ou d'organismes privés à but non lucratif sont membres du consortium IIPC (*International Internet Preservation Consortium*), voué à la conservation du patrimoine changeant qu'est le contenu de l'Internet. *Internet Archive*, la Bibliothèque nationale de France, la *British Library* à Londres, la Bibliothèque du Congrès à Washington figurent parmi ses principaux membres. Il existe aussi d'autres acteurs de l'archivage du Web qui ne font pas partie d'IIPC, par exemple des grandes entreprises qui stockent les contenus successifs de leurs propres sites Web, notamment pour leurs besoins juridiques.

teur ou webmestre. Ce n'est pas le cas dans la plupart des pays de droit anglo-saxon. La *British Library* ou la Bibliothèque du Congrès, par exemple, ne disposent que d'archives sélectionnées et négociées à l'unité. Leurs collections couvrent certaines thématiques ou des événements (les attentats du 11 septembre 2001, l'ouragan Katrina...), mais rien qui ressemble au dépôt légal au sens où on l'entend en France.

La politique patrimoniale mise en place au fil des ans à la BnF repose sur plusieurs types de collectes, visant à refléter le plus fidèlement possible la société française. Par exemple, la bibliothèque réalise une fois par an un instantané de la totalité des noms de domaines enregistrés sous « .fr » auprès de l'AFNIC (plus de 1,8 million fin 2010, qui ne représenteraient qu'un tiers des sites effectivement enregistrés en France la même année, à comparer aux 192 000 millions de noms de domaines recensés fin 2009 dans le monde). Cette collecte a occupé l'été dernier une trentaine de serveurs durant 12 semaines, et a recueilli près de 24 téraoctets de données, soit 832 millions d'URL.

Pour compléter ces collectes à grande échelle, fidèles à l'esprit du dépôt légal qui n'exclut aucun contenu *a priori*, la BnF col-

lecte aussi plus fréquemment et plus profondément des sites dont les auteurs ou les thématiques s'inscrivent dans la continuité de ses collections.

Chaque matin, le même robot va ainsi « chercher le journal », c'est-à-dire la une en ligne d'une centaine de sites d'actualités qui donnent les nouvelles du jour. Le robot veille à la pluralité des opinions et des sensibilités. Il puise aussi bien dans la presse nationale, régionale, gratuite, que dans des sites d'actualités nés avec le Web, tels *Mediapart* ou *Rue89*. Le chercheur de demain retrouvera ainsi aisément les événements marquants d'une date précise avant de plonger dans des fonds plus spécialisés qui l'attendent déjà. Ces derniers sont le fruit d'un patient travail de veille et de sélection effectué par un réseau de 80 bibliothécaires, souvent en partenariat avec des bibliothèques régionales, des associations ou des laboratoires de recherche.

Depuis 2002, chaque grande campagne électorale mobilise ainsi une équipe de la BnF qui suit jour après jour les faits et gestes numériques des candidats, de leurs opposants et partisans, et veille à leur enregistrement dans les archives portant sur les élections. On y retrouve tracts, affiches,



SCIENTIA ASSOCIATES / VU

3. L'ACCÈS AUX ARCHIVES DU WEB est souvent strictement encadré en raison des données à caractère personnel qu'elles contiennent. À la BnF, cet accès est ainsi réservé aux chercheurs. En Scandinavie, les archives Web ne sont pas accessibles. En revanche, celles du site privé américain www.archive.org sont disponibles en ligne.

✓ SUR LE WEB

Le consortium IIPC :
<http://netpreserve.org/>

Dépôt légal des sites Web à la Bibliothèque nationale de France :

http://www.bnf.fr/fr/professionnels/depot_legal/a_dl_sites_web_mod.html

G. Illien, Le dépôt légal de l'Internet en pratique : les moissonneurs du Web, *Bulletin des Bibliothèques de France*, n° 6, pp. 20-27, 2008, disponible sur :
<http://bbf.enssib.fr/consulter/bbf-2008-06-0020-004>

Bibliographie établie par la BnF :
http://bibnum.bnf.fr/conservation/bibliographie_dl_web.pdf

CRÉDOC, La diffusion des technologies de l'information et de la communication dans la société française, décembre 2010 (rapport disponible sur <http://www.credoc.fr/>).

discours, vidéos et autres documents numériques qui cristallisent les grands enjeux de société d'une époque. Le site de campagne du candidat Jacques Chirac archivé en 2002 (www.chiracaveclafrance.net, disparu depuis), où l'on trouve par exemple son appel aux Français le soir du premier tour de l'élection du 21 avril 2002, y fait figure de pièce de collection...

La BnF suit la vie des mouvements sociaux en ligne et conserve les sites des organisations syndicales, des grandes associations et des grandes causes, mais aussi des entreprises cotées au CAC 40 dont elle archive notamment tous les rapports annuels. Elle s'intéresse aux arts et à l'écriture littéraire. L'une de ses collections les plus fascinantes est faite de journaux personnels en ligne et de sites d'écrivains connus ou non. C'est une sorte de salon littéraire virtuel où l'on découvre les traces des premiers blogueurs (qui étaient des informaticiens) et de leurs suivants : policiers, infirmières, agriculteurs ou caissières qui, un jour, ont préféré le clavier à la plume pour raconter leur vie ou livrer leurs observations. Ces récits de vie numériques, qui côtoient les premiers brouillons et essais en ligne d'écrivains de renom, forment une galerie inédite ; pourquoi l'histoire de la littérature devrait-elle s'arrêter à Casanova, Proust ou Flaubert ?

Le robot est également programmé pour réagir aux urgences et aux grands événements imprévus. Les bibliothécaires suivent l'actualité et sont parfois confrontés à des choix difficiles. Ceux de la BnF ont, par le passé, pris des initiatives de collecte spontanée, jusque dans la rue, dont les historiens leur sont redevables aujourd'hui, comme ce fut le cas pendant l'Occupation ou Mai 68.

Ainsi, en décembre 2010, la BnF décida d'archiver l'intégralité du site controversé *Wikileaks* : l'un des serveurs miroirs étant hébergé chez OVH à Roubaix, le site était juridiquement assujéti au dépôt légal français, fondé depuis cinq siècles sur la relation au territoire national. Il ne s'agissait pas de prendre parti, mais de s'assurer que les « archinautes » du futur auraient les moyens de retrouver trace d'une affaire et d'un débat planétaires, qui seront probablement déterminants pour l'évolution de la régulation des

usages et de la liberté d'expression sur Internet. L'initiative était pertinente puisque, au même moment, le gouvernement américain interdisait l'accès au site *Wikileaks* depuis les agences fédérales américaines, y compris à la Bibliothèque du Congrès.

En prise avec l'actualité

Quelques semaines plus tard, en partenariat avec *Internet Archive*, les robots de la BnF partaient moissonner les sites de Tunisie et d'ailleurs qui ont permis de suivre les révoltes d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. On peut se réjouir, pour une fois, que la France ne soit pas la plus démunie juridiquement et techniquement pour se protéger, face à ce type d'événements, contre l'oubli.

Entre droit à l'oubli et devoir de mémoire numérique, on voit ainsi s'opposer des arguments convaincants de part et d'autre. Idéalement, un archivage qui ne conserverait du Web que sa partie publique, filtrant toute donnée personnelle, constituerait évidemment le compromis le plus acceptable entre la protection des individus et la conservation d'un patrimoine commun. Ce scénario est toutefois impossible à mettre en œuvre dans l'état actuel du droit et des technologies : même si les collectes de la BnF ne représentent qu'une part infime de la totalité des données publiées en ligne, pour rester représentatives elles doivent être effectuées à une échelle suffisamment grande, ce qui implique une large part d'automatisation.

Or identifier et filtrer les données personnelles à cette échelle n'est pas possible, pour des raisons économiques et informatiques, mais aussi parce qu'il est difficile d'apprécier le caractère personnel des informations. Les pratiques d'expression en ligne ont rendu très poreuses les lignes de partage habituelles entre espace public et privé, entre publication et communication interpersonnelle. De ce point de vue, les robots d'archivage ne sauraient faire la part des choses, même s'ils respectent les espaces privés lorsqu'ils sont clairement signalés comme tels (par exemple, le robot n'a pas d'amis sur *Facebook* et ne peut s'introduire dans un réseau social à moins qu'il ne soit déclaré public et visible par tous).

Plusieurs bibliothèques nationales scandinaves (Norvège, Danemark...), pourtant en pointe dans le domaine de l'archivage, font les frais de cette situation : leurs archives du Web restent, pour ces motifs, inaccessibles au public faute de pouvoir en extraire les informations à caractère personnel.

Un accès bien encadré

Un strict encadrement de la consultation des données constitue en revanche une solution pragmatique. C'est *a priori* celle retenue par le législateur français. En l'attente d'un décret qui doit préciser, après consultation de la CNIL, les conditions spécifiques de la consultation des collections issues du dépôt légal de l'Internet, c'est le régime général de communication du dépôt légal qui est appliqué à la BnF depuis l'ouverture de la consultation, en 2008.

Selon le Code du patrimoine, l'auteur d'un site ne peut interdire « la consultation de l'œuvre sur place par des chercheurs dûment accrédités [...] sur des postes individuels de consultation dont l'usage est exclusivement réservé à ces chercheurs ». En pratique, cela signifie que, contrairement aux données accessibles depuis le site www.archive.org, celles de la BnF ne peuvent en aucun cas être mises en ligne. Leur consultation a lieu dans les murs de la BnF et des dispositions pratiques ont été mises en œuvre afin de réserver l'exploitation des données à un usage scientifique ou personnel : notamment, il n'est pas possible d'effectuer de copie numérique des données.

Une autre voie envisagée par la BnF pour améliorer sa mission de dépôt légal du Web est la participation directe des internautes à la sélection des sites à conserver. En 2011, elle projette d'ouvrir un nouveau

service en ligne dédié à la communication avec les internautes en demande de « mémoire ». Chacun pourrait, par exemple, y indiquer l'adresse de son site au moment de sa fermeture ou de sa refonte, afin que la BnF l'archive à temps et le conserve dans son magasin numérique.

Bien sûr, les innovations actuelles (*smartphones*, tablettes numériques, émergence d'un Web sémantique, etc.) nous éloignent des modèles de publication traditionnels et rendront vite obsolètes les technologies employées. Mais c'est déjà une autre ère et un nouveau défi pour les institutions dans leur course contre le temps et l'oubli. En attendant, ce que la BnF et les autres membres du Consortium IIPC auront réussi à sauvegarder de l'âge d'or de l'Internet permettra aux générations futures de retracer les mutations technologiques et culturelles qui auront marqué notre temps. ■



2011, Année internationale des Forêts.
Dans le cadre de cet événement, le Muséum vous propose des cycles de conférences et de films.

ENTRÉE LIBRE
DÉTAILS SUR
WWW.JARDINDESPLANTES.NET,
DANS "L'AGENDA DU JARDIN"

LES CONFÉRENCES

Cycle de conférences « La forêt : son rôle, son état, ses habitants » :

Lundi 28 mars : Quelle(s) forêt(s) en France en 2100 ? V. Badeau

Lundi 4 avril : Des forêts et des hommes sous les tropiques, une vieille cohabitation. S. Bahuchet

LES FILMS

Cycle de films « L'usage de la forêt » :

Lundi 11 avril - 18h :
D'une rare crudité - Anim., 2010, 7' 35". E. Davaud, J. Mougel et M. Szymczak
Secrets de plantes : l'if, aux frontières de la vie - Docu., 2010, 52'. J.-L. Bouvret

Cycle de films « Les chemins de l'eau » :

Samedi 16 avril - 15h30 :
Les eaux - Docu., 2008, 15'. K. Kiwanga
Un fleuve humain - Docu., 2006, 92'. S. L'Espérance

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e
Métros : Gare d'Austerlitz - Jussieu

LES COURS PUBLICS, LES JEUDIS À 18H

Cycle « Anatomie comparée » Jean-Pierre Gasc

Jeudi 31 mars : Sélection et optimalité
Jeudi 7 avril : La forme et l'information

Grand Amphithéâtre du Muséum
57 rue Cuvier, Paris 5^e - Métro : Jussieu



Dinosaures : on a retrouvé leur sang

Mary Schweitzer



**La préservation
de matériaux organiques
durant plusieurs dizaines
de millions d'années passait
pour impossible.
Pourtant, les paléontologues
en trouvent de plus en plus
dans des os de dinosaures.**

De petites boules rouges ! Quand un collègue me les montre sous le microscope, je refuse d'y croire. Ces minuscules objets se trouvent dans ce qui ressemble à un capillaire serpentant au milieu de la masse jaunâtre de l'os. Chacune est dotée d'un centre foncé (voir l'encadré pages 32 et 33). Un noyau cellulaire ? Je sais que, hormis les mammifères, tous les vertébrés – dont les dinosaures – ont des cellules sanguines à noyau. Ces petites sphères rouges dotées d'un centre sombre ressemblent donc à des globules rouges. Mais la lamelle d'os que nous venons de glisser sous l'objectif du microscope provient d'un *Tyrannosaurus rex* trouvé au Montana dans les Rocheuses. Or cet animal est mort il y a 67 millions d'années, et chacun sait que la matière organique ne résiste jamais autant de temps...

Depuis plus de 300 ans, les paléontologues partent du principe que la taille et la forme des os sont les seuls indices livrés par les fossiles. On pensait qu'au cours de la fossilisation, les molécules organi-

ques constituant les tissus mous étaient remplacées par des minéraux provenant du sol, et que seuls les minéraux des os subsistaient. Cette après-midi de 1992, ce que je voyais de mes propres yeux suggérait pourtant l'existence d'exceptions. Mais je me disais aussi que ces petites boules ressemblant à des globules rouges à noyau résultaient peut-être de quelque processus géologique inconnu.

À l'époque, tout juste diplômée de l'Université d'État du Montana, je n'étais pas une paléontologue confirmée. Parce que je demandais l'avis de divers enseignants et thésards, Jack Horner, le conservateur du Département de paléontologie du Muséum des Rocheuses, à Bozeman, eut vent de mes petites sphères rouges. Il me pria d'y jeter lui-même un coup d'œil, et je le vis alors, le front plissé par l'attention, regarder dans le microscope pendant ce qui me sembla des heures. Puis il me demanda ce que j'en pensais. Je lui répondis que ces structures avaient la taille, la forme et la couleur de globules rouges et



L'ESSENTIEL

✓ On pensait que tous les composés organiques disparaissaient avec la fossilisation, et que seuls des restes minéralisés subsistaient.

✓ Toutefois, de plus en plus d'indices montrent que des substances organiques peuvent, sous certaines conditions, se conserver durant plusieurs millions d'années.

✓ Les restes de cellules sanguines et osseuses ainsi que des restes de griffes devraient nous renseigner sur l'évolution et la physiologie des dinosaures.

MOR 555 est un spécimen de tyrannosaure très bien conservé dont les os ont révélé, pour la première fois, de la matière organique préservée (il s'agit ci-dessus d'une réplique).

Photo: Getty Images

qu'elles semblaient aussi être là où l'on trouve de telles cellules... C'est alors qu'il me lança le défi qui, aujourd'hui encore, inspire mes recherches : « Eh bien, prouvez-moi qu'il ne s'agit pas de cellules sanguines ! » Si je n'y parviens pas, il faudra alors bien admettre que c'en sont.

Depuis, mes collègues et moi avons retrouvé dans plusieurs spécimens divers restes organiques : vaisseaux sanguins, cellules osseuses, fragments du tissu corné qui constituait les griffes, etc. La préservation de tissus mous au cours de la fossilisation est certes très rare, mais ce phénomène ne s'est pas non plus produit qu'une seule fois.

Ces découvertes contredisent les descriptions classiques de la fossilisation. En outre, elles ouvrent de nouvelles perspectives sur la biologie des animaux disparus. Par exemple, on a déduit de résidus organiques trouvés dans les ossements d'un autre *Tyrannosaurus rex* qu'il s'agissait d'une femelle qui, juste avant de mourir, allait pondre. Et une protéine détectée dans des résidus fibreux retrouvés près d'un petit dinosaure carnivore exhumé en Mongolie a permis d'établir que l'animal avait des plumes qui, sur le plan moléculaire, étaient proches de celles des oiseaux actuels.

Un scepticisme tenace

Nos résultats ont soulevé beaucoup de scepticisme chez les paléontologues, car, après tout, ils sont extrêmement surprenants. Mais le scepticisme est chose normale en science, et je continue à trouver fascinants et prometteurs les travaux sur les tissus mous fossilisés. L'étude des molécules organiques provenant des dinosaures nous permettrait de mieux comprendre l'évolution et l'extinction de ces remarquables animaux, ce que l'on ne pouvait imaginer il y a 20 ans.

Des découvertes extraordinaires exigent des preuves extraordinaires. Avant d'accepter un résultat, un chercheur prudent doit tout faire pour le réfuter. C'est pourquoi, au cours des 20 dernières années, j'ai effectué toutes les expériences imaginables pour essayer de montrer que nos trouvailles n'étaient pas des composants de tissus mous de dinosaures ou d'autres créatures éteintes.

Dans le cas des microstructures rouges observées dans de l'os de *Tyrannosau-*

rus rex, j'ai d'abord pensé que si ces résidus étaient vraiment ceux d'un tissu vasculaire, ils ne pouvaient avoir subsisté, sous une forme sans doute très altérée, que si les os eux-mêmes étaient exceptionnellement bien conservés... Ce genre de tissu mou devait avoir disparu des squelettes mal préservés. MOR 555, notre spécimen de *T. rex* du Montana, est presque complet et ses os sont exceptionnellement bien conservés.

De fait, l'examen au microscope de lamelles d'os des membres a confirmé cette bonne conservation. La plupart des canaux des vaisseaux sanguins présents dans l'os

dense sont vides ; ils ne sont pas remplis de dépôts minéraux comme c'est généralement le cas dans les fossiles. Et nos microstructures rouge rubis n'apparaissent que dans les vaisseaux, et jamais en dehors.

Ensuite, je me suis concentrée sur la composition chimique de ces petites structures rouges. Les analyses ont montré qu'elles sont riches en fer, comme il se doit pour des globules rouges, et que le fer caractérise ces structures, mais pas leurs voisines. Ainsi, la composition en éléments de ces petites choses rondes et rouges diffère de celle des os et des sédiments entourant le fossile.

LA FOSSILISATION

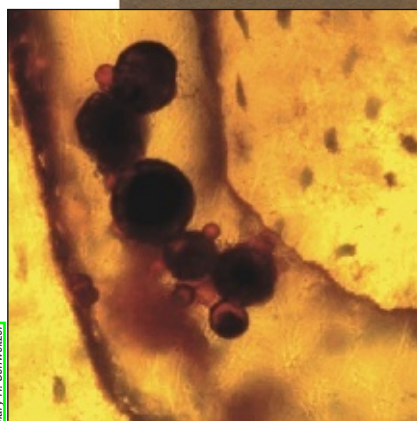
La fossilisation d'un animal commence par une dégradation de la peau, des muscles, des intestins et des tendons, qui détachent des os. Les cellules, les protéines et les vaisseaux sanguins constituant l'os se dégradent aussi. Puis des minéraux du sol s'infiltrent dans les espaces libérés et finissent par former un composite solide avec les minéraux de l'os original.

Toutefois, cette conception classique de la fossilisation doit être nuancée depuis que des cellules, des protéines et des tissus mous ont été découverts dans les os de certains fossiles de dinosaures.

Pour le moment, les chercheurs ne comprennent pas précisément comment des molécules organiques peuvent se conserver pendant des millions d'années, mais ils ont identifié plusieurs facteurs qui favorisent la préservation et la découverte de tels restes.

Mort

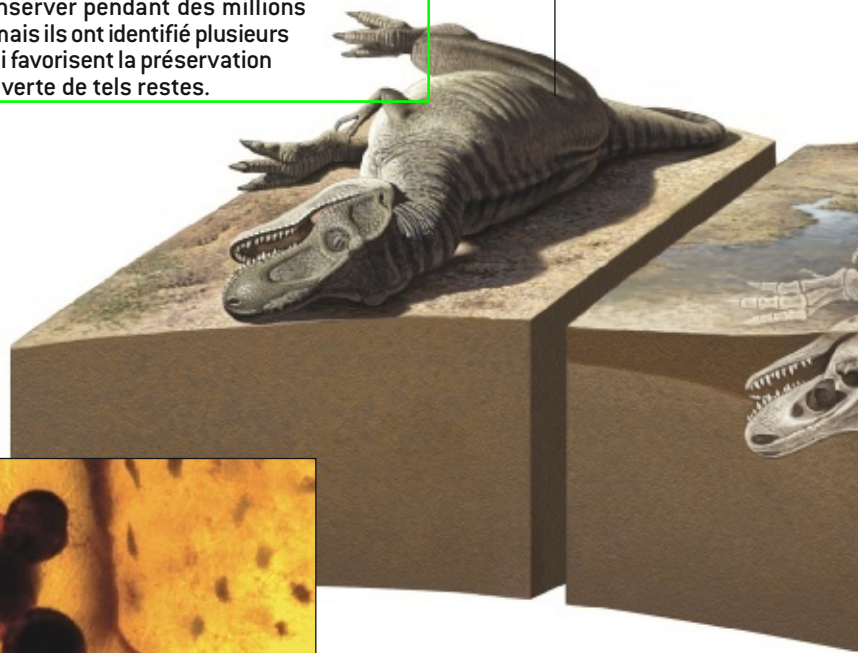
L'animal meurt à l'abri des charognards et autres animaux nécrophages.



MARTIN H. SCHWABER

Les globules rouges de MOR 555.

Ces petites sphères rouges, situées dans ce qui ressemble à un vaisseau capillaire, sont visibles au microscope dans une coupe mince d'os d'un *Tyrannosaurus rex* du Montana.



Pour pousser plus loin mon enquête sur le lien entre les petites particules rondes et les globules rouges, j'ai tenté de trouver l'hème, la molécule riche en fer qui confère aux protéines de l'hémoglobine la capacité de transporter l'oxygène et qui donne au sang sa couleur écarlate.

Recherche d'anticorps

Pour ce faire, nous avons utilisé le fait que l'hème vibre et absorbe un rayonnement électromagnétique approprié suivant un motif caractéristique, et aussi qu'il absorbe la lumière de façon particulière parce

que son centre est métallique. Ces tests ont montré que dans le matériau sont présents des composés ayant les mêmes signatures spectroscopiques et optiques que l'hème.

L'une des expériences les plus convaincantes que nous ayons menées tirait profit de la réponse immunitaire. Lorsqu'un organisme détecte des substances organiques étrangères, il produit des anticorps. En injectant des extraits d'os du tyrannosaure à des souris, nous avons déclenché la fabrication d'anticorps dirigés contre les composés organiques contenus dans les os. Et quand nous avons ensuite exposé ces anticorps à de l'hémoglobine

de rat et de dinde, nous avons constaté qu'ils s'y liaient : on en déduit que les os de MOR 555 contiennent une substance très proche de l'hémoglobine des animaux d'aujourd'hui.

Aucun des nombreux tests chimiques et immunologiques effectués n'a contredit l'hypothèse que nos sphères étaient des globules rouges de *T. rex*. Pour autant, nous n'avons pu montrer que la substance proche de l'hémoglobine trouvée dans l'os de notre tyrannosaure provenait bien des petites sphères, les techniques disponibles ne permettant pas de déterminer le lieu d'origine d'une substance. C'est pourquoi

Ensevelissement

Les sédiments recouvrent la carcasse avant que des animaux ou l'érosion ne la détruisent ; de telles circonstances se produisent par exemple quand les eaux chargées en sédiments d'une rivière en crue recouvrent une plaine.

Le sable charrié, en particulier, semble empêcher la disparition complète des chairs d'une carcasse, peut-être parce que sa porosité favorise l'évacuation des fluides corrosifs issus de la décomposition des tissus organiques.

Enfouissement profond

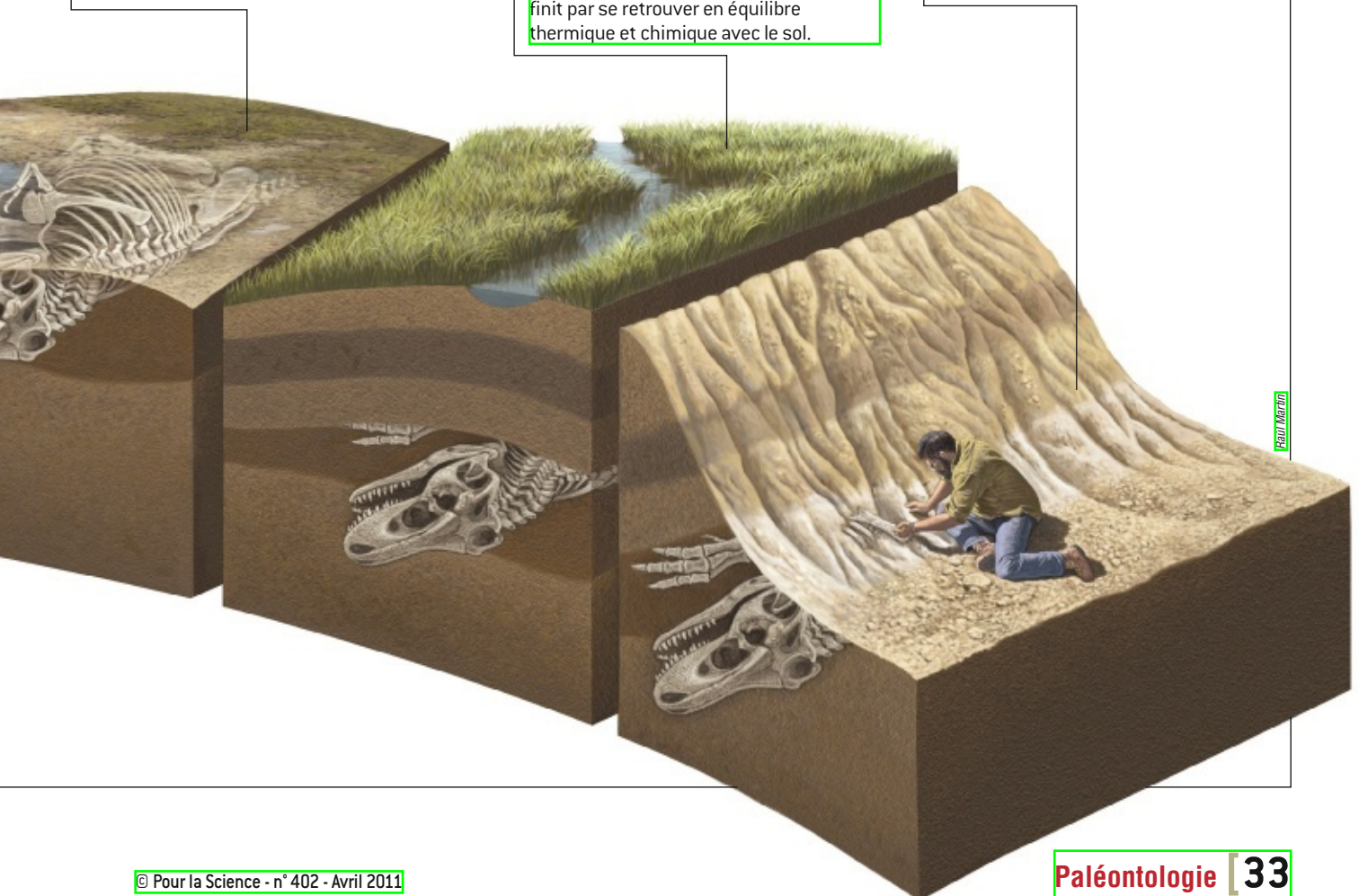
Les sédiments qui s'accumulent pendant des millions d'années enfouissent la carcasse en profondeur, et des minéraux dissous dans l'eau du sol s'infiltrent dans les os.

Un enfouissement particulièrement profond peut favoriser la conservation des tissus mous en les protégeant de l'oxydation, des variations thermiques et de l'acidité du sol, ainsi que des ultraviolets, qui sont autant de facteurs actifs en surface. La carcasse finit par se retrouver en équilibre thermique et chimique avec le sol.

Mise au jour

Les mouvements tectoniques soulèvent les couches sédimentaires contenant les fossiles, puis l'érosion expose ces derniers et les met à portée des chasseurs de fossiles.

Afin de protéger d'éventuelles molécules organiques résiduelles, il importe alors de minimiser l'exposition du fossile à l'air libre, puis d'analyser aussi vite que possible les matériaux, éventuellement organiques, encore présents sur les os.

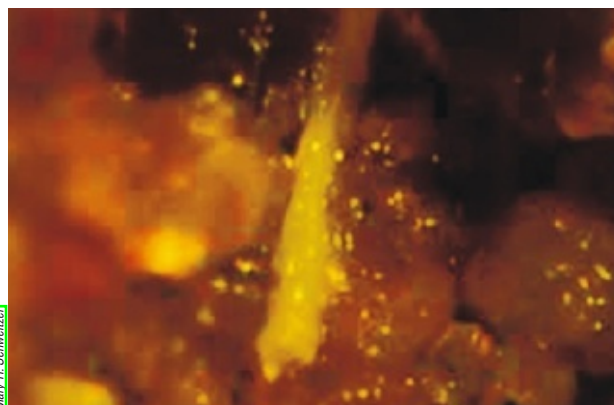


RESTES ORGANIQUES ANCIENS

Les chercheurs ont retrouvé des tissus mous dans nombre de fossiles vieux de plusieurs dizaines de millions d'années.



L'os d'un doigt de *Rahonavis ostromi*, oiseau qui vécut il y a environ 70 à 80 millions d'années à Madagascar, est recouvert par de la substance blanche. Cette dernière semble être le résidu d'une enveloppe protéique qui recouvrait les griffes de cet animal.



Ce filament creux (au centre) a l'apparence d'une fibre de plume ; il appartenait à *Shuvuuia deserti*, un petit dinosaure carnivore qui peuplait la Mongolie, il y a 70 millions à 83 millions d'années.

nous sommes restés très prudents en publiant nos conclusions en 1997 ; nous nous sommes contenté d'affirmer qu'une substance proche de l'hémoglobine semblait avoir été préservée malgré la fossilisation, et que son origine probable était à chercher au sein des cellules du dinosaure. Notre article n'a eu qu'un très faible écho.

Ces travaux sur l'os de tyrannosaure m'ont fait prendre conscience du potentiel scientifique des restes fossilisés de tissus organiques. Si l'on pouvait récupérer des protéines, nous pourrions remonter à la séquence des acides aminés qui les constituent, tout comme les généticiens séquencent les « lettres » qui forment l'ADN. À l'instar de celles d'ADN, les séquences des protéines contiennent des informations sur les relations de parenté entre espèces, sur l'évolution des espèces et sur la façon dont l'acquisition de nouvelles caractéristiques aurait conféré des avantages aux animaux concernés.

Mais avant d'explorer ces possibilités, il fallait établir que des protéines anciennes avaient persisté dans des fossiles autres que celui de l'exceptionnelle femelle de tyrannosaure que nous avons étudiée. Mark Marshall, Seth Pincus, John Watt et moi nous sommes alors concentrés sur deux fossiles bien conservés qui semblaient prometteurs.

Le premier de ces fossiles était *Rahonavis*, un bel oiseau primitif datant de la fin du Crétacé (il y a 80 à 70 millions d'années) exhumé à Madagascar. Lors de sa mise

au jour, ses découvreurs avaient remarqué la présence, sur les os des doigts, d'un matériau fibreux et blanc. Aucun autre os sur le site ne portait de traces de cette substance, par ailleurs absente dans les sédiments de l'endroit. C'est pourquoi les paléontologues qui fouillaient se sont demandé si cette substance blanche pouvait être apparentée à l'enveloppe dure de kératine qui recouvre les os des doigts des oiseaux actuels et forme leurs griffes. Ils m'ont alors demandé de l'aide.

Kératine de griffes et de plumes

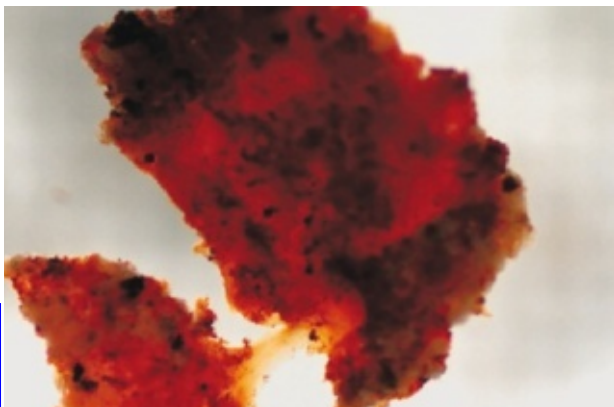
Les kératines pourraient être conservées très longtemps : elles sont abondantes chez les vertébrés et résistent bien à la dégradation. Elles se présentent sous deux formes principales : alpha et bêta. Tous les vertébrés ont de la kératine alpha qui, chez les humains, constitue les cheveux et les ongles et permet à la peau de résister à l'abrasion et à la déshydratation. Quant à la kératine bêta, elle est absente chez les mammifères et n'apparaît, dans les organismes actuels, que chez les oiseaux et les reptiles.

Pour tester la présence de kératine dans le matériau blanc découvert sur les os des doigts de *Rahonavis*, nous avons employé bon nombre des techniques utilisées pour étudier l'os de tyrannosaure. En particulier, les tests d'anticorps ont indiqué la présence de kératine alpha et de kératine

bêta. D'autres analyses ont permis de révéler des acides aminés localisés sur la membrane qui recouvre l'os ; on a aussi détecté de l'azote (un composant des acides aminés) qui était lié à d'autres composés, tout comme les protéines se lient les unes aux autres dans les tissus vivants, y compris dans la kératine. Tous nos tests confirmaient l'idée selon laquelle le mystérieux matériau blanc recouvrant les os des doigts de cet ancien oiseau incluait des fragments de kératine alpha et de kératine bêta et représentait en fait des restes de griffes.

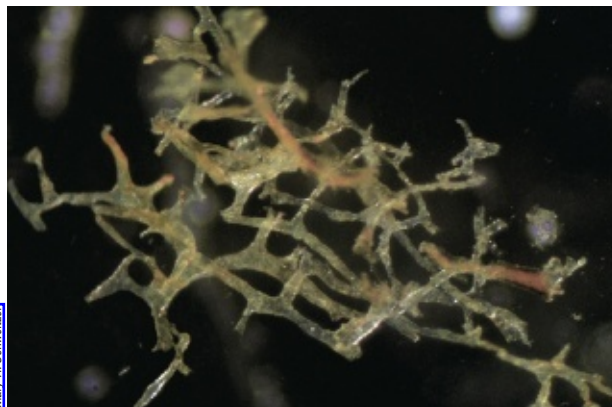
Le second spécimen que nous avons étudié était un fossile spectaculaire de la fin du Crétacé, découvert en Mongolie par des chercheurs du Muséum américain d'histoire naturelle, à New York. Bien que ses découvreurs l'aient nommé *Shuvuuia deserti*, ou « oiseau du désert », il s'agissait en fait d'un petit dinosaure carnivore.

Alors qu'elle nettoyait ce fossile, Amy Davidson, du muséum, remarqua de petites fibres blanches sur la nuque de l'animal. Elle me demanda s'il pouvait s'agir de restes de plumes. Les oiseaux descendent de dinosaures, qui ont eu des plumes bien avant eux. L'idée que *Shuvuuia* possédait un revêtement duveteux était donc plausible. Cependant, je ne m'attendais pas à ce qu'une structure aussi fragile qu'une plume puisse avoir résisté si longtemps. Je me disais que les fibres blanches provenaient plutôt de plantes modernes ou de champignons ; mais j'acceptai d'y regarder de plus près.



Mark H. Schweitzer

De l'os médullaire a été trouvé dans un os vieux de 68 millions d'années provenant d'un tyrannosaure exhumé dans le Montana. Ce type de tissu est formé pendant une durée limitée par les femelles d'oiseaux sur le point de pondre.



Mark H. Schweitzer

Des vaisseaux sanguins, ou du moins des structures qui leur ressemblent fortement, sont apparus après dissolution des minéraux d'un morceau d'os cortical (de l'os compact) appartenant à l'un des tyrannosaures du Montana.

À ma grande surprise, les tests initiaux ont exclu les plantes et les champignons. En outre, des analyses ultérieures de la microstructure de ces étranges brins blancs ont indiqué la présence de kératine. Les plumes «adultes» des oiseaux actuels sont constituées presque exclusivement de kératine bêta.

Si les petites fibres découvertes sur *Shuvuuia* étaient apparentées à des plumes, elles devaient donc renfermer uniquement de la kératine bêta, contrairement à l'enveloppe des griffes de *Rahonavis*, qui contenait à la fois de la kératine alpha et de la kératine bêta. De fait, c'est exactement ce que nous avons trouvé lorsque nous avons réalisé nos tests d'anticorps.

J'étais désormais convaincue que de petits restes de protéines anciennes pouvaient perdurer dans des fossiles extrêmement bien conservés et que nous avions les outils pour les identifier. Mais de nombreux chercheurs restaient sceptiques. Nos découvertes allaient à l'encontre de tout ce que l'on pensait savoir sur la décomposition des cellules et des molécules organiques.

Des études en laboratoire suggéraient que les protéines ne devaient pas résister plus d'un million d'années environ; l'ADN durait encore moins. Des chercheurs travaillant sur de l'ADN ancien avaient déjà annoncé qu'ils avaient découvert de l'ADN vieux de plusieurs millions d'années, mais les travaux ultérieurs n'ont pas confirmé ces résultats. Les seuls résultats bien admis

pour des molécules très anciennes donnaient des âges ne dépassant pas quelques dizaines de milliers d'années.

Face au scepticisme que suscitaient mes travaux, un collègue me conseilla de prendre du recul et de démontrer l'efficacité de nos méthodes en identifiant des protéines dans des os très anciens, mais pas aussi vieux que notre os de dinosaure.

En collaboration avec le chimiste John Asara, de l'Université Harvard, j'obtins des protéines provenant de fossiles de mammoths dont l'âge était estimé entre 300 000 et 600 000 ans. Leur séquençage par spectroscopie de masse a révélé qu'il s'agissait de collagène, l'un des principaux composants des os, des tendons, de la peau et d'autres tissus. La publication de ces résultats, en 2002, passa assez inaperçue.

Une femelle qui était prête à pondre

L'année suivante, une équipe du Muséum des Rocheuses achevait d'exhumer le squelette du plus vieux tyrannosaure trouvé à ce jour : un animal mort il y a 68 millions d'années. MOR 1125, tel est son nom, provient de la formation rocheuse du « ruisseau de l'enfer » (*Hell Creek*) dans l'Est du Montana.

Ce site est si isolé qu'il a fallu un hélicoptère pour transporter au camp de base les blocs de plâtre contenant les os mis au jour. Le bloc contenant les os des membres se révéla si lourd que l'hélicoptère

ne pouvait le soulever... L'équipe dut alors le diviser en plusieurs blocs, ce qui produisit de nombreux fragments d'os, que l'on recueillit à mon attention. Comme mes premières études sur un tyrannosaure étaient mises en doute, j'étais impatiente de les répéter sur un second spécimen...

Dès que je retirai le premier fragment de la boîte, un fragment de fémur, je sus qu'il y avait quelque chose de particulier : la surface interne de ce fragment était bordée d'une fine couche de matière osseuse absente des précédents fossiles de dinosaures. Cette couche était très fibreuse, remplie de canaux de vaisseaux sanguins, et différait par sa couleur et sa texture de l'os cortical qui constitue la plus grande partie de la masse osseuse d'un squelette. «C'est une femelle, et elle porte un petit», m'exclamai-je devant mon assistante médusée, Jennifer Wittmeyer.

Connaissant bien la physiologie des oiseaux, j'étais presque sûre que cette structure caractéristique était de l'os médullaire, un tissu particulier qui n'apparaît que pendant une durée limitée (souvent deux semaines seulement), quand les oiseaux sont sur le point de pondre; son rôle est de fournir du calcium afin de renforcer la coquille des œufs.

L'os médullaire se distingue des autres types d'os par l'orientation aléatoire de ses fibres de collagène, due à sa formation très rapide. Cette croissance anarchique rapide se produit aussi pendant la cicatrisation d'une fracture, ce qui explique

les excroissances alors constatées à l'emplacement de la fracture. Afin de révéler l'arrangement des fibres de collagène, il est possible de déminéraliser les os d'un oiseau actuel ou de tout autre animal en utilisant des acides faibles. C'est ce que nous avons tenté : s'il s'agissait bien d'os médullaire contenant du collagène, l'élimination des minéraux révélerait l'orientation aléatoire des fibres. Or c'est bien un amas de tissu flexible et fibreux que nous avons observé une fois la déminéralisation effectuée. Nous avons répété la même expérience à de multiples reprises, avec le même résultat à chaque fois. Tout se passait exactement comme lorsque l'os médullaire d'oiseaux actuels est traité de la même façon...

Qui plus est, lorsque nous avons ensuite dissous des morceaux de l'os plus dense et plus fréquent qu'est l'os cortical, nous avons obtenu d'autres tissus mous. Des tubes creux, transparents, flexibles et ramifiés apparaissaient dans la matrice en dissolution – et ils ressemblaient

tout à fait à des vaisseaux sanguins. Suspendus à l'intérieur de ces vaisseaux se trouvaient soit de petites structures rouges et rondes, soit des amas amorphes de matière rouge. D'autres expériences de déminéralisation ont révélé des ostéocytes, les cellules osseuses qui sécrètent le collagène et d'autres composés constituant la partie organique de l'os. Le dinosaure tout entier semblait contenir du matériel préservé qui n'avait jamais été trouvé auparavant dans un fossile de dinosaure !

Lorsqu'en 2005, nous avons publié nos observations de ce qui semblait être du collagène, des vaisseaux sanguins et des cellules osseuses, l'article retint l'attention de la communauté scientifique, mais sans la faire sortir de son attitude attentiste.

Il faut dire que nous nous limitions à annoncer une ressemblance entre les matériaux découverts et des composants modernes, mais nous n'affirmions pas qu'il s'agissait des mêmes substances. Après des millions d'années passées dans des sédiments et des conditions géochimiques

fluctuantes, ce qui avait été conservé dans les fossiles pouvait n'avoir plus beaucoup de rapport avec les substances présentes du vivant des animaux. Le seul moyen de prouver de façon ferme et définitive la nature de ces matériaux consistait à établir avec précision leur composition.

Des protéines de tyrannosaure

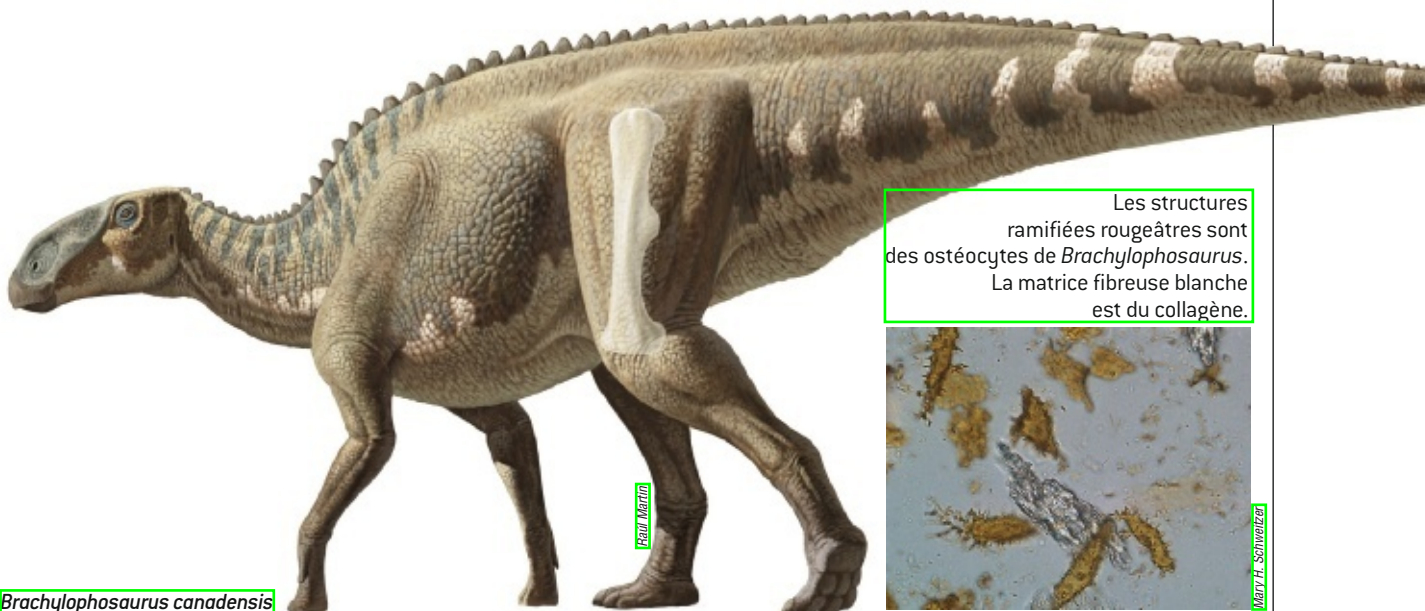
En utilisant toutes les techniques améliorées avec les fossiles précédents, j'analysai le nouvel os de tyrannosaure. Avec l'aide de J. Asara, qui avait amélioré les méthodes de purification et de séquençage mises en œuvre dans notre étude des os de mammoth, nous voulions séquencer des protéines de dinosaure, beaucoup plus anciennes.

L'exercice était bien plus difficile, la concentration de matériaux organiques dans les restes de dinosaure étant inférieure de plusieurs ordres de grandeur à la concentration dans ceux de mam-

LA « DISSECTION » D'UN DINOSAURE À BEC DE CANARD

En 2007, des chercheurs découvrent un fémur bien conservé de dinosaure à tête de canard (*Brachylophosaurus canadensis*) dans l'Est du Montana, aux États-Unis. Son étude au microscope révèle que ce fémur contient des structures ressemblant à des ostéocytes (cellules osseuses) ; ces structures étaient incluses dans une matrice de matériau blanc et fibreux, qui ressemble à du collagène (voir la micrographie). Des analyses ultérieures ont confirmé la présence de tissus mous et réfuté l'hypothèse que ces structures pourraient être dues à des

bactéries. En particulier, des extraits de cet os de dinosaure réagissent avec les anticorps qui ciblent le collagène ainsi que d'autres protéines non fabriquées par les bactéries. Comme on pouvait s'y attendre si le fémur de dinosaure à bec de canard contenait effectivement des protéines de dinosaure, la spectrométrie de masse a révélé des séquences d'acides aminés très proches de celles des protéines d'oiseaux modernes, lesquels sont des descendants des dinosaures, et différentes de celles provenant de bactéries.



Les structures ramifiées rougeâtres sont des ostéocytes de *Brachylophosaurus*. La matrice fibreuse blanche est du collagène.

Brachylophosaurus canadensis

mouth et les protéines étant très dégradées. Mais nous avons finalement réussi à les séquencer.

Notre collègue Chris Organ, de l'Université Harvard, a alors comparé nos séquences de tyrannosaure à celles d'une multitude d'autres organismes, et il est apparu que nos séquences pouvaient être groupées avec celles des oiseaux et, dans une moindre mesure, avec celles des crocodiliens. Or ces deux groupes actuels sont les plus proches parents des dinosaures.

Les articles détaillant nos travaux de séquençage, publiés en 2007 et 2008, entraînent controverse sur controverse. La plupart des critiques portaient sur notre interprétation des données de séquençage par spectrométrie de masse. Certains contradicteurs alléguaient que nous n'avions pas déterminé assez de séquences pour prouver notre hypothèse; d'autres que les structures que nous avons interprétées comme des tissus mous primitifs étaient en fait des biofilms – des dépôts créés par les micro-organismes ayant envahi l'os fossilisé; et ainsi de suite.

Il est clair que les chercheurs sont payés pour être sceptiques et doivent examiner avec rigueur les affirmations remarquables. Mais ils doivent aussi appliquer le principe d'économie, c'est-à-dire préférer l'explication la plus simple compatible avec toutes les données fournies. Or nous fournissions de multiples faisceaux d'indices allant tous dans le sens de notre hypothèse...

Encore un bon fossile

Je savais qu'une seule et unique découverte surprenante n'a pas de signification scientifique à long terme. Il nous fallait séquencer les protéines provenant d'autres dinosaures. Un bénévole qui nous accompagnait lors d'une expédition d'été découvrit un spécimen de dinosaure à bec de canard (*Brachylophosaurus canadensis*), un herbivore d'il y a quelque 80 millions d'années. Nous avons fait tout notre possible pour le libérer rapidement de sa gangue de grès tout en minimisant son exposition à l'air libre. Les polluants atmosphériques, les fluctuations de l'humidité et autres influences externes sont très nocifs pour des molécules fragiles, et plus l'os est exposé, plus il y a contamination et dégradation.

C'est peut-être grâce à ces précautions et à la rapidité des analyses que la chimie

et la morphologie de ce second dinosaure se sont révélées moins altérées que celles de MOR 1125. Comme nous l'avions espéré, nous avons trouvé dans l'os de cet animal des cellules incluses dans une matrice de fibres blanches de collagène. Ces cellules présentaient les longues extensions fines et ramifiées caractéristiques des ostéocytes, que nous pouvions suivre du corps cellulaire jusqu'à l'endroit où elles se lient à d'autres cellules. Quelques-unes d'entre elles semblaient contenir des structures internes, des noyaux cellulaires peut-être.

En outre, les extraits de l'os du dinosaure à bec de canard réagissaient avec les anticorps qui ciblent le collagène et d'autres protéines que les bactéries ne fabriquent pas; cette constatation infirmait la thèse suivant laquelle la couche

LES SÉQUENCES DE PROTÉINES OBTENUES à partir de l'os du dinosaure à bec de canard ressemblent beaucoup à celles d'oiseaux actuels.

blanche ne serait qu'un biofilm. Par ailleurs, tout comme celles de MOR 1125, les séquences de protéines obtenues ressemblaient étroitement à celles d'oiseaux actuels. Nous avons aussi envoyé des échantillons de cet os de dinosaure à plusieurs laboratoires pour qu'ils procèdent à des analyses indépendantes. Toutes ont confirmé nos résultats. Après la publication de ces découvertes dans la revue *Science*, en 2009, je n'ai plus entendu de contestations.

Toutefois, il reste beaucoup à comprendre sur les tissus mous anciens. Pourquoi ont-ils subsisté alors que, selon tous les modèles, ils devraient être dégradés? Qu'ignorons-nous sur les processus de fossilisation? Que nous apprennent ces fragments résiduels de molécules sur les animaux? Les travaux de séquençage suggèrent qu'après constitution de bibliothèques de séquences anciennes et modernes, nous pourrions en déduire des informations sur les liens de parenté entre espèces éteintes. Avec le développement de ces bases de données, nous pourrions comparer des séquences pour étudier l'évolution moléculaire d'une lignée et mesurer la vitesse de cette évolution. Autant de contributions possibles à la résolution des énigmes posées par les dinosaures, à commencer par celle de leur disparition...

L'AUTEUR



Mary SCHWEITZER est maître de conférences au Département des sciences marines, terrestres et atmosphériques de l'Université de Caroline du Nord, aux États-Unis, et conservatrice adjointe du Muséum d'histoire naturelle de l'État de Caroline du Nord.

BIBLIOGRAPHIE

M. H. Schweitzer *et al.*, Biomolecular characterization and protein sequences of the Campanian hadrosaur *B. canadensis*, *Science*, vol. 324, pp. 626-631, 2009.

J. H. Kaye *et al.*, Dinosaurian soft tissues interpreted as bacterial biofilms, *PLoS One*, vol. 3, n° 7, 2008.

J. Asara *et al.*, Protein sequences from *Mastodon* and *Tyrannosaurus rex* revealed by mass spectrometry, *Science*, vol. 316, pp. 280-285, 2007.

M. H. Schweitzer *et al.*, Beta-keratin specific immunological reactivity in feather-like structures of the Cretaceous Alveosaurid, *Shuvuuia deserti*, *Journal of Experimental Zoology*, vol. 285, pp. 146-157, 1999.

M. H. Schweitzer *et al.*, Preservation of biomolecules in cancellous bone of *Tyrannosaurus rex*, *Journal of Vertebrate Paleontology*, vol. 17, n° 2, pp. 349-359, 1997.



1. LES VIKINGS DÉBARQUENT À OISEL, une île de la Seine. Les paysans qui l'occupaient ont-ils souffert de l'arrivée des guerriers du Nord ? Peut-être pas, puisque les Vikings de la Seine, qui voulaient faire de Oisel une base logistique, avaient intérêt à pouvoir se fournir auprès de la population locale. Les archéologues n'ont en tout cas retrouvé aucune trace de violence sur place.

Les Vikings de la Seine

Vincent Carpentier

Les Vikings n'ont laissé pratiquement aucune empreinte archéologique en Normandie, mais seulement des traces linguistiques et historiques. Elles attestent de leur volonté de s'intégrer dans la société carolingienne.

L'ESSENTIEL

- ✓ Au début du X^e siècle, le chef viking Rollon et son armée anglo-scandinave tentent leur chance dans la vallée de la Seine.
- ✓ Les archéologues ne retrouvent pourtant aucune trace matérielle d'invasion.
- ✓ En revanche, de nombreuses traces linguistiques attestent l'influence viking.
- ✓ Ce tableau confirme les récits des chroniqueurs : les Vikings de la Seine voulaient avant tout s'insérer dans la société carolingienne.
- ✓ Ils ont contribué à la culture médiévale originale du duché de Normandie, dont l'héritage est considérable, en France, comme en Angleterre.

... Le très tolérant roi Charles, souhaite te donner cette terre proche de la mer, qui a été ravagée à l'excès par Anstign et par toi ; il te donnera aussi en mariage sa fille Gisèle, ... Tu auras ce domaine à perpétuité.

Dudon de Saint-Quentin,
Histoire des Normands (X^e siècle)

La chose est connue : les hommes du Nord ont colonisé la Normandie, qui, pour cette raison, porte leur nom. Pourtant, si l'on demandait à un archéologue ignorant les textes historiques – par exemple à un spécialiste chinois de la dynastie Song (X^e siècle) – de rechercher en Normandie les traces matérielles d'une conquête scandinave au X^e siècle, il ne pourrait que conclure que, probablement, pareille invasion n'a pas eu lieu ! Oissel, une ancienne île de la Seine en amont de Rouen, passe par exemple pour avoir été un repaire de Vikings. Qu'y ont révélé des fouilles récentes ? Les vestiges d'un habitat carolingien contemporain des incursions scandinaves, mais ni témoignage direct de la présence nordique – mobilier, architecture – ni trace de violences subies par les habitants.

Nous allons voir que cette constatation archéologique peut être étendue à la

Normandie tout entière. En revanche, des vestiges linguistiques nombreux et de proches sources historiques racontent, non pas l'histoire d'une colonisation, mais celle de l'arrivée dans la vallée de la Seine d'une bande d'aventuriers anglo-scandinaves, qui, après avoir imposé sa présence, fit bientôt alliance avec l'élite carolingienne locale, non pas pour vider la vallée de ses habitants, mais bien pour s'intégrer parmi eux.

Une bande d'aventuriers

Non seulement l'inventaire des objets nordiques recensés dans les deux régions normandes tient en quelques pages, mais l'attribution ethnique des objets qui le composent est aussi incertaine. Il s'agit pour commencer d'une petite dizaine de haches de guerre, d'épées (voir la figure 2) et de fers de lance retrouvés pour la plupart à l'occasion de dragages effectués dans la Seine, autour de Rouen, Elbeuf, Pîtres ou Oissel. La moitié de ces armes est d'origine nordique. Elles peuvent être datées de la fin du IX^e ou du début du X^e siècle, époques des grands assauts conduits contre Rouen et Paris par une flotte viking à laquelle appartenait Hrolfr, qui allait



M. Pater, INRAP, coll. M. de Normandie, de l'ère

2. CETTE LONGUE ÉPÉE FRANQUE est une arme de cavalerie très prisée par les Vikings, qui, soit se la procuraient chez les Francs, soit en imitaient la forme dans leurs ateliers. Retrouvée dans la Seine lors d'un dragage, elle a pu appartenir aussi bien à un guerrier viking qu'à un chevalier franc. Elle fait aujourd'hui partie des collections du musée de Normandie.

devenir Rollon, auquel Charles le Simple confiera, vers 911, le comté de Rouen. Les autres ont été forgées sur le continent, mais ont peut-être été utilisées à la même époque par les Vikings.

Outre les armes, seuls quelques très rares objets métalliques sont d'origine scandinave, certaine ou supposée (un bracelet en bronze de provenance inconnue, sans doute du X^e siècle; quelques amulettes en forme de marteau de Thor, difficiles à dater; une série de monnaies et bijoux originaires des îles britanniques ou des contrées de la mer du Nord...). Cette pauvreté archéologique est bien étonnante si l'on considère que le port de Rouen et les rivages de la Normandie étaient en contact avec les routes maritimes datant de la Préhistoire.

Si des Vikings sont venus vivre et mourir en France, ils doivent y être enterrés, se dit-on alors... Or, à ce jour, on ne compte qu'un seul site funéraire que l'on puisse associer à la présence viking : en 1865, une tombe découverte fortuitement à Pitres, près d'Oissel, a livré des restes humains accompagnés d'une paire de fibules en bronze dites en « carapace de tortue » (voir la figure 3). De style purement scandinave, de telles fibules formaient sans doute la parure d'une femme issue de l'aristocratie nordique. Uniques à ce jour en Normandie, ces objets remontent à la seconde moitié du IX^e siècle.

Pour leur part, les chefs vikings se faisaient mettre en terre sous un tertre, souvent dans un bateau où ils se faisaient incinérer; dans certains cas, seule la forme de la barque funéraire était représentée, par une série de pierres dressées au-dessus d'une tombe en plein sol. Cette mode funéraire typiquement scandinave a-t-elle laissé des traces en Normandie ?

À ce jour, aucune n'y est encore apparue. La seule tombe à barque viking connue en France a été identifiée et fouillée en 1906



M. Kuller, Historisk Museum, Oslo

3. DEUX FIBULES EN CARAPACE DE TORTUE de ce type ont été trouvées en 1865 près de Pitres dans l'Eure en compagnie d'objets de fer, de poteries et d'ossements. Caractéristiques de la parure féminine scandinave du IX^e au X^e siècle, elles faisaient probablement partie des offrandes funéraires de l'une des rares femmes scandinaves à avoir été enterrées en Normandie.



Musée de Normandie, Caen

4. CE PETIT VASE GROSSIER a longtemps été considéré comme une importation viking, parce qu'il a été trouvé dans une tombe censée être en forme de bateau dans l'embouchure de la Saire. En fait, il remonte à l'âge du bronze.

sur l'île de Groix, en Bretagne (voir la figure 5). Deux tombes, trop vite considérées comme vikings parce que délimitées par des enclos de pierres censés reproduire des coques de bateau, ont naguère été identifiées à Réville dans le Cotentin, au sein d'une nécropole supposée du Haut Moyen Âge. L'examen des clichés pris lors de la mise au jour de ces vestiges, après que la marée les a découverts, montre cependant que les enclos de pierres dessinent des cercles et non des coques. Or les archéologues savent bien que de tels cercles de pierres entourant un lieu d'incinération sont caractéristiques d'un type de sépulture présent en Normandie au cours de l'âge du bronze final et du début du premier âge du fer. De fait, les enquêtes archéologiques conduites récemment sur ce site ont confirmé cette datation, tandis qu'un vase modelé provenant de l'une des deux tombes est aujourd'hui attribué à l'âge du bronze, alors qu'il était présumé d'origine nordique (voir la figure 4).

Même la « fortification viking » du Hague-Dike – une bande de terre de quatre kilomètres de long érigée en travers de la péninsule de la Hague dans le Cotentin – est aussi « tombée » récemment. En dépit d'une tradition tenace entretenue depuis les années 1950 par un cortège d'historiens partisans de la thèse « colonisatrice », le Hague-Dike ne doit absolument rien aux Scandinaves. S'il fut rebaptisé ainsi au Moyen Âge central à partir d'un vocabulaire effectivement nordique, il s'agit néanmoins d'une construction antérieure aux Vikings dont les premiers segments, datés par le carbone 14, remontent eux aussi à l'âge du bronze. Décidément, le dossier archéologique des Vikings en Normandie ne cesse de s'amenuiser...

Peut-on en déduire que les Vikings n'ont guère arpenté la future Normandie ? Non. Trop de traces autres qu'archéologiques attestent d'une forme de présence; elles sont trop importantes pour être ignorées. De quoi s'agit-il ?

D'abord des nombreux textes du corpus historique médiéval, notamment les récits des chroniqueurs normands tels Dudo de Saint-Quentin (*Historia Normannorum*, fin du X^e siècle), Guillaume de Jumièges (*Gesta Normannorum ducum*, vers 1070), ou Wace (Roman de Rou, vers 1170), etc.; ou encore les sagas telle la *Heimskringla* (recueil de sagas écrites et compilées en Islande vers 1225). L'ensemble de ces textes témoigne de l'existence de Rol-

lon et de ses affiliés, et raconte, voire exalte, leurs actions, du reste si marquantes, qu'elles ne pouvaient qu'être enregistrées par les chroniqueurs médiévaux, tant en France, en Angleterre, qu'en Scandinavie.

Fossiles linguistiques

Il s'agit ensuite de très nombreux fossiles linguistiques, c'est-à-dire de mots d'origine norroise (vieux nordique) et anglo-saxonne dans les patois normands, mais aussi noms de lieux – les toponymes – ou autres noms de personnes – anthroponymes et ethnonymes – présents en Normandie.

Or que constate-t-on à les examiner ? Pour commencer, que les toponymes d'origine norroise sont extrêmement nombreux en Normandie, mais qu'ils ne sont pas répartis de façon homogène (voir la figure 6). La simple consultation des cartes régionales ou un regard sur les panneaux de signalisation suffit à prendre la mesure de cette réalité. Ainsi, tous ces cours d'eau et bourgades portuaires dont le nom s'achève en -bec (de *bekkr*, ruisseau), comme Caudebec, ou en -fleur (de *floi*, golfe), comme Honfleur, Harfleur ; tous ces noms de villes, de villages et de hameaux dont le nom s'achève en -tot (de *toft*, habitation) ou en -beuf (de *both*, cabane), comme Yvetot ou Elbeuf. On trouve aussi nombre de lieux-dits dont le nom dérive du norrois pour îlot ou prairie marécageuse, comme « le Homme » (de *holmr*, île, prairie entourée d'eau) ou « la Hogue » (de *haugr*, petite hauteur).

Ensuite, force est de noter que beaucoup de noms médiévaux (Robert le

Danois, Bernard le Danois...) ou patronymes régionaux (Anquetil (Asketil), Angot (Asgautr), Omont ou Osmont (Osmund), Toutain, Tostain (Thorstain), Ozouf, Turstin, Haugmard...) suggèrent un apport nordique sans doute non négligeable à la population indigène. De multiples anthroponymes norrois ou saxons se sont aussi fixés dans la toponymie. Ils servent souvent de radical dans un nom se terminant par le suffixe -ville, d'origine latine, qui désigne la *villa*, c'est-à-dire le domaine : ainsi Mondeville (*Amundi-villa*), etc.

Détail hautement significatif, nombre de toponymes incorporent des termes ou des noms non pas norrois, mais saxons, ce qui démontre que la composition ethnique des « Vikings » de la Seine, en d'autres termes des compagnons de Rollon, était mixte, comprenant sans doute des Scandinaves, des Saxons et des Anglo-Scandinaves issus de la colonisation viking dans les îles britanniques. Ainsi, *aeppl*, pomme en vieil anglais (la langue anglo-saxonne), se retrouve par exemple dans Auppegard, nom d'un village de Seine-Maritime, qui, jusque vers 1160, se nommait *Appelgart*, autrement dit « pommeraie » en saxon. Notons que Auppegard ou plutôt *Appelgart* a son correspondant exact dans la principale région de colonisation des Vikings d'Angleterre, le Yorkhire : *Applegarth*. Le cas de la commune de Flottemanville, dans la Manche, recèle un indice encore plus frappant de la présence de Saxons ou d'Anglo-Scandinaves parmi les compagnons de Rollon : le terme *flote-man* ne signifie en effet rien d'autre que « Viking », mais... en vieil anglais !

L'AUTEUR



Vincent CARPENTIER, archéologue, travaille à l'INRAP de Basse-Normandie.

5. LES TOMBES DE CHEF SOUS LES TUMULUS

sont typiquement vikings (ci-dessous – voir les flèches – deux exemples varègues à Staraja Ladoga, près de Saint-Petersbourg, en Russie). Le défunt s'y faisait incinérer dans un vaisseau, à bord duquel il partait pour l'au-delà avec armes et bagages, ainsi que, souvent, une captive ou une épouse sacrifiée. La seule tombe à barque jamais retrouvée en France le fut bien loin de la Normandie, sur l'île de Groix, en Bretagne (voir le cartouche). Fouillée en 1905, elle a livré les restes d'un chef viking accompagné en effet d'une jeune femme, ainsi qu'un riche mobilier funéraire.





6. LA CARTE DES FOSSILES LINGUISTIQUES SCANDINAVES avérés ou présumés en Normandie révèle trois zones d'influence. Tout d'abord, la plus grande partie de la Normandie ne présente que des toponymes gallo-francs (*en beige*). La grande densité de toponymes scandinaves près des côtes (*en orange*) suggère une colonisation rurale, ou du moins l'intégration de nombreux Vikings au tissu rural. Cette présence scandinave semble avoir été moins forte dans une troisième zone d'influence (*en vert*), située en arrière de la zone à forte implantation viking.

En Angleterre aussi

Le *Danelaw*, c'est-à-dire la partie de l'Angleterre anciennement soumise aux lois danoises, est une vaste région au Nord de Londres. Après la fondation d'un royaume viking, nombre de communautés danoises s'y sont installées à côté des anciennes communautés saxonnes. Leur influence est toujours forte dans les patois régionaux, et, comme en Normandie, elle est particulièrement évidente dans la toponymie, puisque tous les noms en *-by* (village), *thorp* (hameau) sont d'origine nordique. Il y a ainsi de très nombreux noms du type Kirby, ou Kirkby (village de l'église), qui sont comparables aux Criquetot normands (crique = église; tot = habitation), à ceci près que *-by* traduit plutôt une origine danoise et *-tot* plutôt une origine norvégienne.

L'empreinte linguistique viking est aussi particulièrement présente dans la sphère maritime (voir la figure 8), où tant de termes marins (vague, houle, crique, havre, flot...), nautiques (équipage, carlingue, hauban, arrimer, cingler, halier, flotte, mât, riper...) de construction navale (étambot, étrave, tillac, varangue, rouf, hune...) sont des francisations de mots norrois. Dans une moindre mesure, il en va de même dans la sphère halieutique, où tant de mots norrois (haveneau, orphie, marsouin, crabe, homard, baleine...) sont passés au normand, puis au français; finalement, l'empreinte linguistique viking est aussi présente, quoique beaucoup plus discrète, dans les sphères domestique (duvet, flâner, etc.), rurale ou encore sociale.

Tous ces nouveaux éléments de vocabulaire entrent en vigueur dès le XI^e siècle à l'écrit, sous des formes latinisées qui témoignent d'un emploi ordinaire et non d'une expression linguistique concurrente de la langue indigène, réservée à une élite étrangère. L'une des meilleures illustrations de ce processus réside sans doute dans les toponymes de la côte dont l'étude pointilleuse menée dans le Cotentin par le dialectologue René Lepelley, de l'Université de Caen, montre le lien étroit avec l'art du cabotage et de la navigation aux amers dans lequel excellaient les Vikings. Les noms que ces marins hors pair ont donnés aux rochers, aux caps, aux éléments marquants du paysage qui leur servaient de repères le long des côtes, se sont ainsi fixés jusqu'à nous dans un patrimoine commun, enrichi de l'empreinte scandinave.

D'autres vecteurs de ce lexique importé se manifestent dans des domaines plus spécifiques, comme l'institution du *warec* en vertu de laquelle le seigneur éminent d'une terre bordée par la mer avait droit de prise sur toutes les épaves rejetées au rivage, y compris les baleines dont le partage était précisément réglementé. On trouve également des mentions de baleiniers organisés, à l'époque ducale, en sociétés de *Walmans* dont le modèle, présent sur toutes les côtes des mers du Nord, était commun aux populations maritimes des mondes franc et scandinave, ce qui n'a pas manqué de favoriser la généralisation de ce mot d'origine nordique.

Ainsi, se dégage l'impression que l'empreinte laissée par les Scandinaves dans la langue franque correspond à des usages linguistiques adoptés par l'ensemble de la société et non par des immigrants plus anglo-scandinaves que nordiques... Tout cela nous amène à nous interroger sur les modalités de cette assimilation, dont le processus rapide ne se dévoile qu'à travers la réunion de tous les indices disponibles.

Ainsi, la « colonie » scandinave à l'origine du duché de Normandie n'a probablement pas compté plus de quelques milliers d'hommes, venus surtout du Danemark, bien que Rollon semble avoir été un aristocrate norvégien banni. Bon nombre de ses compagnons ont séjourné en Angleterre, voire sont nés dans le *Danelaw* (l'Angleterre scandinave, surtout danoise). Ensuite, parce que ces Vikings en expédition voyageaient « léger » à l'instar de tous les aventuriers, n'apportant en Normandie que leurs armes (provenant souvent d'Angleterre), ce qu'ils portaient sur eux, et... leurs bateaux, mais probablement rien de plus.

Cette remarque de bon sens explique la rareté du matériel importé, mais aussi la cartographie des fossiles linguistiques vikings. Certains secteurs de la Normandie (voir la figure 6), situés près des côtes et des principaux fleuves, se distinguent par une concentration élevée de mots et de noms scandinaves ou anglo-saxons. S'agit-il là de zones véritablement colonisées? La présence du terme *mansloth*, littéralement la « part d'un homme », dans deux actes vers 1030, pourrait peut-être renvoyer à l'organisation par Rollon d'une répartition des terres; en outre, la concentration en basse vallée de Seine de nombreux toponymes formés sur la forme *tuit* signifiant le « défrichement » (par exemple Le Thuit),

conforterait l'idée que les Vikings se sont intégrés dans le tissu rural de la basse vallée de Seine. Toutefois, on aurait tort d'y voir la preuve d'une authentique colonisation de peuplement homogène. Le fait que des toponymes qui se créent alors puissent être d'origine anglo-saxonne suggère plutôt l'arrivée d'une armée recrutée dans le monde anglo-scandinave. Du reste, les apports linguistiques vikings aux patois normands touchent très peu la sphère domestique, ce qui signale la quasi-absence des femmes scandinaves...

Intégration réussie

Ainsi, si la culture viking n'a pas laissé d'empreinte plus forte, et notamment dans quelques secteurs spécifiques, c'est bien parce que les nouveaux venus ont très rapidement adopté la langue et les coutumes locales ; leurs chefs se sont convertis au christianisme afin de s'assimiler aux élites franques et se sont implantés au sein ou à la tête de domaines préexistants, quelquefois rebaptisés pour l'occasion. On sait en outre que les mœurs réputées scandinaves, comme le concubinage *more danico* (de mœurs danoises) des premiers ducs de Normandie, n'étaient guère étrangères aux aristocrates francs...

De mères probablement gallo-franques, les enfants des Vikings de la première génération sont ainsi devenus très rapidement des sujets à part entière du roi carolingien. On s'en aperçoit aujourd'hui : l'histoire des origines du duché de Normandie tire ses caractères originaux non pas d'un processus de colonisation par la force, mais plutôt de l'assimilation rapide d'une minorité agissant au sein d'une culture continentale gallo-franque, qui s'est enrichie surtout d'un héritage technique et linguistique spécialisé en rapport avec l'origine maritime des nouveaux venus.

À compter du début du X^e siècle, l'espace correspondant à l'actuelle Normandie fut donc progressivement confié par le pouvoir carolingien à l'autorité d'une nouvelle élite anglo-scandinave, très dynamique militairement et politiquement parlant, incarnée par le personnage semi-légendaire de Rollon. C'est dire si les nouveaux arrivants ne venaient ni pour éradiquer ni même prendre la place des populations franques, mais plus modestement pour se faire une place parmi eux – au besoin par la force – dans un espace qui leur apparaissait disponible et riche en opportunités.

C'est d'ailleurs cette nuance fondamentale qui a conduit Lucien Musset, spécialiste de l'histoire médiévale scandinave et normande, à développer le concept de « colonisation d'encadrement », par opposition à la lecture catastrophiste du phénomène viking héritée de la dramaturgie chrétienne d'époque franque, puis récupérée ensuite par la pensée nationaliste et régionaliste. L'authentique exception historique de cette première Normandie fondée au X^e siècle réside donc d'abord et surtout dans sa longévité, liée à sa réussite militaire et politique. Au contraire, l'éphémère fondation normande de l'embouchure de la Loire n'a duré que 18 ans (entre 919 et 937). Bousculée quelque temps, l'aristocratie franque resta néanmoins toujours capable de vaincre les Normands en bataille rangée, de même d'ailleurs que les Bretons dès qu'ils s'unissent sous une même bannière.

Si, en 911, à la suite d'une longue période de contacts et d'affrontements, Charles le Simple a finalement offert aux Vikings de la Seine leur entrée officielle dans le tissu de l'aristocratie franque, c'est avant tout pour tirer profit de leur savoir-faire pour défendre les marches occidentales de la Neustrie contre les prétentions des Bretons et des autres pirates nordiques.



7. LE BERSERKER OU HOMME-FAUVE est un guerrier entré dans un état de fureur sacrée qui le rend notamment surpuissant, lui fait oublier tout risque et toute douleur. Ce personnage, mais aussi ce comportement des guerriers scandinaves et plus généralement germaniques, ont beaucoup fait pour la réputation terrifiante des Vikings. Ci-dessus, un homme-ours représenté sur une matrice de moulage d'appliques pour casques du VIII^e siècle découverte à Torslunda, en Suède.

✓ BIBLIOGRAPHIE

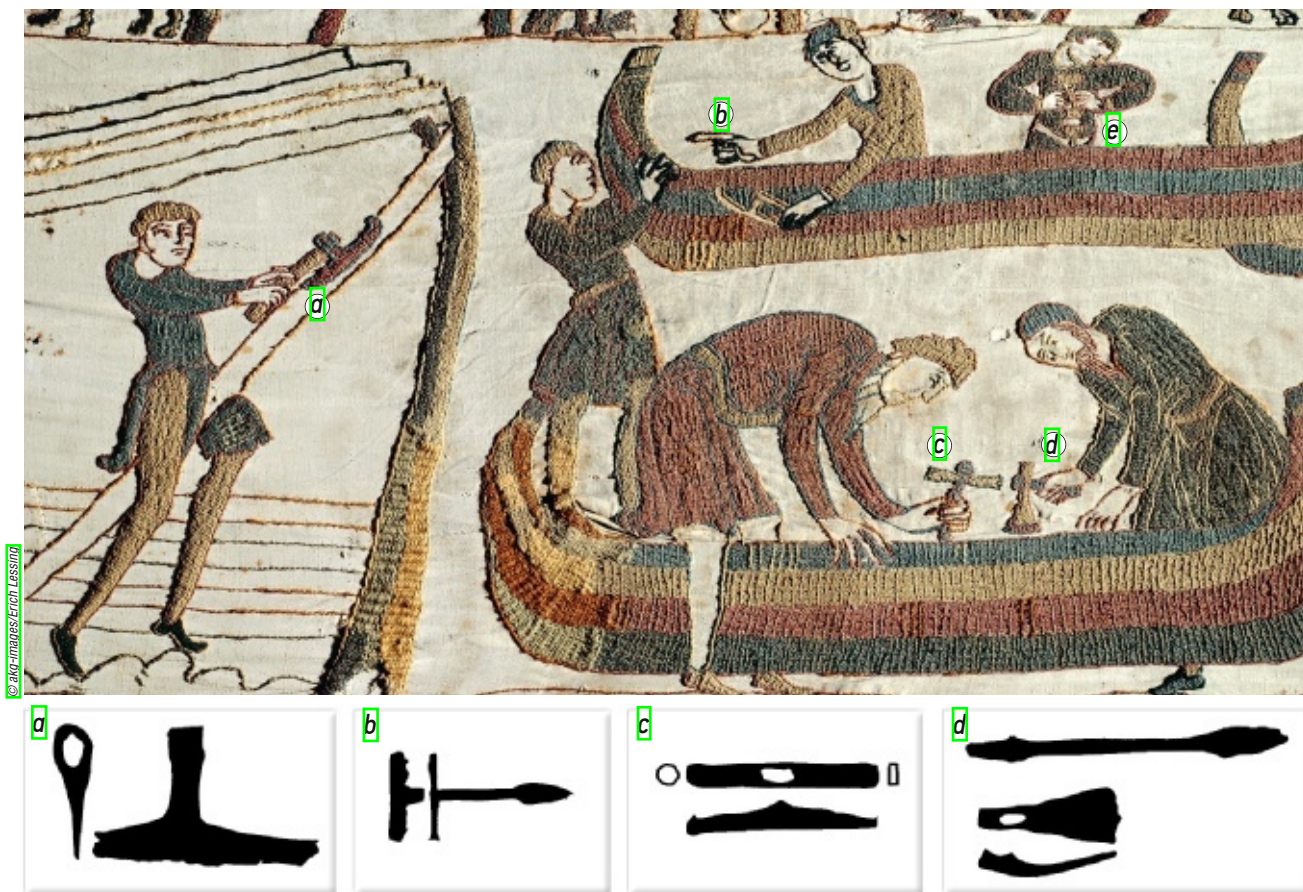
E. Riedel, *Les Vikings et les mots : L'apport de l'ancien scandinave à la langue française*, Errance, 2009.

L. Musset (dir.), *Nordica et normannica : recueil d'études sur la Scandinavie ancienne et médiévale, les expéditions des Vikings et la fondation de la Normandie*, Société des études nordiques, Paris, 1997.

J. Deuve, *La Fondation du duché de Normandie*, Éditions Charles Corlet, 1997.

R. Boyer, *Les Vikings*, Plon, 1992.

Traduction anglaise en ligne de la *Heimskringla* : <http://omacil.org/Heimskringla/>



8. L'INFLUENCE VIKING SUR LE PARLER DE NORMANDIE a été importante dans les domaines où ils ont apporté des innovations. Ainsi, tous les outils de charpentiers de marine retrouvés en Scandinavie ont la même forme que les instruments représentés sur cette scène de la tapisserie de Bayeux (XII^e siècle). La doloire servait à l'équarrissage et à la prépara-

tion des planches de bordage (a) ; un racloir servait à réaliser des moulures décoratives sur les bordages supérieurs (b) ; un petit marteau servait à la pose des chevilles ou gournables et des clous du bordé (c) ; une herminette était utile à la finition des bordés (d) ; une tarière à cuillère servait à forer les trous pour le chevillage des varangues (e).

À deux reprises, en 924 et 933, le premier territoire de Rollon fut ainsi augmenté vers l'Ouest, à mesure que les ennemis du roi franc reculaient sous les assauts des Normands engagés contre des troupes rivales en activité jusqu'au milieu du X^e siècle dans le Bessin et le Nord-Cotentin. Ces dernières, constituées de Vikings restés pirates, fondaient surtout leurs succès militaires sur la ruse et la rapidité, s'en prenant à des proies faciles et esquivant autant que possible les affrontements militaires défavorables en terrain découvert.

Un mode de vie que Rollon et ses descendants abandonnaient au contraire pour adhérer à celui de l'aristocratie franque. De fait, dès la deuxième génération des comtes normands (Guillaume Longue-Épée), la reconfiguration politique de la région est parachevée (après 933) et débouche sur une assimilation politique, culturelle et sociale. Elle s'accomplit grâce à l'adoption de la langue, de la religion et du droit francs, couplée à un jeu d'alliances matrimoniales dont

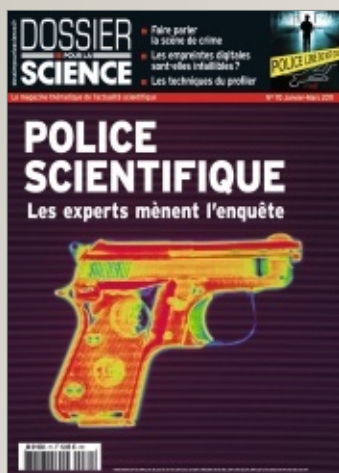
les prémices ont été discernées par Pierre Bauduin dès le IX^e siècle. Ainsi, au milieu du X^e siècle, les chefs normands sont devenus des élites « normanno-franques » que leur mode de vie ne permet plus de distinguer de leurs pairs de souche continentale, même si leurs origines sont parfois rappelées par un double patronyme. La part quasi légendaire accordée à l'activité militaire de cette nouvelle élite masque largement chez les chroniqueurs francs la dimension politique, économique et géographique de ses entreprises. Même si ces chroniqueurs nous les dépeignent comme une horde de guerriers surpuissants, les *berserkr* (voir la figure 7), les Vikings de la Seine forment dès la fin du IX^e siècle une véritable armée, suffisamment coordonnée pour se tailler une place sur l'échiquier politique carolingien.

Les faits sont là : de pirates, marchands et voyageurs, les aventuriers venus du Nord, se sont transformés en seigneurs francs. Les autres, les « sans grade », ont

fait souche dans la population locale, sans doute essentiellement dans ces espaces littoraux qui leur offraient un cadre de vie proche de celui qu'ils avaient quitté.

Aussi l'archéologie de la Normandie des X^e-XII^e siècles n'est-elle pas à proprement parler une archéologie normande, ni même viking, mais bien plutôt celle d'un territoire parmi d'autres du Nord-Ouest de l'Europe, d'obédience franque, dont les liens avec l'espace maritime, nautique, économique, politique et culturel compris entre l'Atlantique et la Baltique sont multiples et complexes. Dans ce renversement de perspective réside ce qui jusqu'alors apparaissait comme un paradoxe identitaire fondé sur une interprétation étroite des chroniques médiévales de l'époque ducale, dont le dessein premier était d'asseoir la légitimité dynastique. Des processus de métissage culturel, tel celui qui a produit la Normandie, se sont maintes fois répétés dans l'histoire européenne. Le temps est venu de leur donner leur importance réelle. ■

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE

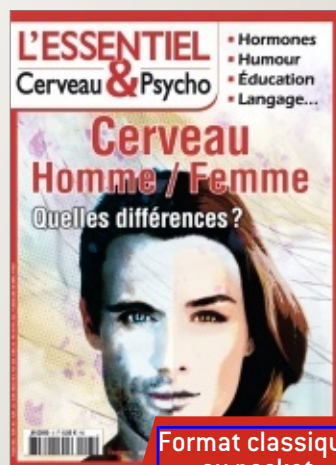


La police scientifique n'est pas une invention télévisée. Dans ce numéro entièrement dédié aux sciences criminalistiques, suivez les experts et observez comment ils travaillent aux côtés de la justice, quelles sont leurs méthodes, mais aussi pourquoi ils ne sont pas infailibles.

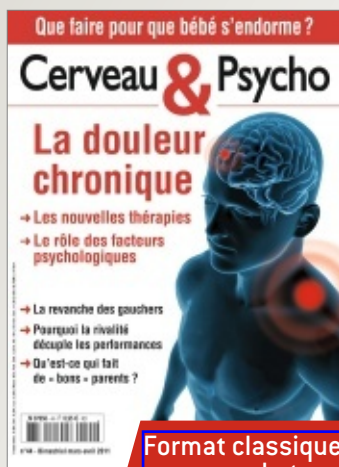
Numéro 70, janvier-mars 2011 – Prix de vente : 6,95 €

Les hommes et les femmes n'ont pas tout à fait le même cerveau ! Ils n'ont pas les mêmes comportements, le même sens de l'humour, le même attrait pour les sciences, les mêmes maladies. Pourquoi ? Gènes et environnement, hormones et éducation... De nombreux facteurs jouent un rôle.

Numéro 5, février-avril 2011 – Prix de vente : 6,95 €



Format classique ou pocket



Format classique ou pocket

Dompter la douleur chronique ? Aujourd'hui, c'est possible, car on connaît mieux les facteurs psychologiques en jeu, et de nouveaux traitements apparaissent. À lire également : quand doit-on s'inquiéter si un enfant dort mal ? Pourquoi le malheur des uns fait-il le bonheur des autres ? Et encore bien d'autres sujets...

Numéro 44, mars-avril 2011 – Prix de vente : 6,95 €

■ POUR LA
SCIENCE

Autisme

ATTENTION

aux charlatans !

Nancy Shute

Quand Jim Laidler et sa femme ont su que leur fils aîné était autiste, ils ont cherché de l'aide. Les neurologues leur avaient dit qu'ils ignoraient les causes de l'autisme et qu'ils ne pouvaient par conséquent pas faire de pronostic. Mais en recherchant sur Internet, les parents ont trouvé des dizaines de traitements « biomédicaux » promettant d'améliorer ou même de guérir leur fils qui ne pouvait ni parler, ni interagir socialement, ni contrôler ses mouvements.

Ils les ont alors essayés sur leur enfant. Ils ont testé la vitamine B6, le magnésium, les suppléments nutritionnels diméthylglycine et triméthylglycine, la vitamine A, les régimes sans gluten et sans caséine, l'hormone digestive sécrétine et la chélation, un traitement conçu pour éliminer le plomb et le mercure présents dans l'organisme. Ils ont même appliqué ces prétendues thérapies à leur second fils, lui aussi autiste.

La chélation ne sembla pas beaucoup aider. Il fut difficile d'identifier un quelconque effet de la sécrétine. Mais les régimes semblaient prometteurs: les parents emportaient des aliments spéciaux pour



leurs enfants partout où ils allaient. Et ils administraient aux garçons des dizaines de compléments alimentaires, augmentant ou diminuant les quantités selon chaque changement comportemental de leurs fils.

Bien sûr, leurs expériences ont échoué. Un jour, la maman arrêta de donner ses compléments à son aîné et attendit deux mois avant de le dire à son époux. Son silence prit fin le jour où l'enfant avala une gaufre sans autorisation. Ses parents le regardèrent avec angoisse, pensant qu'il régresserait dès l'instant où il s'écarterait de son régime. Mais ce ne fut pas le cas.

Les parents s'en doutaient depuis le début, car ils savaient que les traitements qu'ils utilisaient pour leurs enfants n'avaient pas été testés scientifiquement dans des essais cliniques. Mais l'espoir avait pris le pas sur le scepticisme (*voir l'encadré page 48*). Des centaines de milliers de

sant d'enfants sont diagnostiqués autistes selon des critères plus larges. Dans les années 1970, l'autisme, alors nommé psychose infantile, était un mélange de troubles sociaux et de retard intellectuel, et l'on considérait que le syndrome était rare. Quand un enfant de huit mois, par exemple, n'établissait pas de contact visuel, les pédiatres disaient à ses parents inquiets d'attendre de voir ce qui se passerait. Environ 5 enfants sur 10 000 souffraient alors d'autisme.

Ce chiffre a augmenté à mesure que les médecins ont redéfini le syndrome en trouble du spectre autistique, qui inclut des symptômes plus modérés. Quand le nouveau Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (ou DSM-IV) a été publié en 1994, les médecins ont ajouté le syndrome d'Asperger – une forme d'autisme sans retard initial de lan-

Le nombre d'enfants diagnostiqués autistes est en constante augmentation. Or aucun médicament efficace n'existe et seules les thérapies comportementales auraient un effet. Les parents se tournent vers des traitements douteux, souvent risqués.

parents succombent chaque année au même désir de trouver quelque chose – n'importe quoi – susceptible de soulager les symptômes de leur enfant en détresse : absence de langage et de communication, interactions sociales inexistantes, comportements répétitifs ou limités, tels battre des mains ou fixer un objet.

Pas de cause, pas de solution

Selon certaines études, près de 75 pour cent des enfants autistes reçoivent des traitements « alternatifs » qui n'ont pas été développés par la médecine. Mais ces « traitements » n'en sont pas. Leur innocuité et leur efficacité n'ont pas été testées, ils sont souvent coûteux et certains sont même délétères. Toutefois, en raison de l'augmentation récente des diagnostics d'autisme et de la préoccupation des parents, les financements publics et privés à la recherche ont augmenté, et l'on espère obtenir un jour de véritables résultats scientifiques.

Si la demande de traitements augmente, c'est parce qu'un nombre crois-

sant d'enfants souffrent de retard de développement – et d'autres conditions qualifiées de troubles envahissants du développement non spécifiés (*voir l'encadré page 49*). Cette définition est aujourd'hui validée par la Classification internationale des maladies, que la Haute autorité de santé en France recommande de suivre.

Les médecins prirent aussi conscience des bénéfices d'un diagnostic et d'un traitement précoces. En 2007, l'Académie américaine de pédiatrie a recommandé le dépistage universel de l'autisme pour tous les enfants âgés de 18 à 24 mois. La fréquence de l'autisme est aujourd'hui de 1 enfant sur 140. On ignore si l'augmentation du nombre de diagnostics reflète une réelle augmentation du nombre de cas. En effet, les causes de ce syndrome restent méconnues et, pour la plupart des patients, aucun facteur génétique n'a été mis en évidence, souligne David Amaral, directeur de recherche au *Mind Institute* de l'Université de Californie et président de la Société internationale pour la recherche sur l'autisme.

En outre, aucun marqueur n'est disponible pour dire quels enfants sont à risque

L'AUTEUR



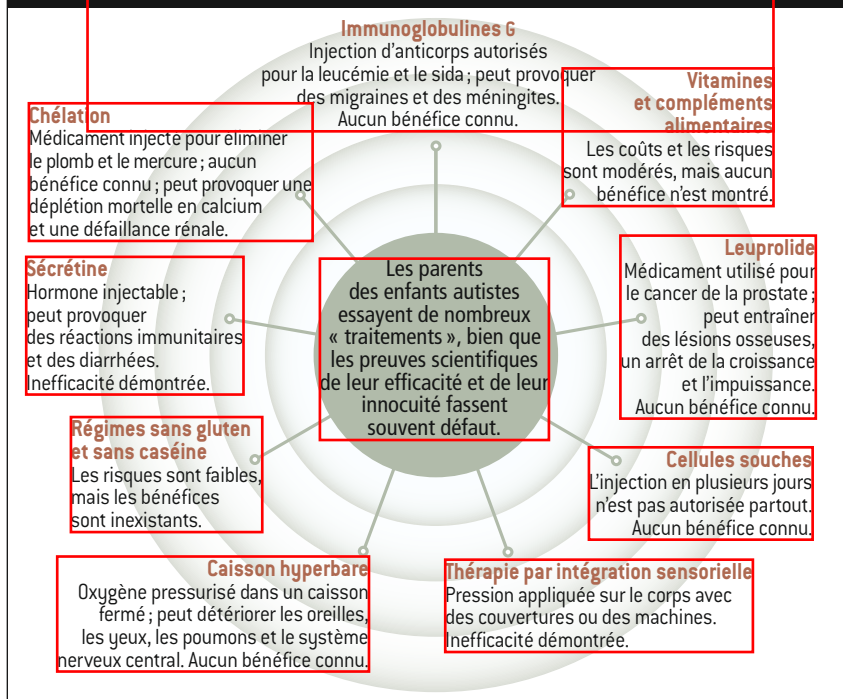
Nancy SHUTE est journaliste en neurosciences et en santé de l'enfant.

L'ESSENTIEL

- ✓ Trois quarts des enfants autistes reçoivent des traitements douteux, non validés scientifiquement.
- ✓ Même les médecins prescrivent des thérapies aux effets secondaires parfois graves et dont l'innocuité ou l'efficacité n'ont jamais été testées dans le cadre de l'autisme.
- ✓ Seule les thérapies comportementales amélioreraient les performances sociales et langagières des enfants, mais ces bénéfices sont minimes et mal démontrés.
- ✓ Toutefois, le financement de la recherche augmente. On découvre des gènes impliqués et on espère comprendre les causes de l'autisme, pour trouver des médicaments.

© SHUTTERSTOCK/MIKE

DES TRAITEMENTS ALTERNATIFS DOUTEUX



les pour avoir accès à ces structures est souvent très longue, notamment parce qu'il en existe peu. Et plusieurs études scientifiques ont montré que les effets de ces thérapies sont minimes, voire inexistantes.

Parmi les traitements non validés, on trouve aussi des médicaments. Certains médecins prescrivent des thérapies mises sur le marché pour d'autres pathologies. C'est le cas du leuprolide qui bloque la production de testostérone chez les hommes et d'estrogènes chez les femmes ; ce médicament est utilisé pour traiter le cancer de la prostate et pour « castrer chimiquement » les violeurs. Des médecins ont aussi prescrit un médicament anti-diabétique, la pioglitazone, et des injections d'immunoglobulines G, utilisées dans des cas de leucémie et de sida pédiatriques. Ces trois médicaments ont de graves effets secondaires et n'ont jamais fait l'objet de la moindre étude d'innocuité ou d'efficacité pour l'autisme.

La chélation, le traitement utilisé lors d'un empoisonnement au plomb, est un autre médicament commercialisé détourné en remède contre l'autisme. Cette technique piège le plomb, le mercure et d'autres métaux sous forme de composés inertes que l'organisme élimine dans les urines. Certains pensent que l'exposition à ces métaux, en particulier le méthylmercure utilisé comme conservateur dans les vaccins, peut provoquer l'autisme, bien qu'aucune étude n'ait montré un tel lien. Et le nombre de cas d'autisme diagnostiqués progresse toujours depuis que le méthylmercure a été supprimé de la plupart des vaccins en 2001. Or la chélation peut engendrer des défaillances rénales. En 2005, un enfant autiste de cinq ans est décédé après avoir subi une chélation par voie intraveineuse, à la suite d'une erreur de posologie.

En conséquence, l'Institut américain pour la santé mentale a annoncé en 2006 qu'il planifiait un essai clinique de la chélation dans l'autisme. Mais en 2008, l'Institut a renoncé, car les scientifiques n'ont trouvé aucune donnée convaincante d'un bénéfice direct, et parce que le traitement était trop risqué pour les enfants. En effet, plusieurs études ont montré des troubles cognitifs chez des rats subissant une chélation en l'absence d'empoisonnement par des métaux.

Jusqu'alors, l'essentiel de la recherche sur l'autisme a été mené dans le domaine des sciences sociales et de l'éducation spé-

ou pour évaluer l'efficacité des traitements. Et aucun médicament n'existe. La majorité des recherches (en France et aux États-Unis) concerne les interventions comportementales intensives conçues pour enseigner les interactions sociales et la communication ; ces traitements aident d'ailleurs les enfants à divers degrés, notamment s'ils sont pris en charge suffisamment tôt, mais leurs effets sont faibles et mal démontrés.

L'absence de thérapies validées de façon expérimentale rend la vente de traitements non testés facile pour les marchands d'espoir. Les parents sont souvent désespérés et prêts à tout pour que leur enfant aille mieux. Ils voient des progrès au fil du temps et ne les attribuent pas aux bonnes causes. Souvent, les améliorations comportementales de l'enfant ne résultent pas du traitement, mais du fait que les enfants grandissent et évoluent. Pourtant, de nombreux parents admettent qu'ils s'informent sur Internet et qu'ils font confiance à des rapports anecdotiques, qui présentent par exemple un seul enfant autiste allant mieux après l'un de ces traitements.

Les charlatans sont légion sur Internet. Par exemple, un site annonce aux parents qu'ils peuvent « vaincre l'autisme de leur enfant » en achetant un livre valant plusieurs centaines d'euros ; un autre montre le film d'une « petite fille autiste qui a progressé après avoir reçu une injection de cel-

lules souches ». En plus, l'espoir n'est pas bon marché. Des traitements alternatifs, tels des séjours dans des caissons hyperbares (utilisés pour traiter les accidents de décompression), qui augmentent temporairement la concentration d'oxygène dans le sang, coûtent une centaine d'euros par heure, et il est recommandé de faire une séance d'une ou deux heures par jour.

Un commerce lucratif

La thérapie par intégration sensorielle regroupe toutes sortes de procédures : envelopper les enfants dans des couvertures, les mettre dans des machines à câlins, ou les laisser jouer avec de l'argile parfumée... Elle coûte jusqu'à 200 euros par heure. Les consultations non médicales peuvent s'élever à plusieurs centaines d'euros, et les vitamines, les compléments alimentaires et des analyses biologiques, encore davantage. Le Réseau interactif sur l'autisme, de l'Institut Kennedy Krieger à Baltimore, a montré que les parents dépensent plusieurs centaines d'euros par mois.

Le seul traitement de l'autisme dont on sait qu'il est plus ou moins efficace, la thérapie comportementale, est aussi coûteux : environ 30 000 euros par an, voire plus. Ces frais sont souvent payés par l'État, si l'enfant est pris en charge par une structure médicale publique. Mais l'attente des famil-

cialisée, où les budgets sont modestes et les protocoles différents de ceux de la recherche médicale. Certains projets n'impliquent par exemple qu'un seul enfant. Toutefois, une étude publique est en cours aux États-Unis pour déterminer l'efficacité des traitements comportementaux; les résultats seront disponibles cette année.

Aucune preuve scientifique

Il y a peu de recherche scientifique concernant des traitements de l'autisme, et lorsqu'une étude a lieu, le nombre de patients impliqués est souvent faible. En 2007, la Collaboration Cochrane, une organisation internationale indépendante à but non lucratif qui évalue la recherche médicale, a analysé les bénéfices des régimes sans caséine, une protéine du lait, et sans gluten, une protéine du blé, bénéfices qui reposeraient sur le fait que certains composants de ces protéines interfèrent avec des récepteurs cérébraux. L'organisation a identifié deux essais cliniques, l'un incluant 20 participants et l'autre 15. La première étude a mis en évidence une petite diminution des symptômes autistiques; la seconde n'a rien montré.

En mai 2010, Susan Hyman, professeur de pédiatrie à l'École de médecine de l'Uni-

versité de Rochester, a réalisé une nouvelle étude auprès de 14 enfants suivant un régime; elle n'a trouvé aucun changement de l'attention, du sommeil ou des comportements caractéristiques de l'autisme.

Bien que les données scientifiques s'accumulent pour montrer que les régimes n'auraient pas d'effet sur le trouble du spectre autistique, il est difficile de changer l'opinion des gens. Autre exemple: la sécrétine, qui est devenue une substance prisée en 1998. Une étude avait alors montré que trois enfants avaient progressé dans le contact oculaire, la vigilance et l'utilisation du langage après administration de l'hormone lors d'un examen pour des troubles gastro-intestinaux. Les médias s'étaient fait l'écho des heureux parents qui racontaient la transformation de leurs enfants. L'Institut américain pour la santé des enfants et le développement humain a financé des essais cliniques: en mai 2005, cinq études montraient l'absence de bénéfice et l'intérêt pour la sécrétine s'est éteint en plusieurs années.

Toutefois, l'augmentation de la demande pour des traitements a un effet positif: elle stimule la recherche et les financements. En 2007, quand s'est tenue la première Conférence internationale pour la recherche sur l'autisme (IMFAR),

BIBLIOGRAPHIE

R. Anney *et al.*, A genome-wide scan for common alleles affecting risk for autism, *Human Molecular Genetics*, vol. 19, pp. 4072-4082, octobre 2010.

R. Toro *et al.*, Key role for gene dosage and synaptic homeostasis in autism spectrum disorders, *Trends in Genetics*, vol. 26, pp. 363-372, août 2010.

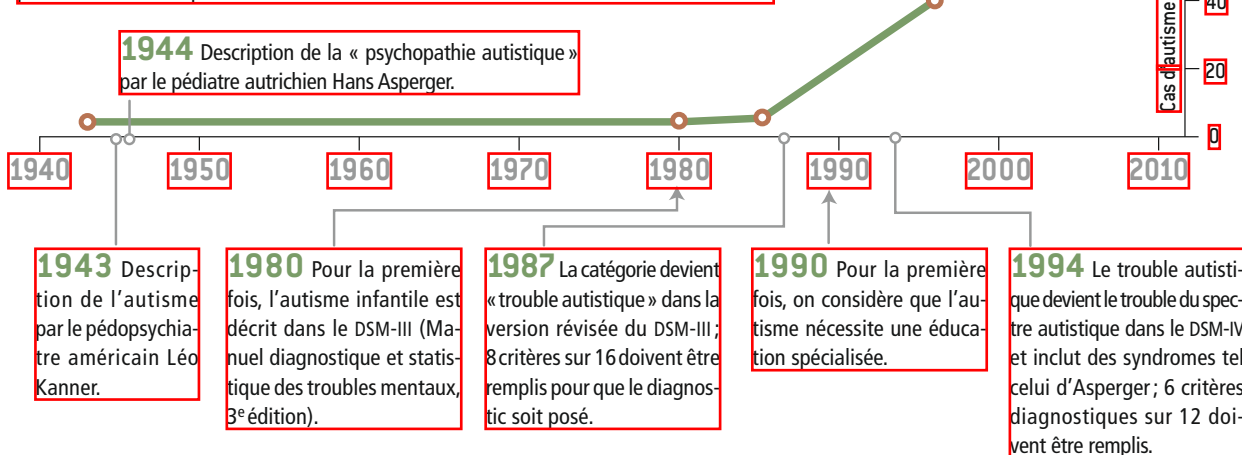
J. Green *et al.*, Parent-mediated communication-focused treatment in children with autism (PACT): a randomised controlled trial, *The Lancet*, vol. 375, pp. 2152-2160, juin 2010.

E. Andari *et al.*, Promoting social behavior with oxytocin in high-functioning autism spectrum disorders, *PNAS*, vol. 107, pp. 4389-4394, mars 2010.

M. B. Ospina *et al.*, Behavioural and developmental interventions for autism spectrum disorder: a clinical systematic review, *PLoS ONE*, vol. 3, e3755, novembre 2008.

UN NOMBRE D'ENFANTS DIAGNOSTIQUÉS AUTISTES EN AUGMENTATION

Des décennies durant, l'autisme a été considéré comme une maladie rare et une forme de schizophrénie. Une définition rigoureuse est apparue dans les livres de psychiatrie en 1980. Elle s'est élargie aux troubles du spectre autistique en 1994. En conséquence, un nombre croissant d'enfants ont été diagnostiqués; les écoles ont alors proposé des programmes d'éducation spécialisée (encore peu nombreux), les parents ont demandé de meilleurs traitements et les médecins ont prescrit un ensemble de plus en plus confus de thérapies non validées.



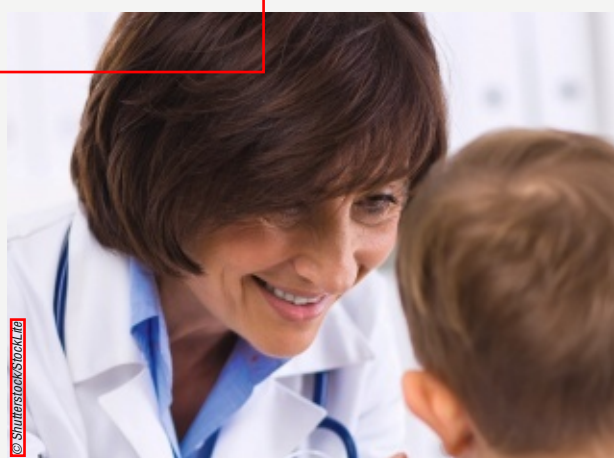
Les troubles du spectre autistique (l'autisme, le syndrome d'Asperger et les troubles envahissants du développement non spécifiés) recouvrent des tableaux cliniques très hétérogènes selon l'âge, l'intelligence, le langage et les maladies associées. Leur prévalence est passée de 4 pour 10 000 il y a 20 ans à 70 pour 10 000. Pour quelles raisons ? Les facteurs environnementaux qui ont fait l'objet d'études (les vaccins et les allergies) ne sont pas en cause dans cette augmentation. La raison en est plutôt que l'on a inclus dans la définition des individus d'intelligence élevée et bien adaptés socialement, ainsi que des troubles neuro-développementaux multiples correspondant aux critères actuels de l'autisme ; de plus, les sociétés sont davantage vigilantes à l'égard de cette condition et le diagnostic d'autisme est plus avantageux par rapport à d'autres troubles du développement pour obtenir de l'aide. En conséquence, l'incidence de la déficience intellectuelle dans l'autisme, autrefois attachée à cette condition, a fortement diminué ces dernières années.

Quels sont les signes de ces troubles ? Dans sa deuxième année de

vie, l'enfant ne babille pas, ne pointe pas, ne fait pas de gestes sociaux et communicatifs ou ne répond pas à son prénom. Puis il présente un retard dans l'apparition de mots simples ou de phrases de deux mots ; et à tous ces âges, on observe une régression de sa capacité langagière ou sociale. Quand il est plus âgé, on relève une diminution des gestes exprimant l'intérêt de l'enfant ou dirigeant l'attention de l'autre sur un objet d'intérêt, et un manque de contact visuel intégré à l'acte de communication, ainsi qu'une difficulté de compréhension du langage oral. Des intérêts ou des aversions spécifiques pour des stimulations perceptives ou des éléments spécifiques d'objet sont aussi notés. D'autres formes correspondant au syndrome d'Asperger se révèlent bien plus tard, par une limitation de la socialisation spontanée et l'existence d'intérêts spécifiques.

Des troubles génétiques

L'autisme est un trouble neuro-développemental, lié à une modification du fonctionnement synaptique et de l'organisation cérébrale, à de multiples niveaux. Cette modification est d'origine génétique. Elle en-



gendre un changement dans le traitement de l'information, depuis l'information perceptive élémentaire jusqu'à l'information sociale (visages, voix, mouvement), la perception et la mémoire de l'environnement et du langage, avec des effets soit délétères, soit avantageux. Pour les mécanismes génétiques, on est passé de l'hypothèse de l'interaction de quelques gènes à la possibilité d'une multitude de mécanismes, différents selon les individus, chacun pouvant être monogénique (n'ayant qu'un gène muté).

Est-ce l'absence de traitement valide qui justifie l'émergence constante de panacées frauduleuses ? Alors qu'on ne penserait pas

à « traiter » une trisomie 21, du fait que la modification génétique qui l'entraîne est définitive et irréversible, l'idée que l'on puisse traiter l'autisme reste ancrée dans les esprits. On la retrouve dans l'idée qu'un facteur environnemental est en cause et qu'il pourrait être supprimé.

On la retrouve aussi dans des méthodes telles que l'intervention comportementale intensive (ICI). Celles-ci visent à réamorcer les mécanismes cérébraux supposés atteints via le renforcement et la fragmentation des comportements à apprendre. Ces méthodes, contrairement à la rumeur, ne guérissent pas l'autisme, ont des effets imprévisibles et n'ont pas fait l'objet de

moins de 150 personnes étaient présentes. En mai 2010, 1 700 chercheurs, docteurs et représentants des parents assistaient à la même conférence. Les nouvelles techniques et la prise de conscience du public ont contribué à faire de l'autisme une question de santé publique.

En conséquence, depuis dix ans, le financement américain de la recherche sur l'autisme a augmenté de 15 pour cent par an, l'accent étant mis sur les applications cliniques. En 2009, les Instituts américains pour la santé ont attribué 132 millions de dollars aux recherches sur l'autisme et les fondations privées ajoutent quelques dizaines de millions supplémentaires. Au total, environ 27 pour cent des financements concernent la recherche de traitements, 29 pour cent la recherche des causes, 24 pour cent la biologie fondamentale et 9 pour cent le diagnostic.

Les nouveaux programmes vérifient aussi l'efficacité des interventions précoces par thérapie comportementale, qui enseignent des compétences sociales aux enfants au moment où leur cerveau est en phase d'apprentissage du langage et de l'interaction sociale. En novembre 2009, une étude a montré que les enfants soumis à deux années de thérapie comportementale à raison de 31 heures par semaine, en commençant entre 18 et 30 mois, ont augmenté leur quotient intellectuel et leurs compétences de langage.

Selon le Comité consultatif d'éthique, la France serait en retard, par rapport aux pays d'Europe du Nord et anglo-saxons, en ce qui concerne le diagnostic et l'accès à un accompagnement éducatif adapté. Malgré de nombreux rapports et des lois, les actions pour le traitement des troubles du spectre autistique sont encore

peu nombreuses dans le pays. En outre, aux États-Unis, le Réseau pour le traitement de l'autisme a créé un registre de plus de 2 300 enfants pour faire des recherches sur les traitements des complications médicales fréquentes chez les enfants autistes, notamment les problèmes gastro-intestinaux et les troubles du sommeil.

Mais ces études visant à trouver des médicaments risquent de se heurter à plusieurs obstacles. Certaines interventions médicales ont été décevantes. Par exemple, les antidépresseurs, qui augmentent la concentration de sérotonine dans le cerveau, diminuent les mouvements répétitifs des mains dans les troubles obsessionnels compulsifs ; en août 2010, on a montré qu'ils ne soulageaient en rien les mouvements répétitifs typiques de l'autisme.

Autres candidats : un médicament qui augmente l'ocytocine, une hormone qui

démonstrations scientifiques convaincantes; elles soulèvent d'importants problèmes éthiques et n'obtiennent, quand c'est le cas, que de faibles modifications comportementales. De plus, on ignore leurs effets à long terme et leurs éventuels effets négatifs sur l'apprentissage spontané de l'enfant. Enfin, les acquis obtenus ne tiennent pas compte du fait que les enfants autistes d'intelligence normale, le groupe pour lequel ces méthodes sont les plus efficaces, progressent souvent d'eux-mêmes, quel que soit leur environnement.

Alors que fait-on avec un enfant, puis un adulte autiste ? On ne le « soigne » pas, on l'élève et l'éduque, on le scolarise, en rendant son environnement suffisamment prédictible et compréhensible, et en le préservant des dangers extérieurs. Enfant, on met à sa disposition du matériel permettant d'exercer son intelligence, sa volonté d'explorer le monde et d'interagir avec autrui. À l'âge adulte, on l'aide à trouver un emploi et à être autonome.

Toutefois, on doit accepter que sa façon de jouer, les matériaux qui suscitent son intérêt et le rôle des parents sont très différents d'un autre enfant. Les informations qui l'intéressent ne sont pas enfantines,

centrées sur les personnages, le faire semblant, la variété, les joies partagées avec des pairs; elles sont techniques, centrées sur les fonctionnements des objets, la réalité physique, explorée dimension par dimension. On est aussi tolérant devant des manifestations de joie sous forme de mouvements répétitifs, ou de frustration sous forme de mouvements d'automutilation, le plus souvent bénins. On doit accepter que le langage oral soit en apparence exclu de ses interactions au début de la vie, et parfois pour toute la vie, ce qui n'empêche pas l'enfant autiste d'observer et de comprendre beaucoup de choses. Et il comprend souvent le langage écrit. En outre, son intérêt pour les autres enfants et l'intérêt des autres enfants pour lui n'occupent pas une place prépondérante dans son éducation.

Aider les enfants et les parents

Pour aider les parents dans ce parcours, il existe depuis peu des méthodes d'intervention plus légères que l'intervention comportementale intensive; elles s'appliquent souvent en milieu familial, ou lors de courtes séances où famille et enfant sont observés et aidés. Celles-ci bénéfi-

cient aujourd'hui d'une crédibilité scientifique supérieure à la thérapie comportementale intensive, du fait de larges essais cliniques. Elles visent à redonner aux parents les moyens de communiquer avec leur enfant, au lieu de juger ces derniers comme déviants par rapport à une norme communicative ou développementale.

Un enfant autiste devrait être scolarisé dans le système régulier. Plusieurs niveaux d'adaptation sont possibles, depuis la classe spéciale dans le système régulier jusqu'à l'aide individuelle. La fonction de l'aide sera d'individualiser les consignes et les évaluations académiques selon le niveau intellectuel et la compréhension des consignes, et d'aménager la façon de les transmettre. Dans les cas les plus extrêmes, un enfant autiste peut n'être accessible qu'à une seule tâche, directement inspirée de ses intérêts particuliers au moment de son entrée dans la classe; il s'agit ensuite d'élargir et de diversifier ses intérêts. Toutefois, la majorité des enfants autistes s'intéressent à l'acquisition des connaissances, et s'adaptent bien dans un cadre scolaire.

Alors que traite-t-on avec les médicaments ? L'autisme s'accompagne parfois, surtout à l'âge adulte

et dans les formes les plus verbales, d'anxiété, d'irascibilité et de dépression, qui peuvent bénéficier de traitements pharmacologiques. Et ces derniers ne changent pas les symptômes sociocommunicatifs de l'autisme. L'approche cognitivo-comportementale chez l'adulte qui parle consiste à travailler des attitudes bénéfiques et adaptatives, et à en supprimer d'autres qui lui nuisent ou nuisent à son entourage. Enfin, chez l'enfant, mais aussi chez l'adulte, une intervention sélective est la gestion de crise survenant en milieu familial, scolaire ou professionnel. Celles-ci seront abordées par une enquête, une explication de leur déclenchement et une adaptation du milieu aux particularités de la personne, comme c'est le cas pour les handicaps.

Ainsi, un enfant autiste grandira, se compliquera, étonnera ses parents et son entourage par une intelligence différente, avec le désir et la capacité de trouver une place sociale, et l'envie d'être heureux et un sentiment d'épanouissement personnel.

Laurent MOTTRON

psychiatre et chercheur à l'Hôpital Rivière-des-Prairies de l'Université de Montréal

stimule la lactation et dont on pense qu'elle favorise les liens mère-enfant. En février 2010, une équipe du CNRS a montré que 13 adolescents ayant un syndrome d'Asperger réussissaient mieux à identifier des photos de visages après avoir inhalé de l'ocytocine. Mais beaucoup reste à faire avant que l'on confirme que l'ocytocine améliore certains symptômes autistiques.

La recherche sur l'autisme progresse

La recherche sur les troubles du spectre autistique gagne du terrain dans les pays développés. En juin 2010, un consortium international de chercheurs, qui ont examiné les gènes de 996 enfants, a trouvé de nouveaux variants génétiques rares chez les enfants autistes. Certaines des muta-

tions détectées modifient des gènes impliqués dans la communication entre neurones. On pense d'ailleurs que des défauts dans les synapses, les points de contact entre neurones, seraient en cause dans l'autisme.

Le directeur de l'étude, Daniel Geschwind, de l'École de médecine David Geffen, à l'Université de Californie à Los Angeles, constate que les mutations diffèrent selon les enfants, mais qu'elles peuvent perturber les mêmes voies biologiques. Il a aussi créé une banque de ressources génétiques sur l'autisme, qui contient des échantillons d'ADN provenant de plus de 1200 familles où certaines personnes sont atteintes d'autisme.

Aujourd'hui, seule la thérapie comportementale repose sur quelques données scientifiques. Des milliers de parents espèrent que la science offrira un jour d'autres traitements.

✓ SUR LE WEB

Fondation FondaMental, réseau de coopération scientifique en santé mentale : <http://www.fondation-fondamental.org/>

Association autisme France : <http://autisme.france.free.fr/>

Fédération française sésame autisme, association de parents : <http://www.sesame-autisme.com/>

Site de Stephen Barrett, psychiatre en Caroline du Nord, qui examine les traitements douteux : quackwatch.com.

Scarabées en vol... téléguidé

Michel Maharbiz et Hirotaka Sato

Des chercheurs conçoivent de minuscules robots volants, mi-insectes, mi-machines. Ces hybrides du vivant et de l'électronique pourraient un jour sauver des vies en cas de catastrophes ou de guerres.



La mouche domestique est une merveille de génie aéronautique. L'une des raisons pour lesquelles cet insecte échappe avec tant de virtuosité à la tapette est que ses ailes battent très vite, environ 200 fois par seconde. Pour atteindre ce rythme stupéfiant, la mouche met en œuvre une biomécanique complexe. Ses ailes ne sont pas attachées directement aux muscles du thorax. En fait, de façon cyclique, la mouche tend et relâche ces muscles, qui entraînent une modification de la forme du thorax. Cette déformation périodique fait osciller les ailes, un peu comme un choc fait vibrer un diapason. La mouche parvient ainsi, avec très peu d'effort, à convertir une toute petite quantité d'énergie en mouvements complexes et rapides.

Des ingénieurs, encouragés par la miniaturisation des circuits informatiques et les techniques de microfabrication, ont fait de leur mieux pour construire de minuscules machines volantes qui imitent cette capacité de locomotion.

Le *Delfly Micro*, dévoilé en 2008 par des chercheurs de l'Université de technologie

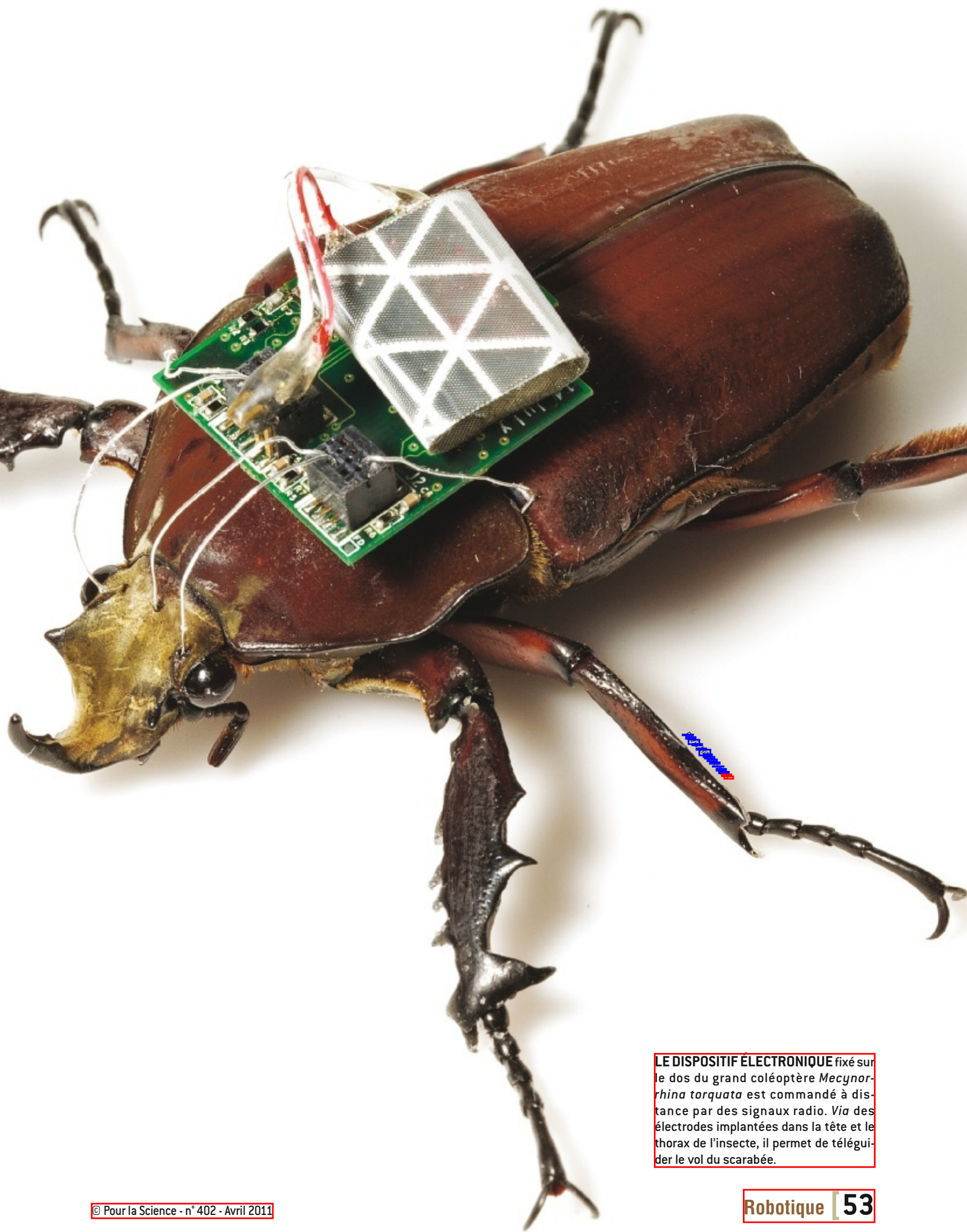
L'ESSENTIEL

- ✓ L'un des principaux obstacles à la mise au point de minirobots volants est que les piles actuelles ne permettent pas de les faire voler plus de quelques minutes.
- ✓ La télécommande d'insectes vivants, à l'aide d'électrodes implantées dans leurs circuits neuronaux et pilotées par ondes radio, permet de contourner le problème de la source d'énergie.
- ✓ Les insectes téléguidés intéressent beaucoup les militaires, mais ils pourraient aussi rendre de nombreux services dans le domaine civil.

de Delft, aux Pays-Bas, ne pèse que trois grammes, a des ailes de dix centimètres d'envergure et peut transporter une minuscule caméra vidéo. Le dispositif volant fabriqué au Laboratoire de microrobotique de Harvard est encore plus petit ; il pèse à peine 0,06 gramme (tout de même plus de quatre fois le poids d'une mouche...), mais une fois lancé, son vol ne peut être contrôlé. Le vrai talon d'Achille de ces insectes mécaniques est cependant la source d'énergie : personne n'a encore trouvé comment fabriquer une batterie assez petite et légère pour les alimenter en énergie pendant plus de quelques minutes.

Efficacité énergétique

Au cours des dernières années, nous avons pu contourner ces limites techniques. Au lieu de construire de toutes pièces un insecte robotique, nous utilisons les insectes eux-mêmes comme machines volantes. Nous pouvons ainsi nous passer des lourdes batteries et des techniques de microfabrication et nous concentrer uniquement sur des systèmes de commande



LE DISPOSITIF ÉLECTRONIQUE fixé sur le dos du grand coléoptère *Mecynorrhina torquata* est commandé à distance par des signaux radio. Via des électrodes implantées dans la tête et le thorax de l'insecte, il permet de téléguider le vol du scarabée.

fabriqués par l'homme, qui interviennent si nécessaire dans le vol des insectes.

En d'autres termes, l'insecte vole de lui-même, mais des circuits implantés dans son système nerveux lui ordonnent de tourner à gauche ou à droite, de monter ou descendre, etc., ces commandes étant transmises par des manipulateurs humains à distance. En fait, nous avons construit des cyberinsectes volants, mi-insectes, mi-machines.

L'idée nous en est venue il y a cinq ans, quand l'un de nous (M. Mahabiz) a participé à un atelier sur les cyberinsectes, organisé par la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*, l'agence de recherche militaire américaine). Les participants à l'atelier ont passé en revue certaines techniques permettant aux biologistes de recevoir et d'enregistrer des signaux électriques émis par des muscles d'insectes en vol libre.

Amit Lal, directeur des programmes de la DARPA, a jugé que c'était le bon moment pour tirer avantage de ces avancées en déterminant si l'on pouvait aussi transmettre des signaux électriques à ces muscles à l'aide de microcircuits implantés, qui les feraient bouger comme on le souhaiterait.

Les cyberinsectes ont potentiellement de nombreuses applications militaires ; l'une des plus importantes serait la possibilité de se renseigner sur les occupants d'un bâtiment ou d'une cave afin de décider du type d'intervention. Des hybridations entre circuits électroniques et circuits cérébraux auraient aussi beaucoup d'utilité dans le domaine civil, par exemple avec des insectes-robots capables de retrouver des survivants dans les décombres d'un tremblement de terre.

Avant 2005, les meilleures études décrivant le vol des insectes ont été réalisées

sur les criquets, les papillons de nuit et les mouches. Comment pouvions-nous nous appuyer sur ces travaux ? Les criquets et les papillons de nuit sont grands, mais ils ne peuvent pas porter beaucoup de poids. Restaient les mouches.

Mouches, scarabées, libellules : que choisir ?

Les mouches présentent de nombreux avantages. Tout d'abord, les biologistes en ont une bonne connaissance. Michael Dickinson, de l'Institut de technologie de Californie, et d'autres chercheurs ont déterminé de façon très détaillée quels muscles se contractent et à quels moments lorsque la mouche s'élève ou effectue un virage. En outre, les mouches utilisent l'énergie avec beaucoup d'efficacité, ce qui leur permet de battre des ailes et chan-

PLAN DE VOL TÉLÉCOMMANDÉ

Les auteurs utilisent des impulsions électriques bien réglées temporellement pour stimuler des régions relativement étendues de la circuiterie neuromusculaire des insectes et, ainsi,

diriger le vol de ces derniers. Ces impulsions électriques sont fournies par un dispositif électronique fixé sur l'insecte, dispositif qui est télécommandé à l'aide d'ondes radio.

Six électrodes de stimulation sont implantées dans le scarabée à proximité des lobes optiques gauche et droit, dans le cerveau, sur le thorax (électrode de référence), ainsi que dans les muscles basiliaires de vol, gauche et droit.

TÉLÉCOMMANDE DE VOL SANS FIL

Les chercheurs ont développé un système permettant de transmettre des commandes à des coléoptères volant librement, de façon similaire à des aéromodélistes qui télécommandent des avions ou hélicoptères miniaturisés.

Le montage de circuits imprimés (la batterie, de couleur argentée, est sur le dessus) achemine des impulsions électriques aux sites appropriés afin de démarrer le vol du coléoptère ou le stopper, de faire tourner l'insecte à droite ou à gauche, ou d'augmenter ou diminuer la puissance du vol.

L'antenne : un récepteur capte les commandes de vol et les transmet au dispositif électronique fixé sur le dos de l'insecte.

Mecynorrhina torquata

1,6 cm

Taille réelle

ger de direction à une vitesse étonnante. Toutefois, du point de vue technique, il est difficile de travailler avec ces insectes. Les mouches sont si petites que pour leur implanter des câblages et des circuits, il faut pratiquer de la nanochirurgie.

Quant aux libellules, elles volent bien et sont de taille suffisante, mais elles sont très fragiles. Les blattes étaient d'autres insectes envisageables...

La consultation d'un manuel de biologie des coléoptères, écrit par Roy Albert Crowson en 1981, nous a révélé que le vol des scarabées est très semblable à celui des mouches. Les muscles du thorax d'un coléoptère déforment sa carapace de telle façon que les ailes oscillent comme un diapason. Les types de muscles et leurs positions sur l'insecte paraissent également similaires à ceux des mouches. Le point peut-être le plus important est que les

coléoptères sont des insectes assez grands – entre un millimètre et plus de dix centimètres – et qu'ils ont une carapace lisse, sur laquelle il est facile de coller des éléments. De plus, on connaît plus de 350 000 espèces de coléoptères. En théorie, l'accès à de tels insectes devait être aisé. Mais il y avait trop peu d'éleveurs de coléoptères aux États-Unis pour couvrir nos besoins. Finalement, il a fallu des années avant que le laboratoire arrive à se fournir régulièrement en coléoptères, qu'il importe désormais d'éleveurs européens et asiatiques.

Notre objectif était de réussir à inciter à distance un insecte à voler, contrôler ses changements de direction et sa vitesse en cas de besoin, puis l'arrêter une fois atteint le lieu visé. En tant qu'ingénieurs, nous voulions que ces fonctions soient reproductibles et fiables, avec peu ou pas de dommages causés à l'insecte.

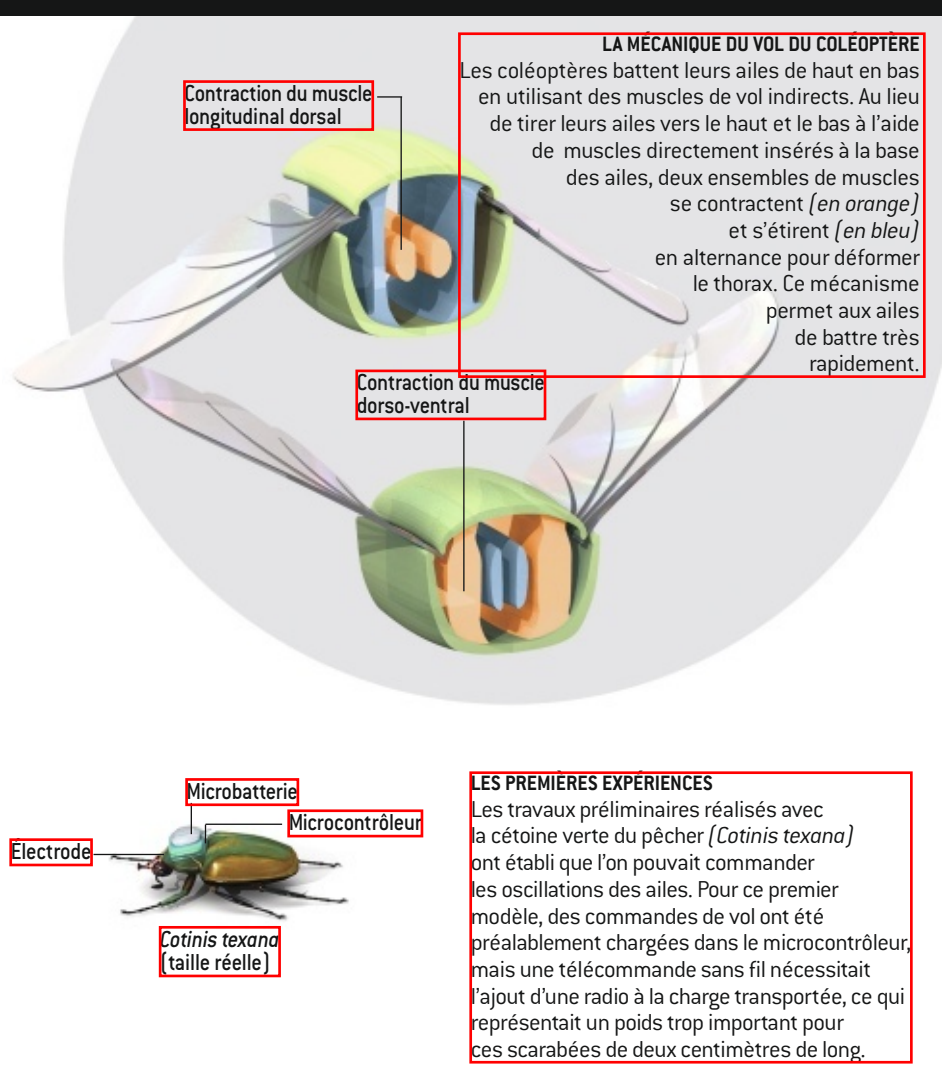
Il a d'abord fallu décider d'un ensemble minimal de comportements à contrôler. Nous ne voulions pas attacher les insectes à un fil pour régir leur comportement, comme d'autres l'ont fait; les attaches auraient été longues et se seraient enchevêtrées. Nous avons opté pour une télécommande radio, comme celle des aéromodélistes qui commandent à distance de petits avions ou hélicoptères. Nous voulions faire démarrer et stopper à la demande les battements des ailes, augmenter ou diminuer l'ascension de l'insecte en vol et le faire virer vers la gauche ou la droite. Nous ne voulions pas contrôler tous les aspects du vol de l'insecte, les coléoptères ayant déjà une bonne capacité à stabiliser leur vol en se calant sur l'horizon et à régler leur vitesse et leurs trajectoires en fonction du vent et des obstacles.

Stimuler les circuits neuromusculaires

En même temps, nous voulions nous assurer que nous pourrions envoyer des signaux directement dans les circuits neuromusculaires de l'insecte, de sorte que même s'il tentait de faire autre chose, nous pourrions envoyer une contre-commande. Tout insecte qui ignorerait nos commandes ferait un mauvais robot.

La plupart des coléoptères sur lesquels nous avons choisi de travailler peuvent transporter entre 20 et 30 pour cent de leur poids. C'est donc la taille de l'insecte qui détermine la taille maximale de notre équipement de commande. Comme nous savions quels sont les muscles de l'insecte qui font osciller ses ailes, il paraissait raisonnable de supposer que l'envoi de décharges électriques de différentes fréquences aux muscles d'un côté ou de l'autre du corps nous permettrait de modifier la trajectoire de l'insecte, en modulant son battement d'ailes.

Nous savions aussi que ces insectes utilisent largement des repères visuels durant le vol. Tout comme chez les humains, la lumière pénétrant dans les yeux des insectes stimule des neurones sensibles à la lumière. Les signaux engendrés par ces neurones passent par les lobes optiques (structures nerveuses directement liées aux yeux) et arrivent au cerveau et aux ganglions, qui les traitent et fournissent à l'insecte des informations visuelles pendant son déplacement. Nous savions aussi que la quantité de lumière



✓ SUR LE WEB

Vidéos disponibles en ligne
aux adresses :

[www.eecs.berkeley.edu/
~maharbiz/cyborg.html](http://www.eecs.berkeley.edu/~maharbiz/cyborg.html)

[www.frontiersin.org/
interactive_neuroscience/
10.3389/neuro.07/024.2009/
abstract](http://www.frontiersin.org/interactive_neuroscience/10.3389/neuro.07/024.2009/abstract)

[www.ScientificAmerican.com/
dec2010/cyborg_video](http://www.ScientificAmerican.com/dec2010/cyborg_video)

avait beaucoup d'importance. Par exemple, si l'on éteignait brusquement la lumière dans une pièce, nos coléoptères s'arrêtaient de voler sur-le-champ ; cela signifie que les insectes ont besoin de recevoir des données visuelles pour continuer à battre des ailes.

Nous en avons déduit que la stimulation des lobes optiques ou des régions situées à leur base pourrait déclencher de fortes réponses locomotrices. Comme l'implantation d'un dispositif de stimulation directement dans l'œil ou le lobe optique lui-même affecterait la capacité de manœuvrer de l'insecte, nous nous sommes concentrés sur les régions situées à la base des lobes. Il n'était pas nécessaire de stimuler des neurones uniques. En appliquant juste une impulsion électrique appropriée à proximité de la base des lobes optiques, les propres circuits neuronaux du coléoptère se chargeaient du reste et l'insecte s'envolait.

Il y a eu de nombreux faux départs avant notre premier vol réussi. Initialement, nous avons travaillé pendant six mois avec des *Zophobas morio* (longs de 1,5 centimètre et pesant un gramme), coléoptères dont la larve est communément nommée ver de

farine géant. Ces insectes se trouvent en animalerie, leurs larves étant utilisées comme nourriture pour les geckos et autres petits reptiles de compagnie.

Malheureusement, nous n'avons jamais pu les faire voler. Nous les avons lancés en l'air des centaines de fois, ils refusaient d'ouvrir leurs ailes. Apparemment, *Zophobas* n'aime tout simplement pas beaucoup voler. C'était un échec, mais en tout cas nous avons beaucoup appris sur l'anatomie des insectes grâce à *Zophobas*.

Des tâtonnements

Finalement, nous sommes passés à la cécatoine verte du pêcher (*Cotinis texana*), un scarabée répandu dans le Sud-Est des États-Unis qui mesure 2 centimètres et pèse entre 1 et 1,5 gramme. *Cotinis texana* est un insecte volant bien connu, sans parler du fait que c'est un nuisible pour les producteurs de fruits. Pendant plusieurs années, nous en avons collecté des milliers chez les producteurs, qui avaient du mal à croire que nous leur offrions cinq dollars par scarabée pour les en débarrasser.

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

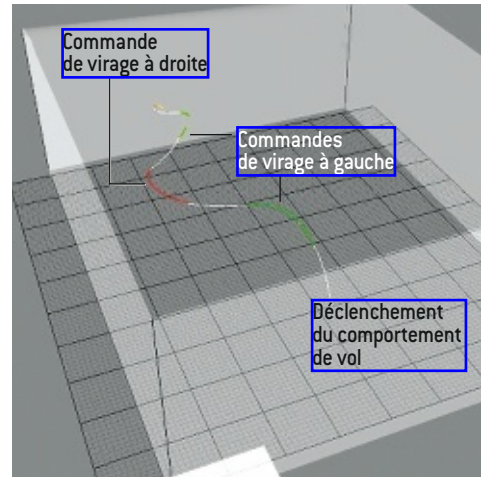
DREAM ON - Radio France / Christophe Abramowitz

Actuellement, le système de base comprend les composants suivants : un microcontrôleur avec une radio intégrée (pour la réception des instructions), une batterie (qui applique des impulsions électriques) et plusieurs fils en argent très fins (de 125 micromètres de diamètre), implantés dans le cerveau et dans les muscles intervenant dans le vol.

Il nous a fallu deux mois pour obtenir notre premier succès avec *Cotinis*. Au bout de plusieurs expériences, nous avons trouvé une zone de neurones relativement étendue qui, après stimulation électrique, permettait de produire des modulations de vol reproductibles et prévisibles.

Quoi qu'il en soit, nous avons déterminé que la stimulation d'une région du cerveau de l'insecte, située juste entre les lobes optiques gauche et droit, par des impulsions électriques rapides (d'une durée de 10 millisecondes environ, soit une fréquence de 100 hertz), fait battre des ailes l'insecte et lui fait adopter une posture correcte de vol dans 97 pour cent des cas. Tout aussi intéressant, une impulsion

Les chercheurs du laboratoire de M. Maharbiz mettent à l'épreuve leurs coléoptères-robots dans une pièce spécialement équipée (*ci-dessous, avec H. Sato debout*). La trajectoire de vol figurée à droite a démarré (*ligne blanche en bas à droite*) en stimulant les lobes optiques du scarabée, ce qui déclenche un comportement de vol. Les impulsions électriques appliquées au muscle basilaire droit (ou gauche) font tourner l'insecte à gauche (ou à droite). Le vol s'est interrompu (*en haut à gauche*) lorsque les lobes optiques ont reçu une impulsion plus longue que la première.



Svetoslav Kolev et Nimbus Goehausen, University of California, Berkeley

**Comme avec un bouton
marche/arrêt...**

Nos impulsions électriques étaient efficaces même si on les répétait, quelle que soit l'activité de l'insecte au moment où on les appliquait. Si le scarabée était en train de marcher sur une table, ses ailes se mettaient à battre et il s'envolait quand on lui envoyait des impulsions électriques de dix millisecondes. Quand nous le posions sur le dos, pattes en l'air sur la table, et qu'une impulsion était appliquée, il battait des ailes en position renversée. S'il était déjà en train de voler et que nous lui appliquions une impulsion supplémentaire, ses ailes s'arrêtaient et il tombait, puis il continuait en rampant.

Nous avons aussi constaté qu'en appliquant des signaux marche/arrêt de façon répétée et très rapprochée pendant que l'insecte volait, nous pouvions moduler les oscillations des ailes. En d'autres termes, une fois l'insecte en vol, l'envoi de commandes rapides marche/arrêt les unes après les autres n'arrêtait pas les oscillations des ailes, mais les ralentissait un peu. Cela modifiait la poussée des insectes et nous permettait de contrôler de façon fiable la puissance déployée par les scarabées pour voler, un peu comme les pilotes d'avions utilisent la commande des gaz pour contrôler leur appareil.

Plus tard, nous avons commencé à utiliser de grandes cétoïnes africaines,

LES AUTEURS



Michel MAHARBIZ est professeur de génie électrique et d'informatique à l'Université de Californie à Berkeley (États-Unis). Hirotaka SATO travaille dans son laboratoire.

de l'espèce *Mecynorrhina torquata* : pesant huit grammes, elles conviennent bien pour porter à la fois la radio et les charges que nous avons développées.

Aussi spectaculaires que puissent être certains de ces résultats, les efforts sont à poursuivre. Certes, nous avons montré que nous pouvons faire tourner un scarabée à gauche et à droite et lui faire parcourir des trajectoires à peu près circulaires. Mais l'objectif à terme est de guider le vol d'un scarabée suivant des schémas complexes en trois dimensions, de façon que l'insecte puisse contourner des obstacles, par exemple descendre le long des cheminées et remonter des tuyaux.

Pour ce faire, nous avons ajouté à la charge transportée de minuscules microphones, qui enregistrent les battements d'ailes de l'insecte en vol. Quand le son atteint un niveau donné, indiquant généralement quand l'aile est en position haute

enregistrements à haute fréquence de scarabées en vol. Il s'agit de cartographier la configuration tridimensionnelle et la fonction de certains autres muscles qui gouvernent l'orientation des ailes. À partir de ces données, nous visons maintenant différents muscles susceptibles de nous permettre de contrôler les mouvements de roulis et de tangage de façon plus indépendante.

Devons-nous fabriquer des scarabées-robots ?

La question de savoir si des insectes télécommandés seront utiles comme robots ou non est ouverte, mais nous pressentons que tel sera le cas. Des radios et des microcontrôleurs plus petits et de faible puissance continueront à apparaître sur le marché et nous permettront de contrôler mieux et plus finement nos cyber-scarabées. Tant qu'il sera difficile de développer de petites sources d'alimentation artificielles ou de construire des ailes mécaniques très économes en énergie, nos scarabées et leurs muscles super-efficaces auront un net avantage sur des objets volants entièrement fabriqués par l'homme.

Parmi toutes les applications que pourraient avoir nos travaux, nous pensons que la plus essentielle est la suivante : à mesure que la technologie informatique se miniaturise et que la connaissance des systèmes biologiques progresse, nous serons de plus en plus tentés d'introduire des interfaces et des boucles de contrôle dans des systèmes biologiques existants. La mise au point des détails en commençant par des insectes nous évitera de commettre des erreurs en procédant sur des organismes supérieurs tels que le rat ou la souris, voire l'homme. Cela nous permet aussi de repousser à plus tard de nombreux problèmes éthiques plus profonds, qui concernent notamment le libre arbitre, problèmes qui deviendraient plus pressants si ces travaux étaient réalisés chez des vertébrés.

Le développement de cyberinsectes ne remplacera pas la démarche fondamentale qui consiste à concevoir et construire des robots entièrement artificiels. Toutefois, ce type de travaux relève d'une démarche plus générale consistant à relier des tissus vivants à des dispositifs artificiels, que ce soit dans un contexte biologique, médical ou robotique. Et cette approche visant à atteindre une fusion parfaite entre éléments biologiques et éléments synthétiques n'en est qu'à ses débuts. ■

LA DÉMARCHE VISANT À ATTEINDRE

une fusion parfaite entre éléments biologiques et éléments fabriqués par l'homme n'en est qu'à ses débuts.

ou basse du battement, nous pouvons appliquer des impulsions de stimulation précises aux muscles directeurs du scarabée, pour les contrôler plus finement.

À ce stade, le matériel fonctionne très bien, mais nous avons besoin d'aide pour les programmes informatiques qui contrôlent nos coléoptères. Nous avons fait appel à certains de nos collègues ayant plus d'expérience sur les logiciels d'objets volants entièrement fabriqués. En s'appuyant sur ses travaux relatifs à des hélicoptères autonomes, Pieter Abbeel, de l'Université de Californie à Berkeley, avec ses étudiants Svetoslav Kolev et Nimbus Goehausen, développe un système de contrôle pour insectes, qui décompose les commandes complexes (telles que « changer le cap de 20 degrés ») en leurs éléments constitutifs (comme « appliquer des impulsions de dix millisecondes au muscle basilaire droit pendant tant de secondes »). Un utilisateur n'aura alors plus qu'à entrer certaines corrections de route et le microcontrôleur prendra en charge les stimulus nécessaires pour faire voler l'insecte dans cette direction.

Pour déterminer quelle doit être cette série de stimulus, nous faisons appel à l'imagerie par résonance magnétique, à des examens anatomiques approfondis et à des

BIBLIOGRAPHIE

H. Sato et al., Remote radio control of insect flight, *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 3, article 24, 5 octobre 2009.

N. Ando et al., A dual-channel FM transmitter for acquisition of flight muscle activities from the freely flying hawkmoth, *Agrius convolvuli*, *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 115(2), pp. 181-187, 2002.

M. H. Dickinson et al., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, *Science*, vol. 284, pp. 1954-1960, 1999.

H. Fischer et al., A radiotelemetric 2-channel unit for transmission of muscle potentials during free flight of the desert locust, *Schistocerca gregaria*, *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 64(1), pp. 39-45, 1996.

La sélection **POUR LA SCIENCE**

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



Le plus grand des hasards Surprises quantiques

Jean-François Dars et Anne Papillault

Comment pensent et à quoi rêvent les physiciens quantiques ? Soixante-cinq d'entre eux, couverts d'honneurs ou abordant leur thèse, racontent leurs hésitations, leurs angoisses, leurs efforts, leurs fatigues, leurs fureurs, leurs espoirs... Un témoignage précieux sur une science intrigante, accompagné de superbes photographies de ces chercheurs de l'extrême.

978-2-7011-5605-7 • 224 p. • 20,00 €



Les déchiffreurs Voyage en mathématiques

Jean-François Dars, Annick Lesne et Anne Papillault

Qui sont les mathématiciens ? Comment travaillent-ils ? Qu'est ce que l'intuition ? Autant de réponses que de questions dans cet ouvrage, où une cinquantaine de chercheurs, professeurs mondialement reconnus, médailles Fields ou jeunes thésards, proposent leur vision des mathématiques. Une plongée dans l'intimité de la création mathématique.

978-2-7011-4737-6 • 208 p. • 20,00 €



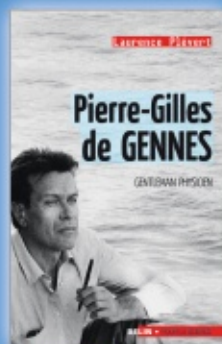
C. Ray et J.-C. Poizat

978-2-7011-4552-5 • 160 p. • 23,50 €



G. Pietryk

978-2-7011-3972-2 • 304 p. • 27,50 €



L. Plévert

978-2-7011-5228-8 • 368 p. • 23,00 €



B. Valeur

978-2-7011-4751-2 • 160 p. • 23,90 €



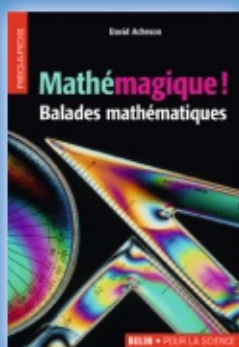
J.-P. Delahaye

978-2-8424-1825-0 • 224 p. • 24,00 €



J.-P. Delahaye

978-2-8424-5090-8 • 192 p. • 24,00 €



D. Acheson

978-2-7011-4285-2 • 176 p. • 18,50 €



N. Gauvrit

978-2-7011-4622-5 • 240 p. • 25,00 €



Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr

Mercurre :

une planète dans la fournaise

Scott Murchie, Ronald Vervack Jr. et Brian Anderson

Après trois survols, la sonde MESSENGER s'est mise en orbite autour de Mercure pour observer en détail cette planète méconnue.

Avec un diamètre 2,5 fois plus petit que celui de la Terre et un vingtième de sa masse, Mercure est la plus petite planète du Système solaire. C'est aussi la plus proche du Soleil : son orbite, la plus excentrique de toutes, s'en approche jusqu'à 46 millions de kilomètres et s'en éloigne de 70 millions. C'est le seul objet du Système solaire où trois jours durent deux années. La température à sa surface varie de 600°C entre le jour et la nuit. Cette étonnante planète rocheuse, formée de la même façon et à la même époque que les autres planètes du Système solaire interne – Vénus, la Terre et Mars –, renferme sans doute une part du secret de leur naissance.

Pour autant, Mercure est la moins explorée des planètes intérieures. Vue de la Terre, elle est toujours très proche du Soleil, et dissimulée aux télescopes par l'éclat de notre astre. Profondément enfoncée dans le potentiel gravitationnel du Soleil, elle représente aussi un défi pour les missions spatiales. Ce n'est que le 29 mars 1974 que la sonde spatiale *Mariner 10*, en survolant pour la première fois Mercure, a livré le premier aperçu correct de ce minuscule enfer. Elle y a découvert l'un des plus grands bassins d'impact du Système solaire, le bassin *Caloris*, ainsi que l'existence d'un champ magnétique et la présence d'une atmosphère très ténue (ou exosphère). Mais ce survol et les deux autres qui ont suivi à un jour mercurien d'intervalle n'ont permis d'obtenir des images que d'un seul hémisphère. La moitié du bassin *Caloris*, en par-

ticulier, restait masquée par l'obscurité. Il aura fallu attendre 34 ans et des progrès notables en matière d'ingénierie spatiale pour apercevoir le bassin éclairé dans son intégralité. Le 14 janvier 2008, après un voyage de trois ans et demi, la sonde américaine MESSENGER a survolé Mercure, et la première image transmise était pratiquement centrée sur le bassin *Caloris*. La surface ressemblait à une image de la Lune en négatif : les cratères rappelaient ceux de notre satellite, mais au lieu d'être rempli de lave sombre, *Caloris* est occupé par des plaines claires. Cette différence est encore mal comprise.

Ce 18 mars, la sonde MESSENGER devrait avoir réalisé ce que *Mariner 10* n'a pas pu faire : se mettre en orbite autour de Mercure pour étudier la planète en détail pendant environ un an. MESSENGER (pour *MERcury Surface, Space ENvironment, GEOchemistry and Ranging*, ou Surface, environnement spatial, géochimie et localisation spatiale de Mercure) est conçue pour répondre à six questions principales : quelle est la composition de la surface de Mercure ? Quelle est l'histoire géologique de la planète ? Comment une planète aussi petite peut-elle être dotée d'un champ magnétique global ? Son noyau métallique est-il encore fondu ? Les zones où la signature radar est très brillante et qui ont été détectées aux pôles de Mercure abritent-elles de la glace ? Quels processus dominent l'atmosphère ténue de la planète ? La mission MESSENGER devrait enfin terminer ce que *Mariner 10* n'avait fait qu'à moitié.

L'ESSENTIEL

✓ Seulement une fois et demie plus grande que la Lune, Mercure présente néanmoins certaines caractéristiques de la Terre, comme un champ magnétique global et des signes d'activité géologique datant d'un milliard d'années.

✓ En 2008 et 2009, la sonde MESSENGER a effectué les premiers survols de Mercure depuis les années 1970. Elle a livré les premières images complètes d'un hémisphère qui n'avait jamais été vu en entier, et a détecté la riche activité de la magnétosphère.

✓ Le 18 mars, elle s'est placée en orbite autour de Mercure. Une année d'observation détaillée commence.

DOIT FORBES

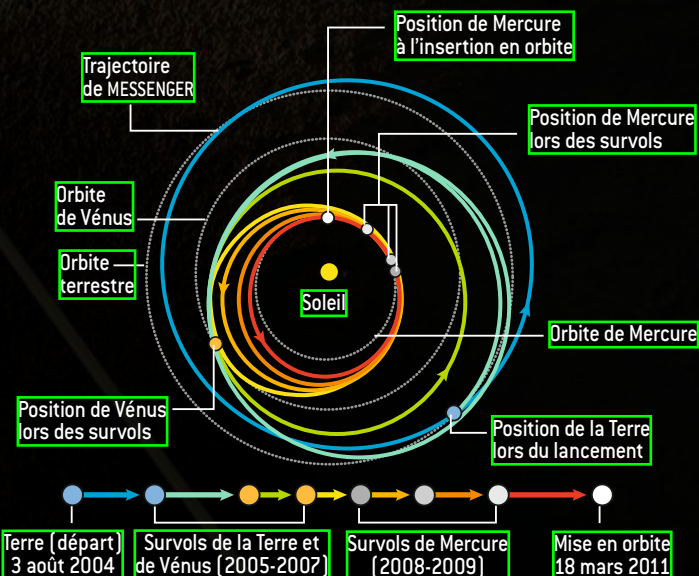
UNE DESCENTE AUX ENFERS

Une des raisons pour lesquelles il a fallu trois décennies pour organiser la suite de la mission *Mariner 10* est qu'atteindre Mercure et y survivre représentent de sérieux défis technologiques. Une sonde placée sur une trajectoire directe vers Mercure tombe dans le champ gravitationnel du Soleil et atteint une vitesse qui dépasse de 13 kilomètres par seconde la vitesse orbitale de Mercure. Un moteur classique est incapable de ralentir la sonde suffisamment pour qu'elle soit capturée en orbite par le champ gravitationnel de la planète. En termes d'énergie, la planète Mercure est plus difficile à atteindre que Jupiter, même si cette dernière est bien plus éloignée.

Pour parvenir à se mettre en orbite, la sonde MESSENGER a suivi une trajectoire complexe, en survolant d'abord la Terre, puis deux fois Vénus, et enfin trois fois Mercure avant de se mettre en orbite. À chaque survol, une partie de la quantité de mouvement de la sonde était transférée à la planète. Cet effet de « fronde gravitationnelle » est d'habitude utilisé en sens inverse pour accélérer les sondes vers les planètes extérieures. Dans ce cas, il a permis à la sonde de ralentir de 11 kilomètres par seconde en six ans et demi. Cette trajectoire restait néanmoins gourmande en énergie. La sonde est pour l'essentiel un « réservoir volant » : au lancement, sa masse totale s'élevait à 1 100 kilogrammes, dont 600 de combustible ❶. Atteindre Mercure n'était que la moitié de la difficulté. Au niveau de l'orbite de Mercure, le Soleil est jusqu'à 11 fois plus brillant que sur Terre, et la surface de la planète atteint des températures assez élevées pour faire fondre le zinc. Pour s'en prémunir, le vaisseau est abrité derrière un bouclier thermique ❷ en fibres de céramique tissées. Les panneaux solaires ❸ dépassent évidemment de ce bouclier mais, bien qu'ils soient conçus pour fonctionner à des températures élevées, ils sont fortement inclinés pour n'absorber qu'une petite fraction de la lumière solaire et éviter la surchauffe.

Les instruments doivent également être exposés pour observer la surface. Pour supporter la température, la caméra ❹ est installée sur un bloc de 400 grammes de paraffine. Quand la sonde est basse sur son orbite, la paraffine fond, absorbant de la chaleur ; quand la sonde est en altitude ou du côté nuit, la paraffine regèle jusqu'au prochain survol.

Autre défi, Mercure tourne très lentement sur elle-même. Un jour sur Mercure dure 176 jours terrestres. Ainsi, de nombreux sites ne seront visibles sous un angle d'observation idéal que pendant quelques courtes périodes durant cette mission d'une année terrestre.

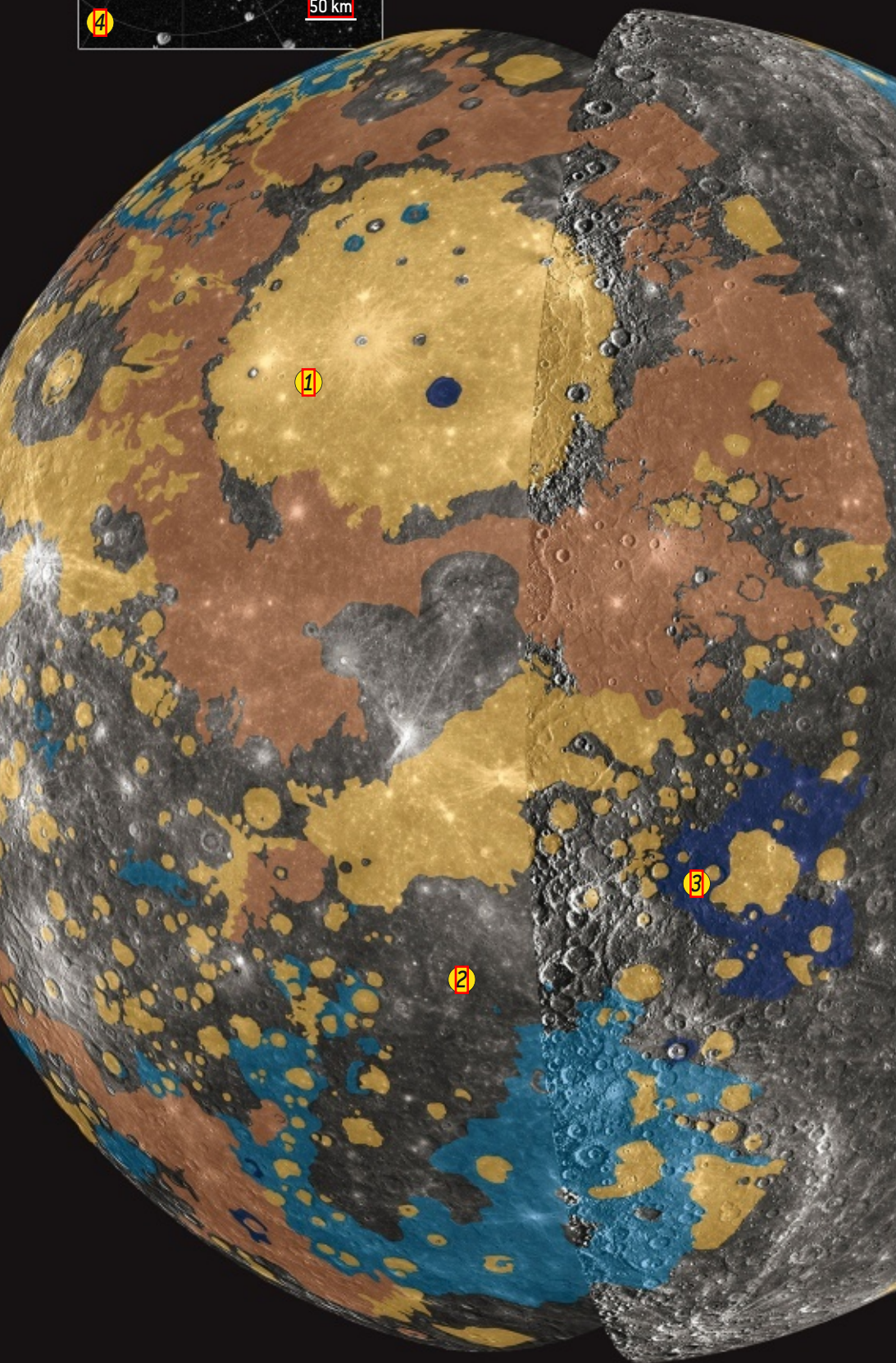
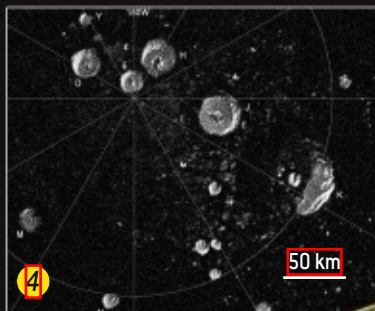


Un Christensen, source : NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/University of Washington



NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Arizona State University/Carnegie Institution of Washington; John Harmon Arecibo Observatory

Les scientifiques restent perplexes quant aux régions à dominante bleue qui couvrent 15 pour cent de la surface, tel le bassin *Tolstoi* ③. Ces terrains pourraient contenir des oxydes de fer et de titane, que les impacts auraient fait remonter des grandes profon-



LES AUTEURS

Scott MURCHIE, Ronald VERVACK et Brian ANDERSON sont géophysiciens au Laboratoire de physique appliquée de l'Université Johns Hopkins, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Vervack et *al.*, Mercury's complex exosphere : results from MESSENGER's third flyby, *Science*, vol. 329, pp. 672-675, 2010.

B. Anderson et *al.*, The magnetic field of Mercury, *Space Science Reviews*, vol. 152, n° 1-4, pp. 307-339, 2010.

B. Denevi et *al.*, The evolution of Mercury's Crust : a global perspective from MESSENGER, *Science*, vol. 324, pp. 613-618, 2009.

Le site officiel de la mission MESSENGER : <http://messenger.jhuapl.edu/>

La mission européenne vers Mercure *Beppi Colombo* sur le site du CNES : <http://smc.cnes.fr/BEPICOLMBO/Fr/>

En analysant la trajectoire de la sonde *Mariner 10*, les scientifiques ont pu mesurer le champ gravitationnel de Mercure et donc sa densité. Sa densité décompressée (l'effet de la pression interne due à la gravité est corrigé, de façon à pouvoir comparer les propriétés intrinsèques des matériaux) est étonnamment élevée : environ 5,3, contre 4,4 pour la Terre et 3,3 pour la Lune. Sous la croûte rocheuse de Mercure doit donc se trouver un noyau dense dominé par le fer. La Terre possède aussi un noyau de fer, mais rapporté à la taille de la planète, celui de Mercure est deux fois plus gros. Peut-être la planète Mercure a-t-elle autrefois possédé un manteau rocheux plus épais, arraché depuis par des impacts massifs. Une autre possibilité est que le matériau à partir duquel Mercure s'est formée était plus riche en fer (à proximité du Soleil, les éléments non métalliques étaient sublimés).

Cet imposant noyau de fer est sans doute l'explication d'une des découvertes les plus marquantes de *Mariner 10* : l'existence d'un champ magnétique global. Ce champ est dipolaire, comme celui de la Terre. Bien qu'il soit, à la surface de Mercure, 100 fois plus faible que sur Terre, sa seule existence est remarquable. Aucun autre corps rocheux du Système solaire, excepté la Terre et le satellite de Jupiter Ganymède, n'a de champ magnétique.

Le champ magnétique terrestre est engendré par une « dynamo planétaire », à savoir les mouve-

ments du fer fondu dans le noyau externe. Bien que l'hypothèse d'un champ magnétique fossile imprimé dans la croûte lors de son refroidissement ne puisse être totalement écartée, le champ magnétique de Mercure résulte sans doute aussi d'un effet dynamo. De très petites variations de la période de rotation propre de la planète au cours de son orbite, qui suggèrent que le noyau externe n'est pas complètement solidifié (malgré la petite taille de Mercure), renforcent par ailleurs cette hypothèse. D'une façon ou d'une autre, Mercure a échappé au sort de Mars, qui possédait un champ magnétique au début de son histoire et l'a perdu. Comprendre pourquoi est l'un des objectifs majeurs de la mission MESSENGER.

Par ailleurs, comme le champ magnétique de la Terre, celui de Mercure entraîne une dynamique complexe autour de la planète : 1 000 à 2 000 kilomètres en amont du côté jour de la planète, le champ magnétique défléchit le vent solaire, un flux de particules chargées issues du Soleil. Cela crée autour de Mercure une région où le champ magnétique de la planète domine le champ magnétique interplanétaire engendré par le vent solaire, la magnétosphère. *Mariner 10* a détecté des bouffées de particules énergétiques semblables à celles qui sont associées aux aurores boréales sur Terre.

MESSENGER a mis en évidence que la magnétosphère de Mercure ne cesse de changer. Lors du premier survol, le champ interplanétaire pointait vers le Nord

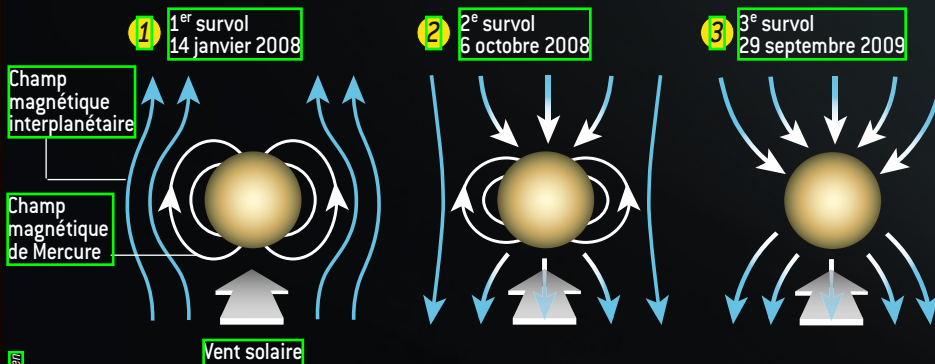
(par rapport au plan du Système solaire), et était aligné avec le champ magnétique de la planète à l'équateur ❶. La magnétosphère était paisible.

À la deuxième visite de la sonde, le champ interplanétaire pointait vers le Sud, dans la direction opposée au champ magnétique de Mercure à l'équateur. Or des lignes de champs magnétiques parallèles, mais de directions opposées, peuvent se reconnecter ❷, phénomènes qui libèrent de grandes quantités d'énergie et injectent des particules chargées du vent solaire dans la magnétosphère. Lors du deuxième survol, la sonde MESSENGER a ainsi mesuré un taux de reconnexion magnétique dix fois supérieur à ce qu'on observe à proximité de la Terre.

Au troisième passage, les lignes de champ magnétique de Mercure étaient très déformées et instables : par moments, elles étaient liées au vent solaire, puis, une à trois minutes plus tard, les liens normaux entre les hémisphères Nord et Sud étaient rétablis ❸. Durant ces épisodes de reconnexion, la magnétosphère de Mercure peut disparaître complètement du côté jour, et les cuspidés (ou trous) au Nord et au Sud fusionnent.

Avec une dynamique magnétique aussi puissante, une boussole ne serait pas d'un grand secours pour s'orienter sur Mercure, car elle changerait constamment de direction à l'échelle de quelques minutes.

Quelles autres surprises la magnétosphère de Mercure nous réserve-t-elle ?



Lobe Nord

Feuillet de plas

Lobe Sud

L'EXOSPHERE : UN STROBOSCOPE AU RALENTI

Mercure n'a pas d'atmosphère au sens classique, mais une « exosphère », une atmosphère tellement ténue que les atomes entrent rarement en collision les uns avec les autres. Leurs mouvements dépendent seulement des interactions avec la magnétosphère et avec la surface.

Outre de l'hydrogène et de l'hélium, les observations spectroscopiques depuis la Terre ont révélé les raies d'émission du sodium, du potassium et du calcium excités par la lumière solaire. Lors de ses survols, MESSENGER a détecté du magnésium et des ions calcium.

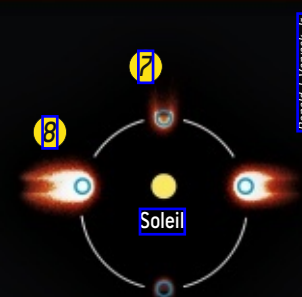
Ces éléments ayant une durée de vie d'au plus quelques jours dans l'exosphère, ils sont continuellement renouvelés.

L'hydrogène et l'hélium seraient principalement libérés par la capture des ions du vent solaire à la surface. Le rayonnement solaire altère les minéraux et fait s'évaporer les éléments les plus légers comme le sodium. Enfin, le bombardement continu de micrométéorites pulvérise des poussières dans l'exosphère. La photoaltération est relativement peu énergétique, si bien que les atomes éjectés retombent en général à la surface **4**. Le vent solaire et le bombardement de micrométéorites sont plus violents, et les atomes qu'ils arrachent restent plus longtemps dans l'exosphère **5**.

Certains éléments, en particulier le sodium, sont même arrachés à l'exosphère par la pression du rayonnement

solaire, formant ainsi une queue semblable à celle d'une comète **6**, longue de plus de deux millions de kilomètres.

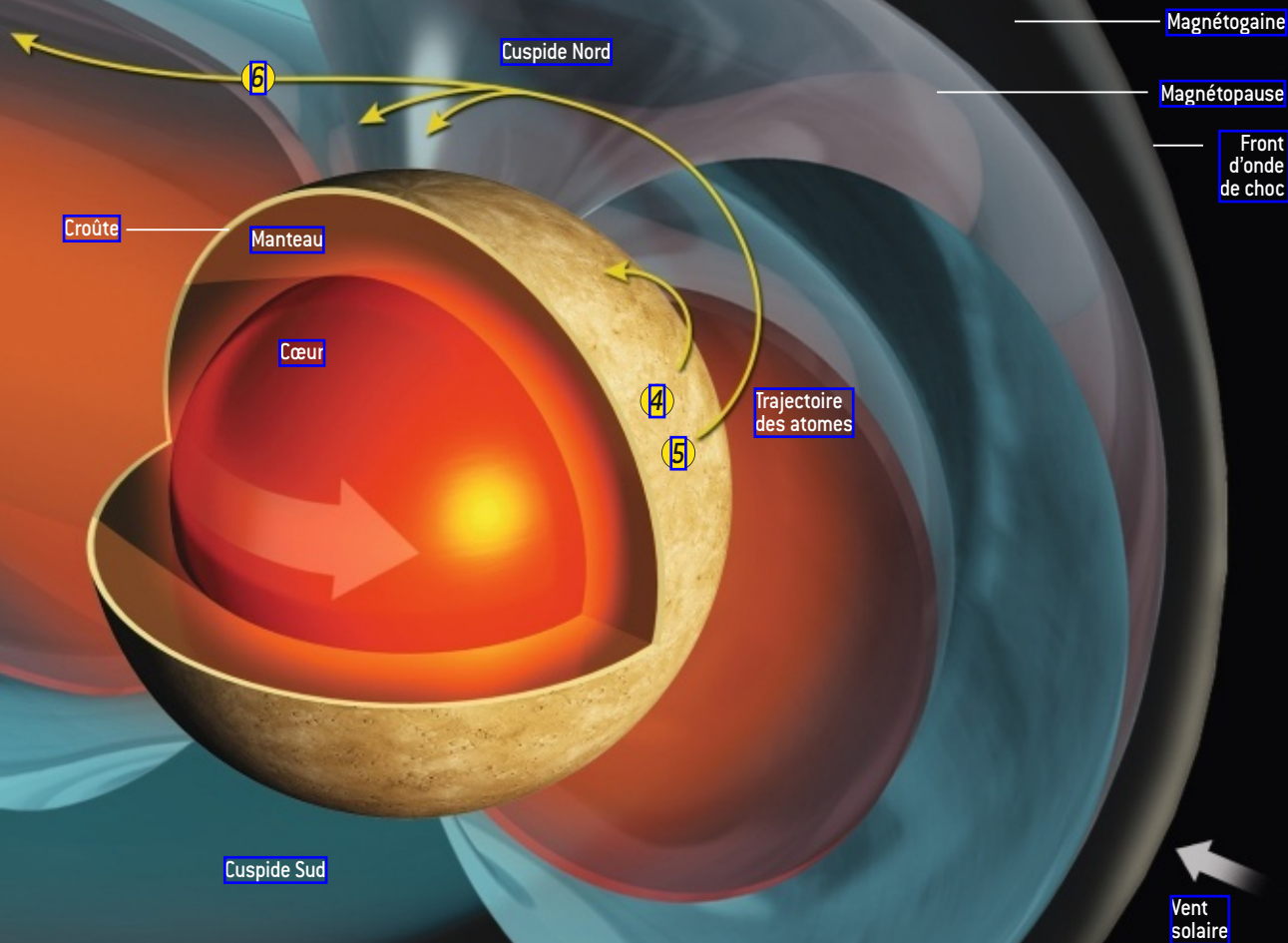
L'exosphère et la queue de Mercure ont la particularité de s'illuminer deux fois par orbite. Il a été proposé que cela résulte de l'excitation par le rayonnement solaire des atomes de l'exosphère. Cependant les longueurs d'onde concernées sont aussi en partie absorbées dans les couches externes du Soleil. Mais comme l'orbite de Mercure est très elliptique, la planète accélère vers le Soleil ou s'en éloigne durant son orbite, de sorte que le spectre de la lumière solaire est décalé par effet Doppler. Un excès de rayonnement aux longueurs d'onde adéquates atteint alors l'exosphère et la fait briller.



Ronald J. Vermaak/JPL

Ainsi, quand Mercure est au plus près ou au plus loin du Soleil, l'exosphère est à peine visible **7**. Aux positions intermédiaires de son orbite, elle est brillante **8**.

Au cours de l'année à venir, MESSENGER va suivre ces variations de l'exosphère. Mais nous savons d'ores et déjà que Mercure nous réserve des phénomènes inattendus.



Onduler pour avancer

Pour se déplacer, les serpents et d'autres animaux se tortillent. Leurs ondulations se ressemblent, mais sont en fait régies par des mécanismes très différents suivant le support.

Daniel Goldman et David Hu

Se déplacer... pour vivre et survivre! Les anguilles nagent, les faucons montent en flèche dans le ciel, les taupes creusent des tunnels et les écureuils sautent pour fouiller le sol, se reproduire ou échapper aux prédateurs. Ces prouesses de locomotion nécessitent une coordination de processus biophysiques complexes, qui interviennent à l'échelle moléculaire (des molécules contrôlent la propagation des informations dans les neurones), à l'échelle intermédiaire (muscles et tendons se couplent avec des éléments du squelette pour entraîner le mouvement de différentes parties du corps) et à grande échelle (certaines parties du corps, comme les pieds et

les mains, interagissent avec leur environnement pour que l'on avance). L'un des objectifs de la science de la locomotion est de découvrir des principes généraux du déplacement grâce au développement de modèles multi-échelles – un défi qui nécessite la collaboration de biologistes, de physiciens, de mathématiciens et d'ingénieurs. Ces études inspirent la conception de véhicules dont la mobilité égale, voire dépasse, celle des animaux.

De nombreux animaux se déplacent sans utiliser leurs membres. Certains lézards, par exemple, tortillent leur corps sans l'aide des pattes pour se frayer un chemin à travers les herbes hautes et denses

ou dans des environnements sablonneux. Des milliers d'espèces de serpents, limaces et vers (et quelques lézards) sont dépourvues de membres. Leur corps allongé et flexible leur permet de se faufiler dans d'étroites fissures et de parcourir de longues distances dans des milieux complexes et souvent tortueux, tels que les cimes des arbres, le sous-sol ou le tube digestif d'autres organismes.

Nos récents travaux et nos modèles de locomotion terrestre sans membres ont permis d'élucider les mécanismes qui rendent la locomotion par ondulation efficace dans deux environnements : sur le sol, où glissent les serpents, et dans des milieux

plus ou moins fluides, tel le sable où «nagent» les poissons des sables (*Scincus scincus*), petits lézards du désert africain. Les mouvements de ces reptiles peuvent sembler similaires. Pourtant, nous verrons qu'ils se propulsent grâce à des interactions propres à leurs environnements respectifs.

S'appuyer sur les aspérités

Des serpents filiformes de quelques centimètres aux anacondas de dix mètres de long, les reptiles dépourvus de pattes ont tous un corps fondé sur le même principe : un tube flexible de chair recouvert d'écailles durcies. Cette forme leur confère une grande souplesse : ils peuvent glisser à la verticale le long de troncs d'arbres, passer de la terre ferme à l'eau sans changer de mode de locomotion, se déplacer sur terre, tel le mamba noir de deux mètres

de long, sans dépenser plus d'énergie qu'un organisme à pattes de même poids, filer presque aussi vite qu'un homme peut courir (à cinq mètres par seconde).

Avec Michael Shelley, de l'Université de New York, l'un de nous (D. Hu) s'est consacré en 2009 à l'étude de la locomotion des jeunes serpents de lait et serpents des blés, en raison de leur capacité à glisser dans des habitats terrestres tels que des prairies et des pentes caillouteuses. Comme tous les serpents, ils se déplacent de plusieurs façons (voir page 68). Nous avons étudié la plus commune, la reptation par ondulation : les serpents glissent en appuyant leurs flancs contre des pierres et des branches. Nos premières expériences ont donc consisté à faire glisser des serpents sur un panneau muni de chevilles. Sur ce dispositif, un serpent avance, car les forces musculaires qu'il exerce sur les chevilles environnantes sont supérieures à la force de

L'ESSENTIEL

✓ La locomotion par ondulation permet à de nombreux animaux de se déplacer vite dans des environnements variés.

✓ Comprendre la physique de ces mouvements peut aider à concevoir des robots rampants aussi performants, voire plus.

✓ En combinant expériences et modélisation, des biophysiciens ont montré que des serpents sur le sol et des lézards dans du sable ondulent selon des mécanismes différents.

© SHUTTERSTOCK/ERIC ASSAËL

1. LE SERPENT DES BLÉS

(*Elaphe guttata* ou *Pantherophis guttatus*), qui vit en Amérique et dans les Antilles, se déplace généralement en ondulant. De quelques dizaines de centimètres dans sa jeunesse, il mesure plus d'un mètre à l'âge adulte.



MODÉLISER LA LOCOMOTION PAR ONDULATION

Qu'ils aient lieu dans un liquide, dans du sable ou sur le sol, les mouvements d'ondulation peuvent être modélisés à l'aide d'une même approche : la technique de la force de résistance, développée pour modéliser la locomotion de petits organismes dans des liquides. Considérons une petite « tranche » d'un reptile ondulant. Les forces musculaires agissant sur le segment, associées à l'inertie du corps, engendrent une réaction de son support : l'animal subit, de la part de son environnement, des forces

de réaction égales à celles qu'il a produites et de sens opposé. Il avance lorsque ses mouvements sont tels que la somme de toutes les forces de réaction s'exerçant sur son corps propulse son centre de gravité vers l'avant.

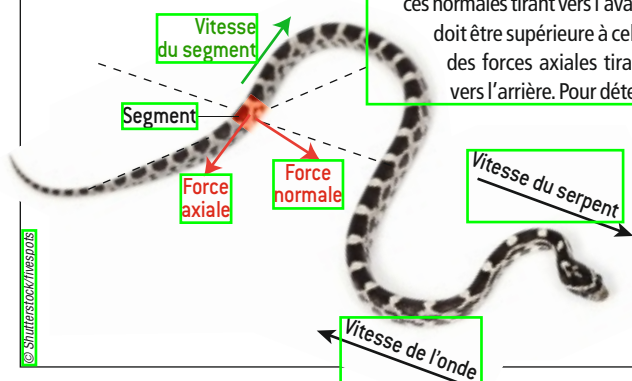
Pour simplifier, on supposera que les animaux ondulent dans un plan. La force agissant sur le segment se décompose alors en deux parties, l'une tangente (force axiale) et l'autre perpendiculaire (force normale) à la surface du segment (voir la figure). Pour que l'animal se déplace, la somme des forces normales tirant vers l'avant doit être supérieure à celle des forces axiales tirant vers l'arrière. Pour déter-

miner si tel est le cas, on calcule les forces de réaction qu'exerce l'environnement sur l'animal. C'est là que réside toute la difficulté.

Dans un environnement liquide tel que ceux où évoluent les spermatozoïdes, les nématodes ou les serpents de mer, on utilise l'équation de la dynamique des fluides, dite de Navier-Stokes. Cette équation applique la deuxième loi du mouvement de Newton au mouvement d'un fluide, en tenant compte de sa pression et de sa viscosité. Connaissant la vitesse d'écoulement du fluide, sa viscosité et sa pression, on peut en déduire les forces s'exerçant sur les corps qui nagent et qui volent. En pratique, on utilise des modèles approximatifs (comme la loi de Stokes pour les perturbations dominées par les effets de viscosité), car dans la plupart des cas, il est impossible de trouver les solutions exactes de cette équation.

Hormis les surfaces sèches et solides, les environnements pour

la locomotion terrestre sont en général plus compliqués à modéliser, car les lois régissant la dynamique de nombreux matériaux tels que la boue ou le sable nous sont inconnues. Sur une surface sèche et rigide, la force de résistance est indépendante de la vitesse, proportionnelle à la force normale appliquée et de sens opposé à celui du déplacement. Un matériau sec et granulaire tel que le sable, en revanche, se comportera comme un solide ou comme un liquide, selon les contraintes et la compacité du matériau, voire changera de comportement si une perturbation modifie sa compacité. Une caractéristique, cependant, facilite la résolution des équations : l'inertie de l'organisme et celle de l'environnement sont négligeables devant les forces de frottement, de sorte que, contrairement au serpent dans l'eau, un animal qui veut s'arrêter dans un milieu granulaire n'a qu'à arrêter d'onduler.



frottement qui s'exerce sur son ventre (voir l'encadré ci-dessus). Mais les serpents glissent aussi avec aisance sur un terrain presque sans aspérités, comme le sable ou une roche nue, qui ne fournissent pas de points d'appui évidents. Comment font-ils ? Pour le comprendre, nous avons étudié plus précisément les frottements des serpents sur le sol.

Le frottement est une force qui résiste au glissement d'un objet sur un autre, comme la semelle d'une chaussure sur le sol. La force résulte du fait qu'aucune surface n'est parfaitement lisse. Toutes les surfaces sont couvertes de minuscules aspérités qui s'accrochent et se déforment lorsque deux surfaces sont pressées l'une contre l'autre et glissent. Cette résistance au glissement est décrite par un coefficient de frottement, rapport de la force de frottement résultante entre deux surfaces et de la force de compression appliquée. Pour glisser, un serpent doit ainsi appliquer une force supérieure au produit de son poids et du coefficient de frottement.

Si le dos des serpents est couvert d'écailles en forme de losange, celles de

Quatre types de reptation

- ✓ La reptation par ondulation, courante chez les petits serpents : le serpent glisse sur le sol en propageant une ondulation dans son corps.
- ✓ La reptation rectiligne, fréquente chez les serpents lourds : des ondes musculaires tirent vers l'avant le corps, qui reste à peu près droit dans l'axe du déplacement, tandis que la peau est ancrée au sol par endroits.
- ✓ La reptation en accordéon, utilisée par de nombreux serpents : le reptile, ondulé en forme de S, avance la partie antérieure de son corps, puis la partie postérieure, en les soulevant successivement.
- ✓ La reptation par « déroulement » latéral des serpents des sables : l'animal, ondulé en forme de S, projette latéralement sa partie antérieure, puis ramène sa queue. Il effectue ainsi une série de sauts obliques, et peut être très rapide.

leur ventre se chevauchent comme les bardeaux d'un toit et s'accrochent au sol lorsque le serpent est traîné latéralement ou par la queue. Cette orientation confère une propriété utile : sur certains supports, les écailles ventrales glissent préférentiellement dans une direction donnée. En endormant des serpents pendant quelques minutes et en les disposant sur des plans inclinés, nous avons mesuré le coefficient de frottement d'un serpent en fonction de son orientation. Les mesures ont été réalisées sur un tissu dont l'échelle de longueur caractéristique de la rugosité (0,2 millimètre) était comparable à l'épaisseur des écailles ventrales du serpent (0,1 millimètre), afin que les écailles puissent s'accrocher au tissu. Pour des serpents de lait, le coefficient de frottement est minimal si le serpent glisse vers l'avant (0,10), moyen s'il glisse vers l'arrière (0,14) et maximal s'il glisse sur le côté (0,20). Sans cette anisotropie du frottement, le serpent serait incapable d'avancer sur un sol plat.

Pour le prouver, il suffit d'habiller le reptile d'une « veste isotrope » – en l'occur-

rence une manche de tissu ajustée pour coller au serpent sans gêner sa respiration (voir la figure 2). Les forces de frottement s'opposent toujours au glissement sur le sol du serpent vêtu de sa veste. Toutefois, lorsque le serpent engendre une onde de déplacement, la somme des forces s'appliquant sur le ventre du serpent est nulle: le serpent ondule sur place, comme s'il se trouvait sur de la glace. On obtient le même effet en plaçant les serpents sur des surfaces très lisses, en plastique par exemple. Les serpents sont alors incapables d'avancer, à moins de soulever leur corps en ondulant ou d'adopter un autre type de mouvement.

Répartir son poids pour aller plus vite

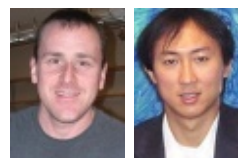
L'agencement des écailles ventrales suffit-il à expliquer la vitesse du serpent qui ondule? Pour le savoir, nous avons modélisé le déplacement d'un serpent virtuel auquel nous avons donné les propriétés des écailles du serpent; en d'autres termes, outre les caractéristiques du mouvement par ondulation (fréquence, longueur d'onde et amplitude), le serpent virtuel présentait les coefficients de frottement du ventre déterminés expérimentalement. Nous avons par ailleurs supposé que sur toute la longueur du serpent, son poids s'appliquait uniformément sur le sol. Le modèle calcule l'intensité et la direction des forces de frottement s'exerçant sur le ventre du serpent (voir la figure 3). Seules celles orientées dans le sens de déplacement du serpent contribuent à sa propulsion; les autres indiquent les directions dans lesquelles se dissipe l'énergie perdue. Après avoir additionné toutes les forces de frottement, nous avons constaté que la vitesse de notre serpent virtuel n'était égale qu'à la moitié de celle du serpent observé en laboratoire (huit centimètres par seconde, ou 0,2 fois la longueur du serpent par seconde): notre modèle mathématique ne reproduisait que partiellement le mouvement du serpent.

Par ailleurs, des chercheurs ont observé que des serpents modifient la répartition de leur poids en soulevant les sommets de l'ondulation de leur corps, faisant porter leur poids sur les zones restant en contact avec le sol. Ce soulèvement est particulièrement visible lors du déplacement par déroulement latéral, au cours duquel le serpent se déplace latéralement et laisse une série de traces obliques dans le sable et non

une trace ondulante continue. Sur des surfaces réfléchissantes et de la gélatine photo-élastique (qui transmet la lumière lorsqu'elle est comprimée), nous avons vérifié que les serpents sont aussi capables de soulever leur ventre tout en ondulant vers l'avant (voir la figure 4).

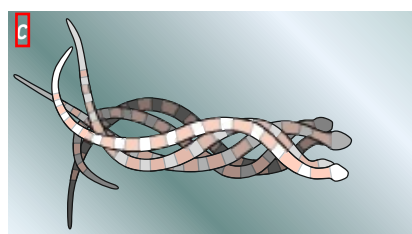
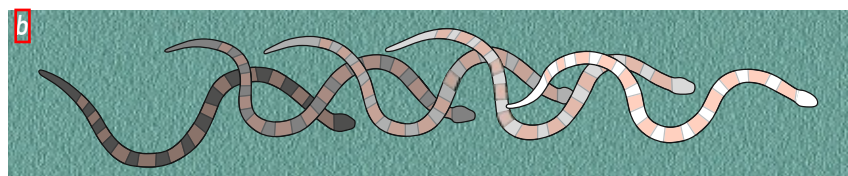
En injectant cette nouvelle donnée dans notre modèle, nous avons observé qu'un tel équilibre dynamique de la charge entraîne une augmentation de la vitesse de 35 pour cent et de l'efficacité de 50 pour cent. Pourquoi un tel avantage? Parce que les zones que le serpent soulève présentent des forces de frottement perpendiculaires à sa direction de déplacement, c'est-à-dire qui ne participent pas à sa propulsion. Le frottement étant proportionnel au poids appliqué, le serpent engendre davantage de poussée s'il soulève son corps dans ces régions et augmente son poids ailleurs. La reptation par ondulation partage ainsi certaines caractéristiques avec la marche humaine. Quand nous marchons, nous transférons du poids de notre pied arrière sur le pied avant en soulevant le pied arrière au lieu de le traîner. De même,

LES AUTEURS

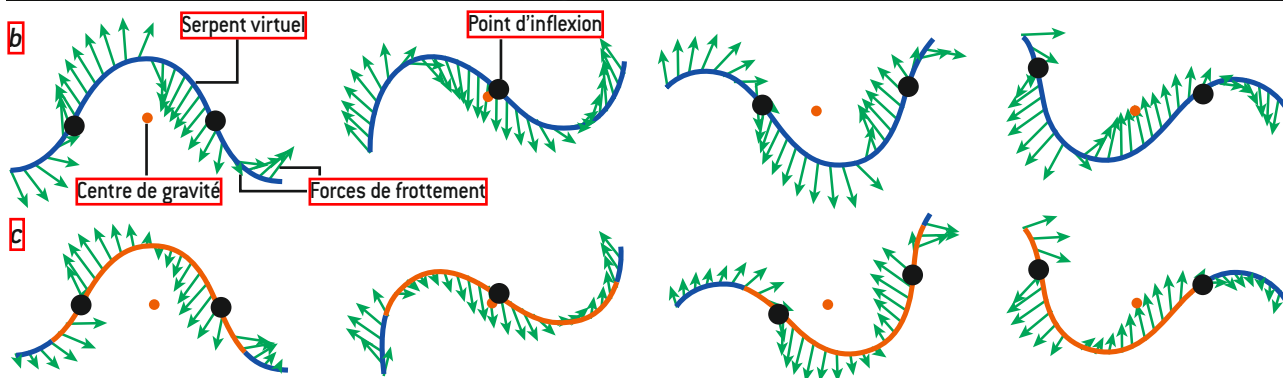
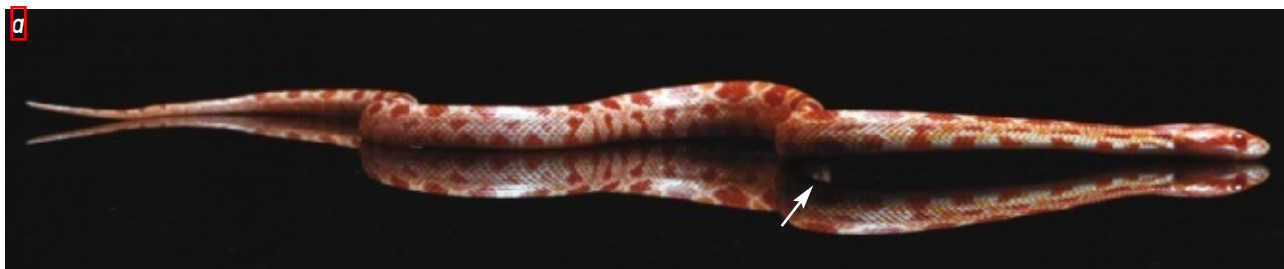


Daniel GOLDMAN est maître de conférences à l'École de physique de l'Institut de technologie de Géorgie, à Atlanta aux États-Unis. David HU est maître de conférences de génie mécanique et de biologie dans le même institut.

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



2. UN SERPENT DES BLÉS HABILÉ d'une « veste isotrope », qui empêche ses écailles d'interagir avec le sol, n'arrive plus à avancer et ondule sur place (a), tout comme un serpent sur une surface lisse (c). En revanche, sur une surface rugueuse, ses ondulations, d'amplitude, de longueur d'onde et de fréquence constantes, engendrent un déplacement vers l'avant, car le serpent prend appui sur les aspérités du support (b).



3. UN SERPENT DES BLÉS QUI SE DÉPLACE EN ONDULANT sur un miroir. Il soulève certaines portions de son ventre, dont on aperçoit alors le reflet (a, flèche). La modélisation de l'ondulation montre que cette répartition non uniforme du poids (c) augmente la vitesse du serpent par rapport à une répartition uniforme (b) : le serpent virtuel se déplace de gauche à droite. Les forces de frottement (flèches vertes)

exercées par le sol lors de son déplacement le propulsent lorsqu'elles sont orientées vers la droite, le freinent lorsqu'elles sont vers la gauche (forces de traînée), et entraînent une dissipation d'énergie dans les autres directions. En soulevant certaines parties de son corps (c, segments orange), un serpent diminue les forces de frottement dissipatives et augmente la force tirant vers l'avant aux points d'inflexion.

BIBLIOGRAPHIE

Y. Ding et al., Drag induced lift in granular media, *Physical Review Letters*, vol. 106, 028001, 2011.

N. Cohen et J. H. Boyle, Swimming at low Reynolds number : a beginner's guide to undulatory locomotion, *Contemporary Physics*, vol. 51, pp. 103-123, 2010.

E. Guyon et al., « Avoir un bon contact », dans *Matière et matériaux*, pp. 78-79, Belin, 2010.

D. Hu et al., The mechanics of slithering locomotion, *PNAS*, vol. 106, n° 25, pp. 10081-10085, 2009.

R. D. Maladen et al., Undulatory swimming in sand : subsurface locomotion of the sandfish lizard, *Science*, vol. 325, pp. 314-318, 2009.

D. C. Rapaport, *The Art of Molecular Dynamics Simulation*, Cambridge University Press, 2004.

un serpent soulève les parties de son corps qui effectuent le travail le moins utile. Cet ajustement est une simple modification de la répartition du poids.

Le sable : parfois solide, parfois liquide

De nombreux organismes du désert – serpents, taupes, lézards, scorpions – disparaissent dans le sable pour échapper aux prédateurs et à la chaleur, ou pour attraper des proies. Le poisson des sables que l'un de nous (D. Goldman) a choisi pour modèle est un lézard de dix centimètres de long, muni d'orteils à franges sur ses quatre pattes, d'un groin en forme de pelle, et d'un ventre et de flancs aplatis – des traits qui l'aident à s'enfouir et à « nager » dans le sable. Ses écailles sont lisses et résistantes à l'abrasion, comme celles des serpents, mais les écailles ventrales ne se chevauchent pas. Le déplacement de ce petit animal sous le sable a été très peu étudié, notamment à cause des difficultés d'observation, le sable étant opaque.

Le poisson des sables utilise ses membres pour se déplacer à la surface du sable, mais dès qu'il sursaute, il pointe son groin vers le bas et disparaît en une demi-seconde

sous le sable. Les lois physiques qui régissent les forces de propulsion dans un tel milieu granulaire sont différentes des forces de frottement qui interviennent dans l'ondulation sur des surfaces solides, essentiellement parce que les matériaux granulaires peuvent céder (s'écouler) ou se solidifier en réponse à une perturbation.

Généralement sec, le sable du désert est composé de particules à peu près sphériques de 0,1 à 0,3 millimètre de diamètre. Elles n'interagissent que par contact, l'énergie étant dissipée sous l'effet de forces telles que la viscoélasticité (réaction à une contrainte du matériau, qui se comporte comme s'il était composé d'un solide élastique et d'un fluide visqueux), la déformation plastique et le frottement. Selon la contrainte appliquée, le milieu granulaire présente tout un éventail de comportements physiques avec des propriétés caractéristiques des gaz, des liquides et des solides. Par exemple, un tas de grains sur une planche plane se comporte comme un liquide à seuil élastique : il se comporte comme un solide s'il n'est pas trop penché, mais à des angles d'inclinaison suffisamment élevés, il s'écoule comme un liquide.

Le comportement des milieux granulaires dépend aussi de leur compacité, c'est-

à-dire du volume relatif que les grains occupent. Bien que la fourchette de compacité d'un milieu du type du sable du désert soit restreinte (entre 58 et 63 pour cent), un tel milieu se comporte très différemment selon sa compacité: en réaction à une perturbation, des grains peu tassés s'écoulent comme un liquide, tandis que des grains très tassés s'écoulent par à-coups quand un objet se fraye un passage entre eux.

La modélisation d'un tel comportement constitue un défi, car on ne connaît pas de loi physique décrivant un écoulement où coexistent un état solide et un état liquide. Une méthode fructueuse – la dynamique moléculaire – consiste à suivre par ordinateur le mouvement et les interactions de millions de grains individuels soumis aux lois de la collision et de la gravité. Une fois validés, ces modèles donnent une idée des écoulements de particules, fonctionnant comme un microscope virtuel à l'intérieur du matériau.

Sans les pattes

Comment un poisson des sables se déplace-t-il dans son milieu? L'animal utilise-t-il ses membres pour pagayer ou frétille-t-il comme une anguille? Comment se comporte le sable quand la tête y a pénétré? Reste-t-il fluide ou se solidifie-t-il sous la perturbation? Quelle fluidité présente-t-il lorsque la suite du corps s'enfouit? Des changements de compacité du matériau modifient-ils le mouvement du poisson des sables? Pour étudier ces questions, l'un de nos doctorants, Ryan Maladen, a utilisé une combinaison de techniques d'imagerie à rayons X pour visualiser les mouvements du reptile sous le sable.

Pour contrôler la compacité du sable, les grains sont placés dans un bac à fond poreux. Un flux d'air traversant ce fond le pousse vers le haut. Lorsque son intensité est suffisante, les grains s'agitent comme un fluide et, une fois le flux d'air arrêté, s'arrangent dans un état de faible compacité. Différents degrés de compacité sont ensuite provoqués par des jets d'air ou des vibrations contrôlées. Le poisson des sables est placé dans un enclos relié au bac. Quand on soulève la porte de l'enclos, l'animal se précipite vers le sable, le dos raide, en utilisant ses membres pour se propulser. Une caméra rapide révèle qu'il s'y enfouit en combinant les mouvements de son corps et la poussée



4. UN SERPENT DES BLÉS glissant sur de la gélatine photo-élastique illuminée par dessous et filmé entre des filtres à polarisation croisée. Initialement, l'orientation des filtres empêche la lumière polarisée de parvenir à la caméra, mais quand le serpent appuie sur la gélatine, il y a rotation de la polarisation de la lumière, ce qui permet à la caméra de la détecter (les zones lumineuses sous le serpent). Cette technique visualise les points de contact du serpent avec le sol.



5. LE POISSON DES SABLES, qui vit dans les déserts d'Afrique du Nord, utilise son groin en forme de pelle (a), sa peau lisse et son puissant corps se tortillant dans le sable. Il avance ainsi à une vitesse atteignant deux longueurs de corps par seconde. Le reptile, long de dix centimètres, peut s'enfouir en moins d'une seconde (b). En surface, il utilise ses membres pour se déplacer, mais sous le sable, il se déplace uniquement en propageant une onde sinusoïdale le long de son corps (c, observé aux rayons X).

de ses membres. Très bref, le temps d'enfouissement ne dépend pas de la compacité du sable.

Le déplacement du reptile dans le matériau est suivi à l'aide d'une caméra rapide à rayons X. Le sable (et le lézard) est placé entre une source de rayons X et une matière scintillante qui convertit les photons X en électrons; ces derniers frappent une autre surface qui émet alors de la lumière visible, laquelle est ensuite captée par une caméra conventionnelle à grande vitesse.

La première fois que nous avons observé le déplacement du poisson des sables sous la surface, nous avons constaté qu'il avançait à une vitesse d'environ deux longueurs de corps par seconde, en se tortillant et sans se servir de ses pattes, se déplaçant plus vite que des serpents de lait sur un sol plat. Le lézard nageait jusqu'à une profondeur d'environ quatre centimètres, puis s'arrêtait, se sentant probablement en sécurité. Il avançait en propageant une onde sinusoïdale de déplacement de la tête vers la queue à une fréquence donnée (plus la fréquence était élevée, plus il allait vite). Dans un milieu très compacté, l'animal utilisait des fréquences allant jusqu'à quatre ondulations par seconde.

En augmentant la compacité, nous nous attendions à ce que l'animal ralentisse. Des mesures effectuées sur de petites tiges dans des milieux granulaires avaient montré que la force de traînée (la composante du frottement qui s'oppose au mouvement) dans du sable très tassé est presque le double de celle mesurée dans un sable peu compact (voir l'encadré page 73). À notre grande surprise, la compacité n'avait aucun

Rendez-vous sur le site de Pour la Science www.pourlascience.fr

L'actualité scientifique internationale,
en quelques clics :

- » Des actualités quotidiennes et d'autres contenus en accès libre
- » Tous les articles et numéros depuis 2004 en PDF
- » L'accès libre à tous les numéros compris dans votre abonnement
- » Tous les ouvrages Belin-Pour la Science
- » Votre compte abonné



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

effet sur la vitesse pour une fréquence donnée de l'onde. De plus, les mouvements de l'animal étaient les mêmes dans les milieux de faible et de forte compacité. Plus étrange encore, en moyenne, le poisson des sables nageait plus vite dans le matériau très tassé que dans celui de faible compacité. Comment ? En augmentant sa fréquence d'ondulation.

De fait, la locomotion du poisson des sables est particulièrement efficace. L'efficacité de son onde en milieu granulaire (le rapport de sa vitesse moyenne de nage et de la vitesse de l'onde) est de 0,5, soit plus du double de celle des vers nématodes dans des liquides (environ 0,2) et supérieure à celle des serpents sur une surface rugueuse (environ 0,3). L'efficacité maximale, 1, correspond à un animal qui avance sans glissement dans un milieu statique, et l'efficacité minimale, 0, à un animal cherchant à se déplacer dans le vide.

Pour comprendre ce phénomène, un de nos doctorants, Yang Ding, a modélisé le mouvement du poisson des sables à l'aide de la technique de la force de résistance (voir l'encadré page 68). Cette approche nous semblait applicable, car, d'une part, l'étude aux rayons X a indiqué que le matériau s'écoule au voisinage de l'animal et, d'autre part, les perturbations des

différentes régions du sable n'influent pas les uns sur les autres, de sorte que les forces agissant sur des « tranches » du corps s'ajoutent de façon linéaire.

La modélisation du poisson des sables

Comme avec les serpents, la première étape de la modélisation consiste à décrire les forces de frottement qui s'exercent sur le reptile. À défaut de connaître les lois de la dynamique des milieux granulaires, Y. Ding et Chen Li, un autre doctorant du groupe, ont établi des lois empiriques en mesurant les composantes de la traînée sur un cylindre en acier inoxydable tiré dans le sable sous différents angles par rapport à la direction de déplacement (voir l'encadré ci-dessous). Ils ont observé que la composante perpendiculaire à l'axe du cylindre était accrue par rapport à celle qu'aurait subie le cylindre dans un fluide réel ou sur le sol. L'efficacité de l'onde du poisson des sables était-elle due à l'accroissement de cette composante ?

Oui, a répondu le modèle mathématique dans lequel ces lois empiriques avaient été injectées : le modèle retrouve bien que la vitesse augmente de façon linéaire avec la fréquence. En outre, l'efficacité de l'onde

qu'il prédit est comprise entre 0,4 et 0,7 (il faudrait tenir compte de la forme de la tête pour affiner ce résultat) et est bien indépendante de la compacité. Le modèle a donc montré que l'animal peut « nager » sous le sable sans utiliser ses membres. De plus, il donne une explication plausible de l'indépendance de l'efficacité de l'onde par rapport à la compacité : lorsque la force de résistance augmente dans un matériau très tassé, il en va de même pour les forces de poussée qui peuvent être engendrées.

Notre modèle prédit aussi avec quelle amplitude le poisson des sables doit onduler pour atteindre une vitesse maximale en milieu granulaire : pour accélérer, le reptile augmente l'amplitude de son onde tout en maintenant à peu près constant le nombre d'ondulations par seconde. L'animal ayant une longueur finie, au-delà d'une certaine amplitude d'ondulation, il avance moins loin à chaque ondulation. Notre modèle a trouvé pour cette amplitude limite une valeur d'environ un cinquième de la longueur d'onde. Dans notre dispositif expérimental, l'amplitude d'ondulation des lézards testés se concentrait autour de cette valeur : nos animaux fuyaient donc probablement le plus vite possible dans le sable.

La concordance des données expérimentales avec notre modèle est encourageante,

DÉCRIRE LE COMPORTEMENT DU SABLE

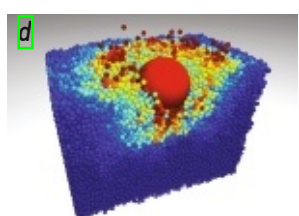
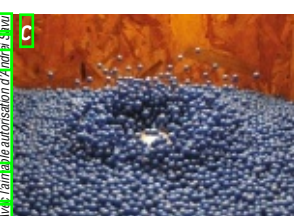
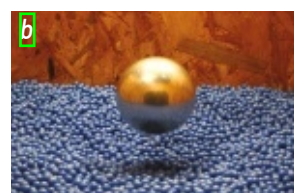
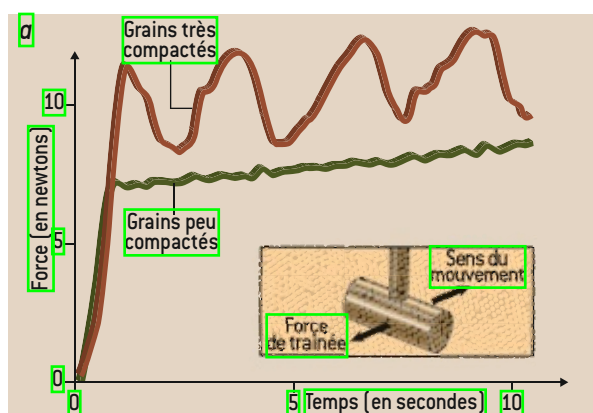
Les lois physiques qui régissent les interactions avec les milieux granulaires peuvent être très complexes. En voici deux exemples. Dans le premier (a), un même milieu réagit différemment à une perturbation selon sa compacité : la force de traînée (force de frottement qui s'oppose au mouvement) qui s'exerce sur une courte tige (deux

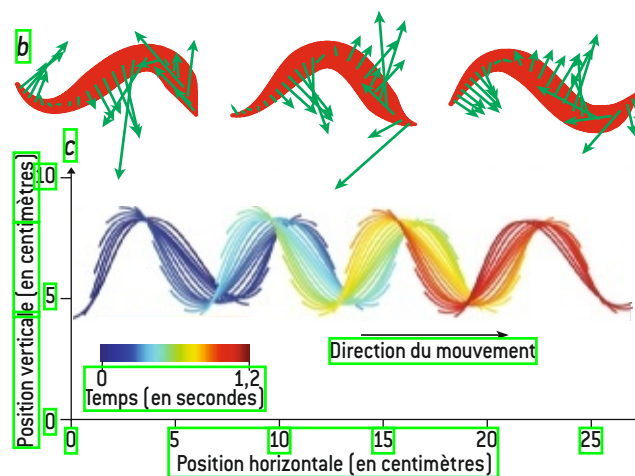
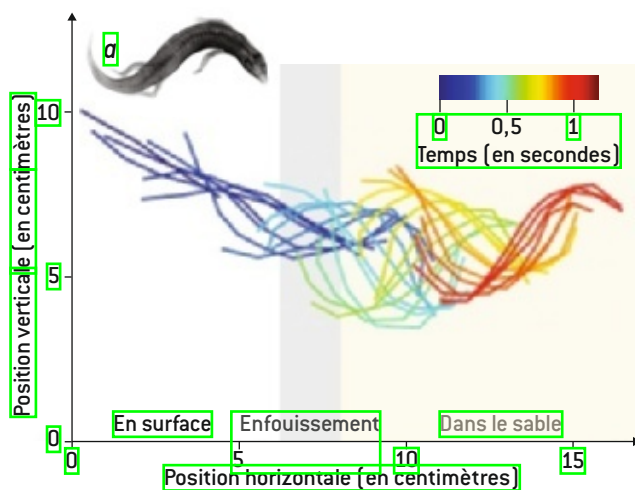
centimètres de long) tirée à une vitesse d'un centimètre par seconde n'est pas la même dans un milieu de perles de verre de 0,3 millimètre faiblement (en vert) ou fortement (en marron) compactées. Avec des particules peu tassées, la force est constante, après une augmentation initiale transitoire, quand le matériau s'écoule autour de la tige.

Dans le matériau très compacté, la force présente de grandes oscillations, car le matériau devant la tige cède périodiquement, tandis qu'un bloc de matériau solidifié est poussé vers la surface.

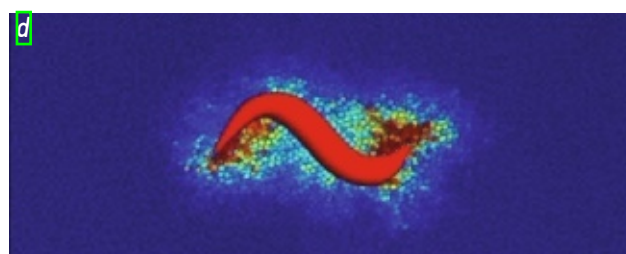
Dans le second exemple, un récipient rempli de grains (des sphères en plastique de six millimètres) reste solide jusqu'à ce qu'une boule

d'aluminium de cinq centimètres de diamètre (b) frappe la surface (c). Le milieu granulaire devient alors fluide autour de la boule. Une fois que la boule s'immobilise, les grains forment à nouveau un solide. Une technique de simulation appelée dynamique moléculaire permet de visualiser les forces et les vitesses appliquées aux grains (d). Les particules bleu foncé se déplacent lentement et se comportent presque comme un solide, alors que les particules plus rouges, autour de l'objet ayant produit l'impact, se déplacent plus vite.





6. LES MOUVEMENTS DU DOS D'UN POISSON DES SABLES filmé à l'aide d'une caméra rapide à rayons X (a) et de son homologue virtuel (b-d). Après un déplacement très rapide en surface, le reptile s'enfouit tout aussi vite, puis commence à onduler sous le sable en ralentissant (a). Le mouvement d'un lézard simulé dans un bac contenant environ 150 000 perles de verre de trois millimètres de diamètre ressemble à celui d'un animal réel (c). Les forces de frottement (b, en vert) sont principalement perpendiculaires à l'axe du corps : ce sont elles qui propulsent le reptile. Le milieu est quant à lui solide (d, en bleu foncé), sauf dans une petite zone autour du lézard (particules plus rouges).



et la prédiction d'une nage optimale tentante. Toutefois, ne concluons pas trop vite. L'approche choisie présente quelques inconvénients. D'une part, changer les paramètres du modèle, tels que la taille des grains de sable, nécessite à chaque fois de nouvelles mesures empiriques. D'autre part, rien ne prouve que nos hypothèses (comme celle selon laquelle les différents segments du lézard n'influencent pas les uns sur les autres) sont judicieuses, de sorte que la concordance n'est peut-être que fortuite.

Des reptiles virtuels aux robots

Nous avons donc adopté une autre approche utilisant les techniques de dynamique moléculaire décrites plus haut. Après avoir montré que ce modèle présentait une bonne capacité prédictive du comportement du sable pour tout un éventail de conditions expérimentales, nous avons créé un poisson des sables virtuel qui combinait les caractéristiques de déplacement expérimentales et les forces de frottement calculées dans le modèle de dynamique moléculaire.

Nous avons trouvé une bonne concordance avec l'efficacité de l'onde expérimentale et celle prédite dans notre premier modèle : la dynamique moléculaire confirme l'existence d'une nage optimale du poisson des sables. De plus, elle donne accès à des

informations à l'échelle de la particule : nous avons visualisé l'écoulement des particules autour du poisson des sables et estimé la force s'exerçant sur différents éléments. Des travaux complémentaires avec ce modèle nous permettront d'étudier en détail les lois physiques qui déterminent la poussée et la traînée pour lesquelles l'efficacité de l'onde et la compacité deviennent indépendantes.

Test ultime, nous avons conçu, à l'aide des données de la dynamique moléculaire, un modèle physique du poisson des sables, un robot qui nage dans un matériau granulaire. Ce robot est une chaîne de sept segments de cinq centimètres de long, chacun contenant un servomoteur dont l'oscillation est ajustée pour que l'ensemble se déplace en ondulant. Nous avons aussi augmenté la taille des particules granulaires à six millimètres, pour éviter qu'elles pénètrent dans les moteurs et simplifier la modélisation (le poisson des sables se déplace par ailleurs avec la même efficacité d'onde dans des particules plus grosses, et les simulations obtiennent aussi le même résultat). Nous avons obtenu un bon accord entre l'expérience avec le robot et sa simulation. Lui aussi présente une efficacité optimale de l'onde, tant dans la simulation que dans l'expérience, mais de 0,3 et non 0,5 comme le poisson des sables. Ce résultat est probablement dû au nombre fini de segments du robot : dans la simulation, quand on aug-

mente le nombre de segments de façon à ce que le corps soit presque lisse, l'efficacité optimale de l'onde avoisine 0,5.

Nous avons étudié deux environnements distincts où la locomotion par ondulation est efficace. Chez les serpents se déplaçant sur le sol, un frottement anisotrope du ventre engendre une poussée qui surpasse la traînée, alors que dans le sable, l'animal engendre une poussée en exploitant avec ses flancs les frottements de type liquide des milieux granulaires. Bien que les lois de traînée soient différentes dans ces deux régimes, les techniques de modélisation de la force de résistance, issues de l'hydrodynamique, s'appliquent avec succès dans les deux cas.

Ces travaux soulèvent plusieurs questions : d'abord, nous n'avons exploré les mouvements que dans deux dimensions. Qu'apporte la troisième ? Ensuite, que se passe-t-il si la forme de l'animal ou de l'onde change ? Quelles sont les limites métaboliques et musculaires des animaux étudiés ? Que se passe-t-il dans un matériau mouillé ? Avec des modèles améliorés des environnements et des organismes, ainsi que de leurs interactions, notre approche aiderait à trouver des conceptions de dispositifs robotiques sans membres, capables de se déplacer sur un terrain complexe plus vite et plus efficacement que leurs homologues naturels.

LA LIBRAIRIE DE POUR LA SCIENCE

Des livres à offrir ou à s'offrir
à découvrir et à commander sur www.pourlascience.fr



À contre-idées • Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement), de l'esprit littéraire au sein des sciences (et inversement). Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues et tout ce qui semble évident et... qui ne l'est pas. Un livre décapant, pour jouer avec les mots... et les idées.

224 pages • 19 euros • 075110

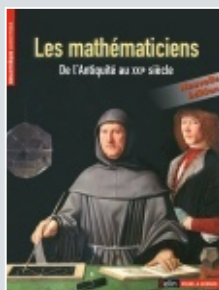


Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT.

Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

288 pages • 24 euros • 075107



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

280 pages • 24 euros • 075109



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • 075105

La supraconductivité à l'ère industrielle

Certains matériaux perdent toute résistance électrique au-dessous d'une certaine température. Ce phénomène découvert il y a tout juste 100 ans a des applications méconnues, mais de plus en plus présentes.

Pascal Tixador et Philippe Lebrun

L'ESSENTIEL

- ✓ En ce mois d'avril 2011, la découverte de la supraconductivité a 100 ans.
- ✓ Les applications de la supraconductivité sont limitées par le coût et la complexité de la cryogénie requise.
- ✓ La découverte en 1986 des premiers supraconducteurs à haute température critique a fait croire à une révolution technologique imminente.
- ✓ Cette révolution a pris du retard, mais les applications de la supraconductivité (imagerie médicale, électrotechnique, etc.) se multiplient.

© Shutterstock/Levent Konuk

Dans le monde, plus de 26 000 appareils d'IRM (imagerie par résonance magnétique) fournissent de précieux diagnostics médicaux. L'IRM est maintenant familière au grand public (voir la figure 1), mais combien savent qu'une bobine supraconductrice fonctionnant à -269°C , près du zéro absolu (0 kelvin ou $-273,15^{\circ}\text{C}$), est à la base de ce remarquable équipement médical ?

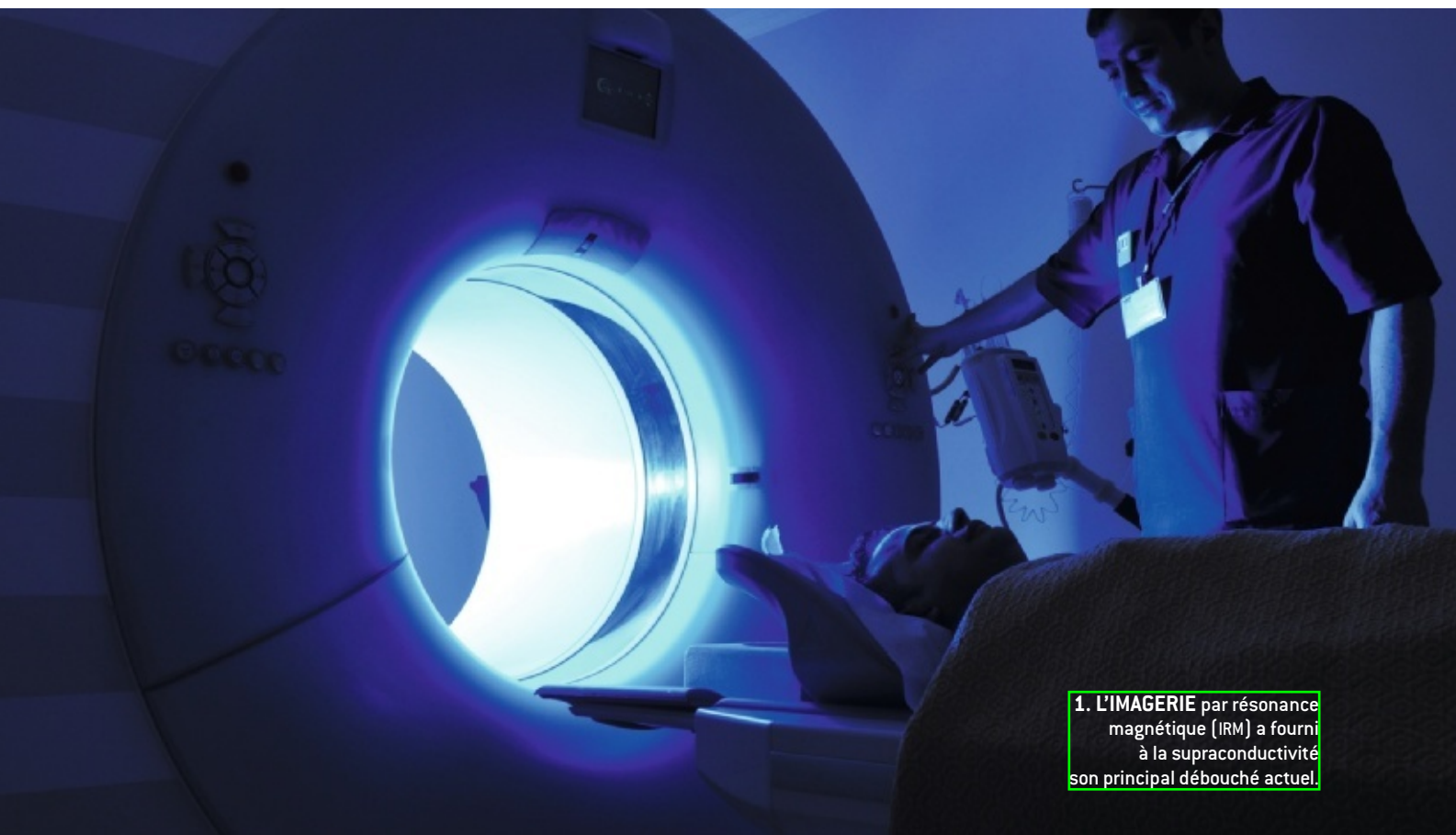
Plus généralement, les applications de la supraconductivité, phénomène extraordinaire découvert il y a 100 ans, restent méconnues, car discrètes. C'est l'occasion de passer en revue quelques-unes des utilisations les plus importantes des matériaux supraconducteurs : imagerie médicale, puissants aimants pour la physique des particules, détection et mesure de champs magnétiques infimes, transport de l'électricité, conception de circuits quantiques.

Mais commençons par rappeler ce qu'est la supraconductivité, comment elle a été découverte et quelles sont les principales propriétés des matériaux supraconducteurs. Cela nous permettra de comprendre les difficultés qui ont can-

tonné la supraconductivité à des niches particulières.

L'histoire commence dans une petite ville universitaire des Pays-Bas, Leyde, qui devint le 10 juillet 1908 l'endroit le plus froid au monde. Heike Kammerlingh Onnes (1853-1926) y avait réussi, le premier, à liquéfier de l'hélium, donc à atteindre la température record de 4,2 kelvins (-269°C). La liquéfaction de ce gaz découvert en 1895 faisait l'objet d'une compétition internationale : c'était le dernier des « gaz non condensables » qui résistait à la liquéfaction, après celle de l'hydrogène en 1898.

En ayant accès à l'hélium liquide, Kammerlingh Onnes pouvait étudier la résistivité des métaux aux très basses températures. Or le 8 avril 1911, Gilles Holst, un étudiant de Kammerlingh Onnes, qui sera l'un des fondateurs du Centre de recherche de Philips et son premier directeur, constata que la résistance électrique du mercure placé dans un capillaire en verre devenait brusquement non mesurable au-dessous de 4,15 kelvins. Après de multiples et méticuleuses vérifications, tant le phénomène paraissait extraordinaire, le mercure



1. L'IMAGERIE par résonance magnétique (IRM) a fourni à la supraconductivité son principal débouché actuel.

se révélait bien devenir un «super» conducteur : la supraconductivité était découverte. Avec la liquéfaction de l'hélium, elle valut à Kammerlingh Onnes le prix Nobel de physique en 1913, premier d'une série d'une dizaine de ces prix attribuée pour des travaux liés à la supraconductivité.

Du courant sans pertes

Examinons de plus près ce phénomène de disparition de la résistance électrique. Une résistance nulle n'a pas de sens expérimentalement, car sa valeur dépend de la précision des appareils de mesure. Des mesures très fines de la décroissance du courant dans une bobine supraconductrice soigneusement court-circuitée, dite « en mode persistant », ont indiqué que la baisse du courant atteindrait seulement 0,07 pour cent au bout d'un siècle ! Cela a fourni une borne supérieure à la résistivité électrique d'un supraconducteur (10^{-24} ohm-mètre). Avec la même bobine, mais en cuivre à température ambiante ($1,7 \times 10^{-8}$ ohm-mètre), le courant diminue de 0,07 pour cent en moins de 0,2 microseconde...

La circulation sans pertes d'un courant électrique dans une pastille supraconductrice est à l'origine de sa suspension au-dessous d'un aimant permanent, phénomène qui fascine toujours (*voir la figure 3*) : le champ magnétique de l'aimant crée une force électromagnétique sur le courant persistant porté par la pastille.

Un supraconducteur est donc un matériau qui ne connaît pas l'effet Joule, c'est-à-dire qui ne dissipe aucune chaleur lors du passage d'un courant. Cette propriété exceptionnelle n'existe qu'au-dessous d'une certaine température, la température critique. La contrainte de refroidissement limite l'exploitation commerciale de la supraconductivité. La cryogénie, science et technologie des basses températures, reste complexe et surtout très coûteuse.

Quel est le coût énergétique du refroidissement nécessaire ? Des calculs thermodynamiques montrent que, pour une machine thermique fonctionnant à température ambiante (300 kelvins ou 27 °C), il faut fournir au minimum 74 watts pour extraire un watt à un fluide refroidi à 4 kelvins (hélium liquide), tandis que ce mini-

mum est de 2,9 watts seulement à 77 kelvins (azote liquide). Il est donc 25 fois plus avantageux de fonctionner à la température de l'azote liquide...

En pratique, les installations de liquéfaction sont bien moins efficaces, d'où des coûts énergétiques trois à quatre fois supérieurs. Ces coûts élevés se reflètent pour partie dans le prix des fluides cryogéniques. En grosses quantités, l'hélium liquide à 4,2 kelvins coûte quatre à cinq euros par litre, contre 0,1 euro par litre pour l'azote liquide à 77 kelvins. Ces chiffres résument tout l'intérêt des matériaux qui sont supraconducteurs à relativement haute température.

La supraconductivité disparaît si la température dépasse une certaine valeur, mais la température n'est pas le seul acteur. Un champ magnétique trop intense, supérieur à une valeur dite critique, détruit aussi l'état supraconducteur. Kammerlingh Onnes en avait fait la mauvaise expérience dès 1913. Il avait immédiatement compris l'intérêt des supraconducteurs pour réaliser de puissants électroaimants, mais toutes ses tentatives furent vaines. Les



2. LES ACCÉLÉRATEURS ET DÉTECTEURS DE PARTICULES font désormais appel à la supraconductivité, notamment pour créer des champs magnétiques intenses. Ainsi, le nouveau collisionneur protons-

protons du CERN, le LHC, est équipé tout au long de son tunnel circulaire de 1 232 électroaimants supraconducteurs utilisant l'alliage niobium-titane (NbTi), qui produisent chacun un champ de 8,3 teslas.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Célébrations des 100 ans de la supraconductivité : www.supra2011.fr

Consortium européen des entreprises de la supraconductivité : www.conectus.org/index.html

J.-M. Courty et E. Kierlik, *Le cerveau ausculté avec des supraconducteurs*, *Pour la Science*, n° 401, mars 2011.

P. Bertet et al., *Des processeurs quantiques supraconducteurs ?*, *Dossier Pour la Science*, n° 68, pp. 62-69, juillet-septembre 2010.

L. Plévert, « Notoriété internationale », dans Pierre-Gilles de Gennes, *l'enchantement de la physique*, *Les génies de la Science*, n° 40, pp. 40-47, 2009.

Ph. Lebrun, *Cryogénie et supraconductivité pour le grand collisionneur de hadrons du CERN*, *La Revue Générale du Froid*, vol. 95, n° 1050, pp. 33-40, 2005 ; <http://cdsweb.cern.ch/record/811057?ln=fr>

J. Matricon et G. Waysand, *La guerre du froid*, Seuil, 1994.

aimants perdaient rapidement leur supraconductivité lorsque le champ magnétique produit dépassait la valeur critique (0,04 tesla pour le mercure).

Il fallut attendre la fin des années 1950 pour qu'apparaissent les premiers matériaux supraconducteurs ayant des champs magnétiques critiques élevés – plusieurs teslas –, notamment l'alliage niobium-zirconium NbZr ou le composé de niobium et d'étain Nb₃Sn. L'émergence de ces matériaux a fait passer la supraconductivité du statut de seul phénomène physique à celui de nouvelle technologie.

Ainsi, dès 1964, un aimant supraconducteur était utilisé pour détecter des particules dans une chambre à bulles au Laboratoire américain d'Argonne, près de Chicago. Les années 1950 ont été aussi importantes pour l'explication du phénomène de supraconductivité, avec les travaux du Russe Alexeï Abrikosov (prix Nobel en 2003) et la théorie dite BCS (du nom de ses trois auteurs, les Américains John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer, lauréats du prix Nobel en 1972) publiée en 1957. Notons cependant que la théorie de la supraconductivité reste inachevée, la théorie BCS ne s'appliquant apparemment pas aux nouvelles familles de supraconducteurs découvertes depuis 1986.

Pour réaliser des électroaimants puissants, le supraconducteur doit transporter un courant intense. Or un supraconducteur perd sa propriété lorsque la densité de courant dépasse un certain seuil, qui dépend

de la température et du champ magnétique (la densité de courant est l'intensité divisée par l'aire de la section du conducteur).

La densité de courant critique dépend aussi de l'élaboration du matériau, et l'art du métallurgiste est d'augmenter la densité de courant critique *via* une microstructure et une nanostructure adaptées. Les densités de courant atteintes en pratique sont souvent très supérieures à celles obtenues dans le cuivre dans des conditions normales (des centaines ou milliers d'ampères par millimètre carré pour un supraconducteur, contre quelques ampères par millimètre carré pour le cuivre).

Température, courant et champ critiques

Dans l'espace où les trois coordonnées représentent la température, l'intensité du champ magnétique et la densité de courant, l'état supraconducteur non dissipatif est délimité par une surface dite « critique » (voir la figure 4). La température critique joue un rôle particulier puisqu'elle définit le coût de la cryogénie requise. En pratique, la température de fonctionnement des dispositifs supraconducteurs doit rester inférieure à une fraction de la température critique, de l'ordre de la moitié, pour que le matériau conserve une capacité convenable de transport de courant.

Il existe deux grandes classes de supraconducteurs. D'abord, ceux à basse température critique, tels le NbTi à 9,5 kelvins

ou le Nb_3Sn à 18 kelvins. Ensuite, les composés à haute température critique, tels le YBaCuO à 93 kelvins ou le BiSrCaCuO à 110 kelvins.

Les premiers supraconducteurs à haute température critique ont été découverts en 1986 par Johannes Bednorz et Karl Müller (prix Nobel en 1987), des Laboratoires IBM à Zurich. Il s'agissait d'un composé BaLaCuO , autour de 30 kelvins alors que la température critique du supraconducteur le plus « chaud » connu à l'époque (Nb_3Ge) était de 23,3 kelvins. Une quête enthousiaste d'autres matériaux s'ensuivit et les records de température critique tombèrent : YBaCuO (janvier 1987), BiSrCaCuO (1988), etc. Le record est aujourd'hui détenu par le composé HgTlBaCaCuO avec 164 kelvins sous une pression de 30 gigapascals, valeur qui descend à 138 kelvins (-135°C) à la pression atmosphérique.

La découverte du composé YBaCuO a marqué une étape : c'était le premier matériau restant supraconducteur au-dessus des 77 kelvins de l'azote liquide, jusqu'à 93 kelvins.

En 2001, Jun Akimitsu, un chercheur de Tokyo, découvrait que le diborure de magnésium (MgB_2) est supraconducteur à 39 kelvins. Cette température critique est, certes, plus faible que pour bien d'autres supraconducteurs, mais ce matériau est simple et peu onéreux à produire. Des dispositifs d'imagerie fondés sur des électroaimants à MgB_2 sont fabriqués et commercialisés depuis 2006, alors que ce n'est toujours pas le cas avec les supraconducteurs à haute température critique.

Une dernière famille de supraconducteurs a été découverte en 2008. Il s'agit de pnictures de fer, des semi-métaux à base de fer et d'arsenic ou de phosphore. Ces nouveaux supraconducteurs ont des températures critiques allant jusqu'à 56 kelvins. Ils ouvrent une voie nouvelle pour comprendre la supraconductivité et les conditions de son apparition, puisqu'une explication satisfaisante de la supraconductivité à haute température critique manque encore. Et comme on ignore s'il existe une limite supérieure à la température critique, un objectif ultime serait de découvrir ou de concevoir un supraconducteur à température ambiante, qui n'exigerait plus de cryogénie !

Un supraconducteur ne présente aucune perte, mais cette propriété n'est réalisée que lorsque l'environnement électromagnétique du supraconducteur ne varie

LES AUTEURS



Pascal TIXADOR est professeur à l'Institut polytechnique de Grenoble [Grenoble INP/ENSE³] et chercheur à l'Institut Néel et au Laboratoire de génie électrique de Grenoble [G2Elab]. **Philippe LEBRUN** travaille au CERN, le Laboratoire européen pour la physique des particules, à Genève, sur les applications de la supraconductivité et de la cryogénie aux accélérateurs de particules.

pas au cours du temps. Traversé par un courant variable ou soumis à un champ magnétique variable dans le temps, un supraconducteur est le siège de « pertes CA » (pour *courant alternatif*) : d'après les lois de l'électromagnétisme, toute variation temporelle du champ magnétique (extérieur ou lié au courant transporté) induit un champ électrique qui, associé aux courants dans le supraconducteur, crée des pertes. C'est pourquoi les supraconducteurs sont surtout utilisés en courant continu.

Une rupture technologique

Comme nous l'avons vu, un matériau n'est supraconducteur que dans des conditions bien particulières, et c'est pourquoi la technologie correspondante est onéreuse. Le cuivre ou l'aluminium sont de très mauvais conducteurs en comparaison des supraconducteurs, mais ils répondent en général assez bien aux cahiers des charges actuels de l'électrotechnique – les techniques de production, de transport et de distribution de l'électricité – avec des rendements pouvant atteindre 99,6 pour cent pour les très gros transformateurs par exemple.

La supraconductivité améliore notablement les performances électrotechniques et offre de nouvelles perspectives (nous y reviendrons). En revanche, elle constitue une rupture technologique totale, face à laquelle les électriciens et les distributeurs d'électricité restent assez conservateurs. Quelques chiffres permettent de mieux les comprendre. Une seule heure d'arrêt de l'alternateur des futures centrales nucléaires EPR (1 650 mégawatts) représentera 132 000 euros de manque à gagner et ruinera le gain de 0,1 pour cent en rendement apporté par la supraconductivité pour une durée d'environ 42 jours. La question de la fiabilité se pose donc immédiatement. Reste que de multiples réalisations en exploitation donnent des chiffres plus encourageants. En témoigne l'entreprise française *Nexans*, qui a plus de 12 ans d'expérience en conditions opérationnelles avec des câbles supraconducteurs (voir l'encadré page 82).

Les matériaux à basse température critique NbTi et Nb_3Sn représentent plus de 98 pour cent en volume du marché actuel des supraconducteurs. Cela paraît surprenant alors que, par exemple, le composé YBaCuO découvert en 1987 a une température critique d'environ 90 kelvins,



3. UN ASPECT SPECTACULAIRE et bien connu de la supraconductivité est la lévitation stable d'une pastille de matériau supraconducteur au-dessus ou au-dessous d'un aimant permanent. L'aimant induit dans la pastille des courants électriques ; ces derniers créent un champ magnétique dont l'interaction avec l'aimant entraîne une sustentation stable. L'utilisation de supraconducteurs pour les trains à lévitation magnétique est envisagée par certains.

ce qui autorise un refroidissement à l'azote liquide et non plus à l'hélium liquide. Mais la disponibilité industrielle, la facilité de mise en œuvre, le coût ou la constance des performances sont d'autres critères souvent plus importants.

C'est déjà le cas parmi les supraconducteurs à basse température critique : les conducteurs à base de Nb_3Sn (une vingtaine de tonnes en 2009, mais le projet ITER de réacteur expérimental pour la fusion nucléaire en utilisera plus de 500 tonnes) sont nettement moins utilisés que les conducteurs à base de NbTi (2000 tonnes

en 2009) ; pourtant, leurs température et champ critiques sont bien plus favorables et ils ont été découverts quelques années plus tôt. Mais le Nb_3Sn est beaucoup plus onéreux et plus complexe à mettre en œuvre. Il n'est donc utilisé que lorsque le NbTi ne convient plus, notamment pour de très hauts champs magnétiques, supérieurs à 12 teslas.

Les matériaux à haute température critique se sont révélés très complexes à mettre en œuvre et il a fallu redoubler d'imagination pour y faire passer des courants intenses. Ce sont des céramiques très

fragiles, et le transport du courant électrique y est sensible aux défauts et à l'orientation des grains cristallins. Les défis ont cependant été relevés et la production de conducteurs YBaCuO performants atteint désormais le stade préindustriel. Le coût de ces conducteurs reste très élevé, mais, comme il est dû au procédé plus qu'aux matériaux, l'industrialisation devrait le faire décroître rapidement.

Venons-en aux applications proprement dites de la supraconductivité. L'une des plus importantes porte sur l'imagerie médicale, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) en particulier. C'est d'ailleurs l'IRM qui a apporté à la supraconductivité son principal débouché commercial.

Au service de l'imagerie médicale

L'IRM est une technique d'imagerie de choix pour tous les tissus mous, tels les muscles ou le cerveau. La résolution peut être meilleure que le millimètre dans tout le volume étudié. L'IRM va maintenant au-delà de la simple imagerie si l'on suit l'activité cérébrale *via* les variations locales des débits sanguins (IRM fonctionnelle, ou IRMf). Plus récemment est apparue l'IRM de diffusion (IRMd) qui permet de suivre le mouvement des molécules d'eau à l'échelle microscopique et qui apporte d'autres informations précieuses sur le fonctionnement du cerveau.

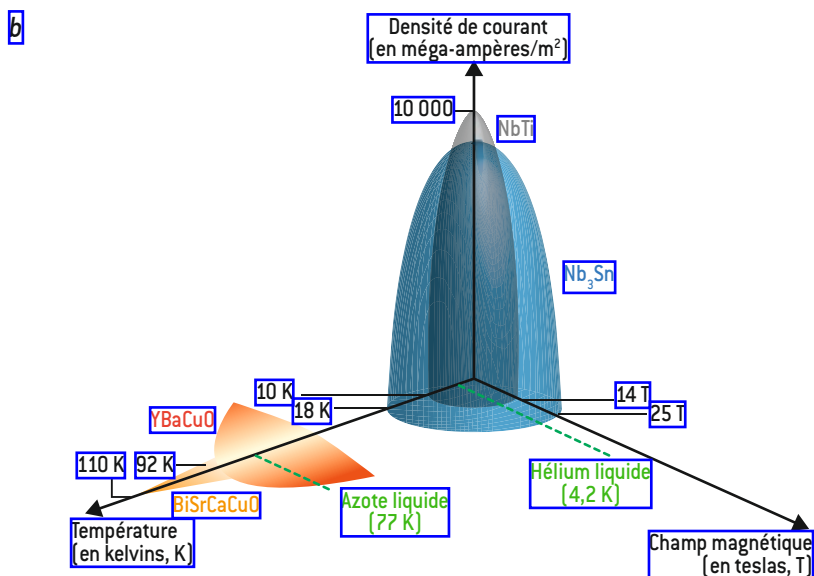
Toutes ces techniques utilisent un champ magnétique uniforme et constant pour aligner les spins (moments cinétiques intrinsèques) de noyaux atomiques, tels ceux d'hydrogène, et les faire tourner autour de l'axe du champ à des fréquences radio (quelques dizaines de mégahertz). Excités par un champ magnétique perpendiculaire variant à la même fréquence, les spins nucléaires oscillent et entrent en résonance, ce qui produit un signal à l'arrêt de l'excitation. L'analyse de ce signal permet de construire des images qui reflètent l'activité des tissus ou leur composition chimique.

Les bobines (classiques) qui fournissent le champ aux fréquences radio sont responsables des claquements perçus lors d'un examen d'IRM. La bobine supraconductrice, elle, est très discrète, mais son refroidissement utilise des cryoréfrigérateurs qui produisent un bruit sourd à quelques hertz.

Le rapport signal sur bruit et la résolution spatiale augmentent avec l'amplitude

a

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cd	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cd	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac**	Rf	Ha	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							
			* Série des lanthanides														
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			** Série des actinides														
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	



4. LA SUPRACONDUCTIVITÉ EST ASSEZ FRÉQUENTE dans la nature : une trentaine (*a*, cases en gris foncé) des 103 éléments du tableau de Mendeleïev sont supraconducteurs à température suffisamment basse et sous pression atmosphérique. Une vingtaine d'autres (*en vert*) ne sont supraconducteurs que sous haute pression. Par ailleurs, l'état supraconducteur ne se maintient que si le champ magnétique et la densité de courant qui circule ne sont pas trop élevés. Dans une représentation où les trois axes de coordonnées représentent les valeurs maximales de la température, du champ magnétique et de la densité de courant, l'état supraconducteur est délimité par une surface dite critique (*b*, les surfaces critiques de quelques supraconducteurs).

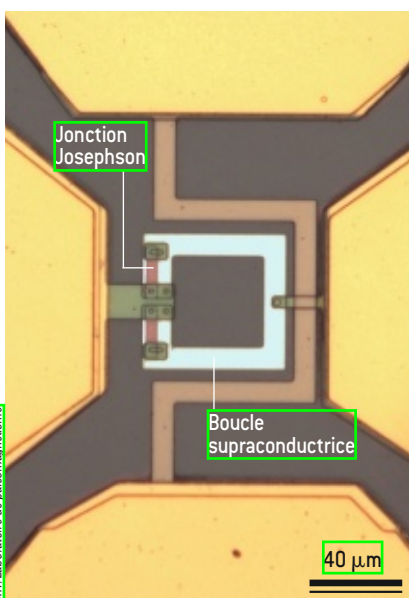
du champ magnétique constant. Celle-ci doit être particulièrement stable dans le temps (dérive moyenne inférieure à 0,1 partie par million et par heure). Une bobine supraconductrice est la meilleure réponse à ces exigences pour des champs magnétiques supérieurs à 0,5 tesla environ. Il faut noter qu'un imageur classique à 0,6 tesla consomme 225 kilowatts, alors qu'un imageur supraconducteur à 1,5 ou même 3 teslas ne consomme que 7,5 kilowatts pour le maintien de la basse température. La bobine fonctionne généralement en mode persistant, donc sans alimentation.

La tendance de l'imagerie par résonance magnétique est à une augmentation du champ. Les appareils courants utilisent un aimant solénoïde de 1,5 tesla, pesant environ cinq tonnes. Le marché des appareils à 3 teslas est en forte croissance. Des appareils à haut ou très haut champ (supérieur à 7 teslas) sont plus rares, mais ils se multiplient dans les laboratoires de recherche. Ainsi, le projet français Iseult/INUMAC (*Imaging of Neuro Disease Using High Field Magnetic Resonance and Contrastophores*), en construction à Saclay, près de Paris, vise un champ de 11,7 teslas. Il offrira pour l'imagerie du cerveau une résolution spatiale et temporelle dix fois supérieure à celle des instruments actuels. L'aimant, long de quatre mètres et d'un diamètre proche de cinq, pèsera 150 tonnes...

La magnétoencéphalographie (voir la figure 5) et la magnétocardiographie sont deux autres outils d'investigation médicale où la supraconductivité est primordiale. Elles reposent sur la mesure du champ magnétique créé par l'activité du cerveau et du cœur respectivement. L'analyse des signatures magnétiques renseigne sur certaines pathologies.

Pour l'heure, la magnétoencéphalographie et la magnétocardiographie sont utilisées principalement à des fins de recherche dans une centaine de laboratoires à travers le monde, mais elles sont en passe de devenir des outils de diagnostic dans les hôpitaux.

Les champs magnétiques en question sont extrêmement faibles, d'où le recours aux SQUID (*Superconducting Quantum Interference Devices*, ou dispositifs supraconducteurs à interférences quantiques). Ces petits circuits à base de boucles supraconductrices interrompues en deux endroits par une mince tranche isolante, une « jonction Josephson », sont les capteurs magnétiques les plus sensibles



5. LA MAGNÉTOENCÉPHALOGRAPHIE consiste à enregistrer les infimes champs magnétiques produits par l'activité du cerveau. Pour cela, le patient porte un casque (en haut) tapissé de centaines de petits capteurs à base de SQUID. Un SQUID est un circuit supraconducteur très sensible au champ magnétique qui le traverse (ci-dessus).

qui existent. Ils exploitent le fait que la supraconductivité est un état quantique, observable à l'échelle macroscopique.

Un courant peut circuler (par effet tunnel) à travers la jonction Josephson sans qu'il y ait une tension à ses bornes. Et le couplage des états quantiques dans les supraconducteurs situés de part et d'autre de chaque jonction fait qu'un SQUID est très sensible au champ magnétique qui traverse la boucle.

Plus généralement, la jonction Josephson est la brique de base de toute une électronique « quantique ». Des circuits avec ces jonctions Josephson peuvent se comporter comme des sortes d'atomes artificiels, où l'énergie ne peut prendre que des valeurs bien déterminées. Ils constituent des systèmes modèles pour mener des expériences et sonder les concepts de la mécanique quantique. Ils sont aussi intéressants pour la nanoélectronique, où les dimensions nanométriques font apparaître des effets quantiques. Enfin, ils ouvrent la voie aux processeurs quantiques à base de qubits (bits quantiques), c'est-à-dire à de possibles ordinateurs quantiques.

Traquer les particules

La supraconductivité est également le compagnon indissociable d'un autre domaine, la physique des particules élémentaires, dont les outils de base sont les accélérateurs et détecteurs de particules. Ces appareils font appel à des champs électromagnétiques dans de grands volumes pour accélérer, guider, focaliser et analyser les trajectoires des particules chargées. En donnant accès à des champs plus élevés et en réduisant la consommation d'énergie, aimants supraconducteurs et cavités supraconductrices à champs de radiofréquence ont rendu possibles les progrès spectaculaires de ces machines.

C'est pour la physique des particules qu'ont été développés les premiers aimants supraconducteurs, dès les années 1960. Ce domaine a donné une grande impulsion aux matériaux supraconducteurs et continue de faire progresser les techniques.

Le premier cyclotron, construit à Berkeley en 1930, tenait dans la paume d'une main. Aujourd'hui, le grand collisionneur LHC du CERN accélère des protons à une énergie 100 millions de fois supérieure, le long d'un cercle de 26,7 kilomètres de circonférence. Ces énergies sont nécessaires pour sonder la matière à la très petite échelle

LE MARCHÉ DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ

En 2009, le marché mondial de la supraconductivité était de 4,3 milliards d'euros, dominé à 78 pour cent (3,355 milliards d'euros) par l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN). La supraconductivité pour les instruments de recherche représentait 765 millions d'euros. Le reste concerne les applications émergentes : électrotechnique (100 millions d'euros) et électronique (80 millions d'euros). On s'attend à une croissance modérée des marchés dominants, mais à une très forte augmentation des marchés émergents.



Pour la LIPA, l'un des principaux opérateurs de réseaux électriques des États-Unis, la Société française Nexans a fabriqué et installé un câble de transport supraconducteur mis sous une tension de 138 000 volts. C'est la liaison supraconductrice la plus longue (600 mètres) et la plus puissante du monde (ci-contre, une coupe du câble ; ci-dessus, son raccordement au réseau).

des constituants élémentaires, et pour produire des particules de masse élevée qui ont pu exister juste après le Big Bang. Les masses des particules appartenant au « modèle standard » de la physique des particules restent aujourd'hui inexplicables. Il y a plusieurs décennies, le physicien britannique Peter Higgs a proposé un mécanisme théorique qui suppose l'existence d'une particule, le boson de Higgs ; l'interaction de ce dernier avec les particules connues leur conférerait leurs masses.

Mais ce boson de Higgs aurait une masse très élevée et il faut donc des accélérateurs de particules particulièrement puissants pour le découvrir. Deux accélérateurs, tous deux à technologie supraconductrice, sont sur les rangs : le *Tevatron* américain (0,9 téraélectronvolt par faisceau, donc le double pour l'énergie des collisions) qui sera bientôt arrêté et le LHC (*Large Hadron Collider*, ou grand collisionneur de hadrons) du CERN, à Genève (7 téraélectronvolts par faisceau).

Dans ces accélérateurs, des aimants maintiennent les particules sur une trajec-

toire circulaire. À énergie donnée, plus le champ magnétique fourni par les aimants est intense, plus le rayon de l'accélérateur est petit, d'où l'intérêt de la technologie supraconductrice.

Les chiffres pour le LHC sont sans appel. Grâce à ses 1 232 aimants en niobium-titane (NbTi) qui produisent sans pertes un champ de 8,3 teslas, la circonférence du LHC n'est « que » de 26,7 kilomètres, avec un système de cryogénie qui consomme 40 mégawatts seulement (voir la figure 2). La technologie classique, avec des aimants résistifs, limite le champ à 1,8 tesla. Elle aurait conduit à une circonférence de 110 kilomètres et une consommation de 900 mégawatts. Sans la supraconductivité, le LHC n'était tout simplement pas concevable...

2 000 tonnes de niobium-titane au LHC

Au LHC, qui a démarré en 2008, d'autres aimants jouent le rôle de lentilles magnétiques et focalisent les faisceaux. Le champ magnétique se révèle aussi très utile autour des zones de collisions pour dévier les particules chargées produites et ainsi mieux les analyser. Ces aimants de détection doivent produire des champs intenses dans de grands volumes et être peu encombrants pour laisser le maximum de place aux détecteurs eux-mêmes : c'est le cahier des charges idéal pour un aimant supraconducteur. Le LHC fait ainsi appel à plusieurs très grands aimants supraconducteurs de détection, tel le toroïde supraconducteur ATLAS, dont la masse de matériau supraconducteur est de 376 tonnes. Au total, le LHC utilise plus de 2 000 tonnes de niobium-titane.

Notons que les accélérateurs de particules ont aussi des applications médicales, telle la protonthérapie où des faisceaux de protons déposent leur énergie avec une précision millimétrique et sans endommager les tissus traversés. La production des protons avec la bonne énergie (plusieurs centaines de mégaélectronvolts) fait, là encore, intervenir des aimants, auxquels la supraconductivité peut conférer une masse, un volume et une consommation réduits.

Un autre domaine d'application de la supraconductivité, et qui prend de plus en plus d'importance, est celui des réseaux de distribution de l'électricité. Étant donné la place que cette forme d'énergie occupe dans la vie moderne, les réseaux électri-

ques sont devenus une infrastructure critique, qu'il faut sécuriser au mieux, avec une qualité (en termes de tension notamment) garantie.

Sécuriser les réseaux électriques

Une façon simple de sécuriser la fourniture d'électricité à un point de consommation donné est de multiplier les chemins possibles d'alimentation. Cette technique très efficace est limitée par le problème des « courants de défaut » (dus à un court-circuit par exemple). En effet, un disjoncteur ne coupe pas instantanément un courant de défaut, ce qui laisse le temps à un tel courant d'occasionner des dégâts sérieux. Par exemple, les forces électrodynamiques étant proportionnelles au carré du courant, un courant de défaut 20 fois supérieur au courant normal conduit à des forces 400 fois plus élevées.

Or lorsqu'on multiplie les chemins d'alimentation, les courants de défaut s'additionnent. La solution à ce problème est de limiter le courant de défaut, et pas seule-

ment de l'interrompre. Comment ? La seule réponse satisfaisante est fournie par la supraconductivité, grâce au courant critique qui caractérise un matériau supraconducteur.

Pourquoi ? Parce que dès que le courant dépasse la valeur critique, l'élément supraconducteur perd sa supraconductivité et développe presque instantanément une résistance qui limite le courant de défaut. En revanche, pour des courants inférieurs à la valeur critique, l'élément est électriquement transparent, puisque sans résistance. Deux limiteurs supraconducteurs ont ainsi déjà été installés dans le réseau européen et les distributeurs d'électricité s'intéressent de plus en plus à ces appareils.

D'autres équipements supraconducteurs ont fait leur apparition en électrotechnique. Notamment, une liaison supraconductrice de 600 mètres fonctionne depuis avril 2008 dans le réseau électrique américain à très haute tension (138 kilovolts) ; elle peut transporter 600 mégavoltampères (puissance nécessaire pour 600 000 habitants environ).

Ainsi, les supraconducteurs sont devenus indispensables pour certaines applications, notamment en électrotechnique comme nous venons de le voir. Sans supraconductivité, l'IRM n'aurait pas connu son développement actuel et le LHC aurait été inconcevable. Les supraconducteurs sont à la base de détecteurs ultrasensibles pour la physique ou de nouveaux outils de diagnostic médical pour le cerveau ou le cœur, ils permettent de construire des systèmes modèles pour la physique et l'ingénierie quantiques. Et ils rendent bien d'autres services, par exemple dans les réacteurs expérimentaux pour la fusion nucléaire.

La supraconductivité représente une technologie de rupture, qui prend du temps pour s'imposer, surtout dans un marché bien établi et parce qu'elle est tributaire de la cryogénie. Mais le centenaire de la découverte de la supraconductivité coïncide avec deux faits : la préindustrialisation de matériaux à haute température critique performants (YBaCuO) et de nouvelles exigences pour les réseaux d'électricité. L'avenir des supraconducteurs n'en est que plus prometteur.



le collège
universcience
à la Cité des sciences et de l'industrie

Colloque
Vendredi 8 avril à 14 h
Samedi 9 avril à 10 h

L'océan et le climat vus de l'espace

Colloque organisé en partenariat avec le COSPAR (Committee on space research).

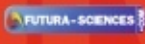
L'océan, qui couvre les deux tiers de la surface de la Terre, joue un rôle déterminant dans le contrôle et l'évolution du climat de la planète. Observer l'océan est devenu l'affaire des satellites, qui permettent d'en survoler la totalité en un temps très court, et qui donnent accès à un ensemble de données essentielles : température, vent et vagues, niveau de la mer, salinité, glaces de mer... La combinaison des observations spatiales et de celles acquises par les mesures de la mer constitue un outil puissant au service de la surveillance des océans et du changement climatique.

Le colloque est placé sous la présidence de **Giovanni Bignami**, président du COSPAR et de **Roger-Maurice Bonnet**, directeur de l'Institut international des sciences spatiales.

Il est organisé à l'occasion de l'ouverture de l'exposition *Océan, climat et nous* que la Cité des sciences et de l'industrie propose à partir du 6 avril 2011.

Programme complet : universcience.fr

Avec le soutien de



HISTOIRE DES SCIENCES

Madame d'Arconville, femme de sciences au temps des Lumières

De la traduction scientifique à ses travaux sur la putréfaction, cette femme du XVIII^e siècle, savante reconnue par ses pairs, mit un point d'honneur à rester dans l'anonymat.

Patrice BRET

1 804. Fortunée Briquet, femme de lettres, dédie au Premier consul Napoléon Bonaparte, sur le point d'accéder au trône impérial, un dictionnaire féministe dans lequel elle fait sortir une inconnue de l'anonymat : « Elle joignit à l'étude de la physique et de la chimie, celle de la morale, de la littérature et des langues. » L'entrée « Arconville » ignore que l'auteur vit encore et, à 80 ans passés, continue d'écrire même si elle ne publie plus depuis 20 ans. Elle omet aussi l'histoire, dernier domaine d'étude de celle qui fut un auteur original du siècle des Lumières et l'une des quelques femmes de l'époque à avoir produit de la science. Qui est donc cette Mme Thiroux d'Arconville, née Marie Geneviève Charlotte Darlus (1720-1805), à la production si variée que l'on redécouvre aujourd'hui après une longue éclipse ?

« Une des femmes les plus instruites et les plus modestes du XVIII^e siècle », déclare en 1820 le bibliographe Antoine-Alexandre Barbier, qui ajoute : « Ses nombreuses productions obtinrent, de son vivant, beaucoup de lecteurs ; par leur seul mérite. » La même année, la *Biographie nouvelle des contemporains*, dictionnaire des Français célèbres depuis la Révolution, lui ouvre le champ des grands dictionnaires historiques. Des extraits de ses œuvres morales sont cités, et l'on se réfère à ses traités scientifiques. Sa gloire posthume s'éteint cependant au fil des décennies.

Bien éphémère au regard de l'histoire, cette réputation vient de rebondir en ce début de XXI^e siècle avec la mise au jour inattendue des *Pensées, réflexions et anecdotes*

de Mme d'Arconville : 12 volumes de manuscrits inédits rédigés à la fin de sa vie, soit plus de 200 textes que l'on croyait perdus à jamais. « Il paraît que Mme d'Arconville n'avait d'autre but, en écrivant, que celui de se rendre utile », écrit encore Fortunée Briquet. C'est le cas pour une bonne part de sa production imprimée, mais elle est surtout mue par le besoin d'« écrire à tout prix », besoin qui l'anime jusqu'à la mort. Car, quand elle reprend la plume après la Révolution,



1. MME D'ARCONVILLE (1720-1805) fut un auteur prolifique tant en sciences qu'en lettres.

elle n'entend plus écrire que pour une poignée de proches, rédigeant pour passer le temps une série de petits essais de facture très libre ou recopiant des œuvres de jeunesse inédites. Elle a un ton plus personnel et un regard distancié, parfois non dénué d'humour. Si elle est loin de Rousseau, dont

elle admire l'éloquence, ses textes rappellent l'introspection de ses maîtres à penser Montaigne et Pascal, ou le style incisif de ses contemporains les écrivains Jacob Grimm et Louis-Sébastien Mercier. Revenant comme une nostalgie ou un regret, la science reste un leitmotiv de ce recueil hybride, à l'image de l'intérêt qu'elle lui a porté toute sa vie.

Traductrice et expérimentatrice

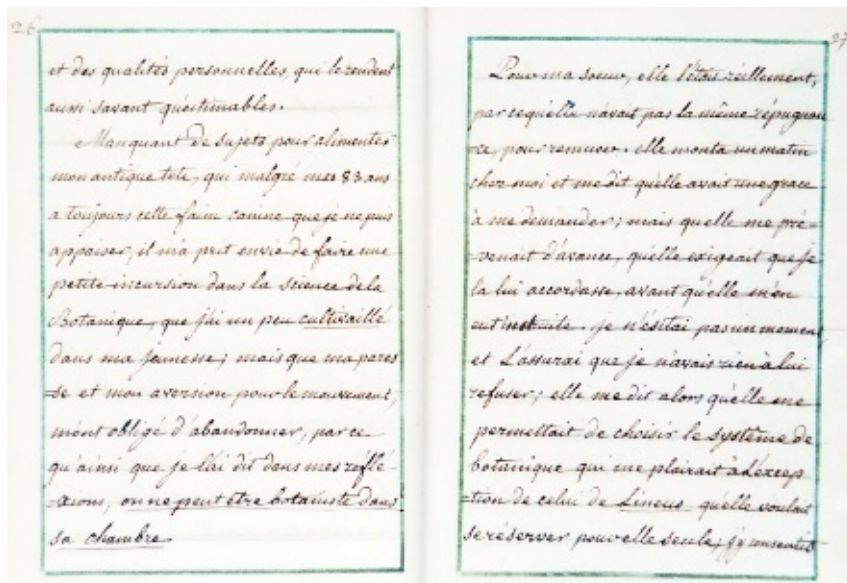
Certes, Mme d'Arconville n'eut ni l'envergure intellectuelle ni la notoriété d'Émilie du Châtelet (1706-1749), traductrice des *Principia* de Newton et compagne de Voltaire – faute, peut-être, d'avoir bénéficié de l'éducation de celle-ci... Enfant, elle aurait aimé être ambassadeur, si elle avait été un homme. Adulte, elle jongle entre sciences, littérature et histoire – activités masculines –, traductions et production personnelle. Elle est pourtant bien plus qu'un simple écrivain. Fille d'un riche fermier général, mariée à 14 ans à un jeune conseiller – bientôt président – au Parlement de Paris, elle est d'abord une lectrice acharnée que guident la curiosité et le goût du savoir. À 20 ans – déjà mère de ses trois fils ! –, elle prend son éducation en mains et se mue en femme savante autodidacte. Femme de sciences, elle l'est à la fois en tant que traductrice critique et, cas plus rare, comme expérimentatrice patiente et rigoureuse. Tout cela dans le plus parfait anonymat, choisi et maintenu parce qu'elle a une conscience aiguë du risque social pour les femmes de lettres : « Affichent-elles la

science ou le bel esprit ? Si leurs ouvrages sont mauvais, on les siffle ; s'ils sont bons, on les leur ôte ; il ne leur reste que le ridicule de s'en être dites les auteurs. »

Elle a d'ailleurs peu d'empathie pour son sexe et préfère la compagnie des hommes instruits. À l'instar du naturaliste Buffon ou de Diderot, Mme d'Arconville débute sa carrière d'auteur comme traductrice – traducteur, même, puisqu'elle masque soigneusement son sexe. C'est là le meilleur moyen de se rendre utile sans s'exposer publiquement. En 30 ans, elle traduit – de l'anglais surtout, mais aussi de l'italien et du latin – une trentaine d'auteurs, dont 12 médecins, chirurgiens et chimistes. Dès 1747, elle se fait la main sur « deux romans faciles à traduire », qu'elle ne publie qu'une quinzaine d'années plus tard. Enhardie par un premier succès avec une traduction difficile de littérature pédagogique (Lord Halifax, *Avis d'un père à sa fille*, 1756), elle choisit de traduire la science, au moment même où le déclin du latin et le développement des langues nationales provoquent l'irruption d'un marché des traductions scientifiques. Pendant dix ans, les sciences sont sa principale occupation.

« Cultiver » les sciences pour être utile

Ce n'est d'abord qu'un amusement de jeune femme de la haute société : Mme d'Arconville dit avoir « cultivé » la botanique. Sa sœur se réservant le système botanique élaboré par le naturaliste suédois Carl von Linné (1707-1778), elle adopte celui du botaniste Joseph Pitton de Tournefort (1656-1708) et aménage dans son château de Crosne, dans l'Essonne, un cabinet d'histoire naturelle, une pépinière et deux serres chaudes pour élever les « arbres étrangers » qu'elle tire des collections royales : le naturaliste Bernard de Jussieu les lui fournit, ainsi qu'un double des clefs des serres du Jardin du roi (aujourd'hui Muséum national d'histoire naturelle), où elle suit ses cours et se lie avec Malesherbes et Diderot. Mais, lassée par le terrain, elle finit par abandonner agriculture et botanique, car « on ne peut être botaniste dans sa chambre ».



2. DANS CE MANUSCRIT extrait des *Pensées, réflexions et anecdotes* de Mme d'Arconville, retrouvées en 2007, Mme d'Arconville, alors âgée de 83 ans, revient sans complaisance sur sa période botanique. On y apprend qu'elle a abandonné cette activité par « paresse » et « aversion pour le mouvement », ou comment elle a choisi le système botanique qu'elle étudierait.

Marquée notamment par l'enseignement du chirurgien Jacques-Bénigne Winslow, elle se tourne vers l'anatomie. Sa première œuvre scientifique est la traduction du *Traité d'ostéologie* d'Alexander Monro (1759) : « Cet ouvrage ayant, à juste titre, une très-grande réputation, non-seulement en Angleterre, mais encore parmi les anatomistes qui savent l'anglais, j'ai cru rendre service à ceux de ma Nation qui n'entendent pas cette langue, de le leur donner en français. » Ornée d'un frontispice et de culs-de-lampe spécialement dessinés par le peintre Pierre, protégé de Mme de Pompadour, la splendide édition française qu'elle édite contraste avec les modestes éditions d'Édimbourg. Contre l'opinion de l'auteur, elle ajoute une trentaine de planches de squelettes, en particulier un squelette féminin (voir la figure 4). Ces gravures sortent de l'atelier de Jean-Joseph Suë, professeur d'anatomie à l'Académie de peinture, qui annote l'ouvrage. La page de titre peut même laisser croire qu'il en est le traducteur. L'artifice est dénoncé par un rival à l'Académie des sciences, laquelle élit à la place de Suë le fils du censeur royal qui a donné son approbation à la publication trois mois plus tôt...

L'AUTEUR



Patrice BRET est chercheur au Centre Alexandre Koyré et au Centre de recherches en histoire des sciences et des techniques, à Paris.

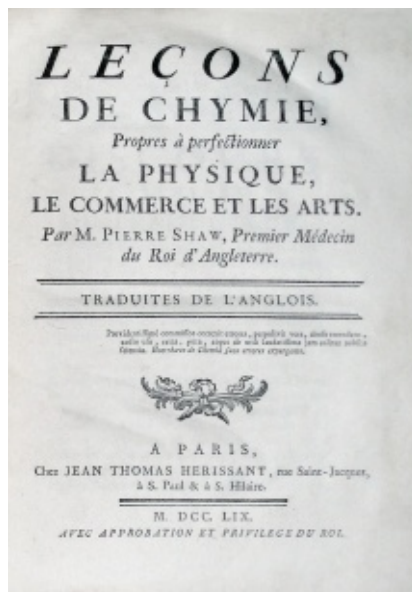
Était-il dans la confidence ou est-ce seulement l'influence de la charge de directeur de l'Académie qu'il exerce aussi ? Quoi qu'il en soit, le jeu est réservé aux hommes.

Au demeurant, l'anonymat est surtout un masque pour le public et le nom de la traductrice circule dans la profession : dans son *Histoire de l'anatomie et de la chirurgie* (1770), Antoine Portal révèle que le *Traité d'ostéologie* a été « traduit en français par Madame la Présidente d'Arconville, et exécuté à ses frais, avec des planches, et des remarques par M. Sue ». Fortunée Briquet présente même l'ouvrage comme « publié sous un autre nom que le sien quoiqu'elle en soit véritablement l'auteur » ! Malgré cela, aujourd'hui comme hier, les bibliographes et les historiens de la médecine omettent souvent de restituer l'identité de la traductrice.

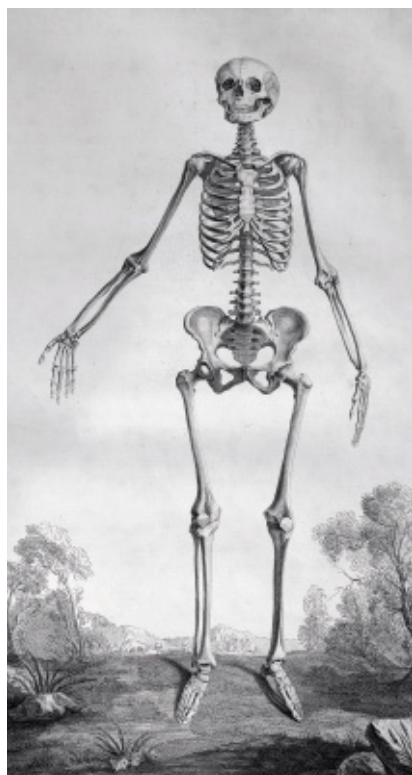
Parallèlement, Mme d'Arconville a un intérêt croissant pour la chimie, encouragée par son parent François Poulletier de la Salle, chimiste amateur dont elle partage les expériences, et par son ami le chimiste Pierre-Joseph Macquer, qui révise ses manuscrits. Ainsi, l'année-même de la publication du *Traité d'ostéologie*, elle publie encore la traduction des *Leçons de chymie propres à perfectionner la physique, le commerce et les arts* de Peter Shaw. Si l'édition est toujours anonyme, elle n'a plus recours à un prête-nom. Les recensions saluent la rectification des erreurs et le « discours préliminaire » original de près de 100 pages qu'elle y joint – une histoire critique de la chimie –, le texte dont elle est la plus fière à la fin de ses jours.

De cette époque date encore la traduction de 15 mémoires d'anatomie, médecine et botanique, tirés des *Philosophical Transactions* de la *Royal Society* de Londres. Mais la traduction n'est qu'un marchepied vers la pratique de la science. Le texte et le laboratoire se soutiennent et s'enrichissent mutuellement.

Dans son laboratoire de Crosne, Mme d'Arconville travaille avec deux amis amateurs de chimie sur les résines ou la bile humaine. Elle s'attaque ensuite à ce que Macquer considère comme « ce qu'il y a de plus difficile [et] en même temps ce qu'il y a peut-être de plus important à connoître dans la physique » : la putréfaction, qu'elle regarde comme la clef de



3. FRONTISPICE des *Leçons de chymie* de Pierre Shaw, premier médecin du roi d'Angleterre, traduites anonymement par Mme d'Arconville en 1759.



4. LE SQUELETTE DE FEMME que Mme d'Arconville ajouta à sa traduction [anonyme] du *Traité d'ostéologie* d'Alexander Monro (1759). Ses traductions étaient toujours critiques et annotées.

toutes les « sciences physiques » et la base de l'histoire naturelle. Elle se lance dans un long programme de recherche expérimentale dont l'ambition est tant utilitaire et humanitaire (la conservation des aliments) que scientifique : l'étude de la transformation de la matière entre les trois règnes.

La putréfaction au jour le jour

Pendant huit ans, de 1755 à 1763, elle mène plusieurs centaines d'expériences sur la conservation de substances putrescibles (viandes, poissons, œufs, lait), en suivant un protocole rigoureux : chaque jour, elle note l'état de dégradation des échantillons expérimentés et les conditions extérieures (température, humidité). Elle en publie les résultats en 1766 dans un *Essai pour servir à l'histoire de la putréfaction*, qu'elle signe « par le traducteur des *Leçons de Chymie* de M. Shaw » (voir la figure 5).

Sa principale conclusion est que « le pouvoir conservateur » se trouve dans la préservation du « contact de l'air extérieur », bien qu'elle néglige d'effectuer une expérimentation dans le vide. Sur le plan pratique, elle prouve que le quinquina est le meilleur « antiseptique », capable de ralentir le processus inévitable de la putréfaction. Elle rejoint ici le médecin britannique John Pringle, de la *Royal Society*, dont elle discute les travaux parus à Londres en 1752 et traduits à Paris en 1755. En revanche, elle réfute ses dires sur les vertus supposées de la camomille, que contredisent ses expériences. Enfin, elle s'incline devant les résultats du chirurgien britannique David MacBride, résultats publiés à Londres en 1764, dont elle n'a connaissance que pendant l'impression de son propre ouvrage et qu'elle juge supérieurs aux siens (il n'est cependant pas plus avancé qu'elle dans la découverte des micro-organismes impliqués dans le phénomène).

MacBride lui retourne l'hommage en 1767 et se montre admiratif du soin apporté par son compétiteur inconnu à ses expériences. Le travail original de Mme d'Arconville est encore cité, de son vivant, par Macquer (1778), par le chimiste irlandais William Higgins (1799) et, surtout, à plusieurs reprises,

par le chimiste et homme politique français Antoine-François Fourcroy. Après sa mort, son travail continue à être cité dans les manuels de chimie médicale et de médecine légale jusqu'à la découverte du rôle des micro-organismes par Pasteur dans les années 1850. Aujourd'hui, à défaut d'avoir une quelconque valeur scientifique, son *Essai* reste une référence pour les historiens de l'hygiène urbaine...

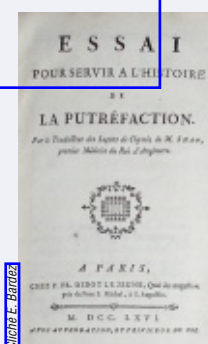
Mais déjà, le suivi quotidien des expériences ne suffisait plus à satisfaire les aspirations intellectuelles de l'expérimentatrice. Ses deux grandes traductions scientifiques à peine publiées, elle s'est tournée vers les lettres. Lorsqu'elle réunit – à l'exception de l'histoire – l'ensemble de ses travaux et quelques inédits, un seul des sept volumes de ses *Mélanges de littérature, de morale et de physique* (1775-1776) est consacré aux sciences. En quelques années, Mme d'Arconville est devenue une femme de lettres.

La démarche scientifique appliquée à l'histoire

Elle enchaîne d'autres genres à la mode : *Pensées et réflexion morales* (1760), *De l'amitié* (1761), *Des passions* (1764). Non sans succès : ces deux derniers traités donnent lieu à une édition pirate à Liège et à une traduction allemande (1770) sous la signature de... Diderot ! À l'inverse, l'*Essai sur l'amour-propre* de Frédéric II, lu cette même année à l'académie de Berlin, est bientôt porté à son crédit. Erreurs d'attribution qui auraient pu être moins flatteuses... Néanmoins piquée au vif dans son intégrité d'auteur, Mme d'Arconville marque sa propriété littéraire de façon inattendue : elle ne dévoile pas son identité, mais publie ses *Mélanges*.

Parallèlement, elle publie des traductions de littérature anglaise (romans, poésie et théâtre) et italienne et ses propres romans et poésies. Mais à partir de 1768, elle s'adonne surtout à l'histoire, qui l'accompagne sa vie durant. À dix ans, elle commençait à dévorer l'*Histoire ancienne* de Charles Rollin, publiée dans les années 1730. Elle affectionne les Grecs, mais

- Le 29 août 1763, le thermomètre 17d
- Le vent N.O. le ciel nuageux, la chaleur tempérée.
- Je mis deux gros de tranche de bœuf crud, & tué la veille, dans un bocal, couvert d'un papier, lié avec une ficelle.
- J'étois pour lors à la campagne, à quelques lieues de Paris. Le laboratoire où je faisais mes expériences étoit au rez-de-chaussée, un fossé fort large, rempli d'eau vive baignoit un des murs de ce laboratoire. De ce même côté étoit une fenêtre exposée au midi, & une autre vis-à-vis, exposée par conséquent au Nord. Ce lieu est assez humide.
- Le 30, le thermomètre 16d1/2
- Le vent N.N.O. le ciel comme la veille, mais le temps plus frais.
- Je trouvois que la viande avoit déjà contracté une odeur aigre, & que sa couleur étoit plus pâle.
- Le 31, le thermomètre 16d1/2
- Le vent E. le ciel couvert & le temps frais.
- La viande étoit putride, quoiqu'elle fût toujours ferme. Je la jettai.



5. EXTRAIT DES NOTES PRISES PAR MME D'ARCONVILLE pendant ses expériences sur la putréfaction et publiées dans son *Essai pour servir à l'histoire de la putréfaction* (1766). « C'est particulièrement à l'étude de la fermentation, de ses différents degrés, & sur-tout à celui de la putréfaction, que nous sommes redevables d'un très grand nombre de connoissances utiles. Il n'y en a peut-être pas même de plus intéressantes dans toute la physique. C'est pour ainsi dire la clef de toutes les autres, & l'histoire de la nature entière. Tout ce qui a vie, soit animal, soit végétal, est soumis à son pouvoir », écrit-elle en introduction de son essai.

c'est à la période de la Réforme, omniprésente dans ses manuscrits, qu'elle consacre ses travaux : *Vie du cardinal d'Ossat* (1771), *Vie de Marie de Médicis* (1772), *Histoire de François II* (1783). Condamnant l'histoire officielle – elle critique un auteur écrivant « plutôt à la vérité en gazetier payé pour en rendre compte, qu'en fidèle historien » –, elle déniche des manuscrits inédits, les traduit et les édite avec des notes, devenant ainsi l'une des premières historiennes. Dans l'histoire, elle trouve enfin la possibilité de concilier ses préoccupations morales et son goût du récit, d'une part, développés dans ses travaux littéraires, et son attrait pour la recherche, sa démarche critique et le sentiment d'être utile, d'autre part, déployés dans ses travaux scientifiques.

Finalement, la clef de l'œuvre éclectique de Mme d'Arconville se trouve dans l'un de ses derniers essais inédits, *Sur l'observation* : l'observation est le moyen d'appréhender le monde – observation physique dans les sciences (botanique, anatomie, chimie) et observation morale en littérature (essais de morale, romans, histoire).

BIBLIOGRAPHIE

P. Bret et B. Van Tiggelen (dir.), *Madame d'Arconville (1720-1805), une femme de lettres et de sciences au siècle des Lumières*, Hermann, 2011.

M.-A. Bernier et M.-L. Girou Swiderski (sous la dir.), *Mme d'Arconville, femme de lettres et femme de sciences, Studies on Voltaire and the Eighteenth Century*, à paraître. Nous les remercions de nous avoir autorisés à citer ces manuscrits.

M.-L. Girou Swiderski, *Écrire à tout prix. La présidente Thiroux d'Arconville, polygraphe (1720-1805)*, 2006, <http://aix1.uottawa.ca/~margirou/Perspectives/XVIIIe/arconvil.htm>.

A. Gargam, *Savoirs mondains, savoirs savants : les femmes et leurs cabinets de curiosités au siècle des Lumières*, *Genre et histoire*, n° 5, 2009.

EN IMAGES

Ventouses sous pression

Les ventouses des pieuvres peuvent sentir, goûter, agripper, manipuler et agir de façon autonome.

Frank GRASSO

A première vue, une ventouse de pieuvre (ou poulpe) ressemble à la coupelle de caoutchouc qui fait adhérer une fléchette à un mur, ou un GPS à un pare-brise. C'est en fait un organe remarquablement élaboré, qui peut non seulement adhérer plus ou moins aux objets, notamment pour capturer des proies, mais aussi les manœuvrer grâce à des groupes de muscles spécialisés.

Chaque ventouse de pieuvre comporte deux chambres : l'infundibulum, externe, et l'acetabulum, interne. Lorsque l'animal se trouve devant une palourde, par exemple, les muscles qui bordent la première chambre modifient la périphérie de la ventouse de façon à la faire adhérer à la surface de la coquille, formant un joint étanche. Sous l'infundibulum, les muscles de l'acetabulum se contractent alors, produisant à l'intérieur de la ventouse remplie d'eau une dépression importante par rapport à la pression de l'eau de mer environnante. C'est cette différence de pression qui provoque la succion. Plus les muscles de l'acetabulum se contractent, plus la dépression et la succion sont élevées. Simultanément, des muscles dits extrinsèques qui entourent la ventouse permettent à ses bords de faire tourner la cible, sans rompre le joint adhésif et sans réduire la différence de pression.

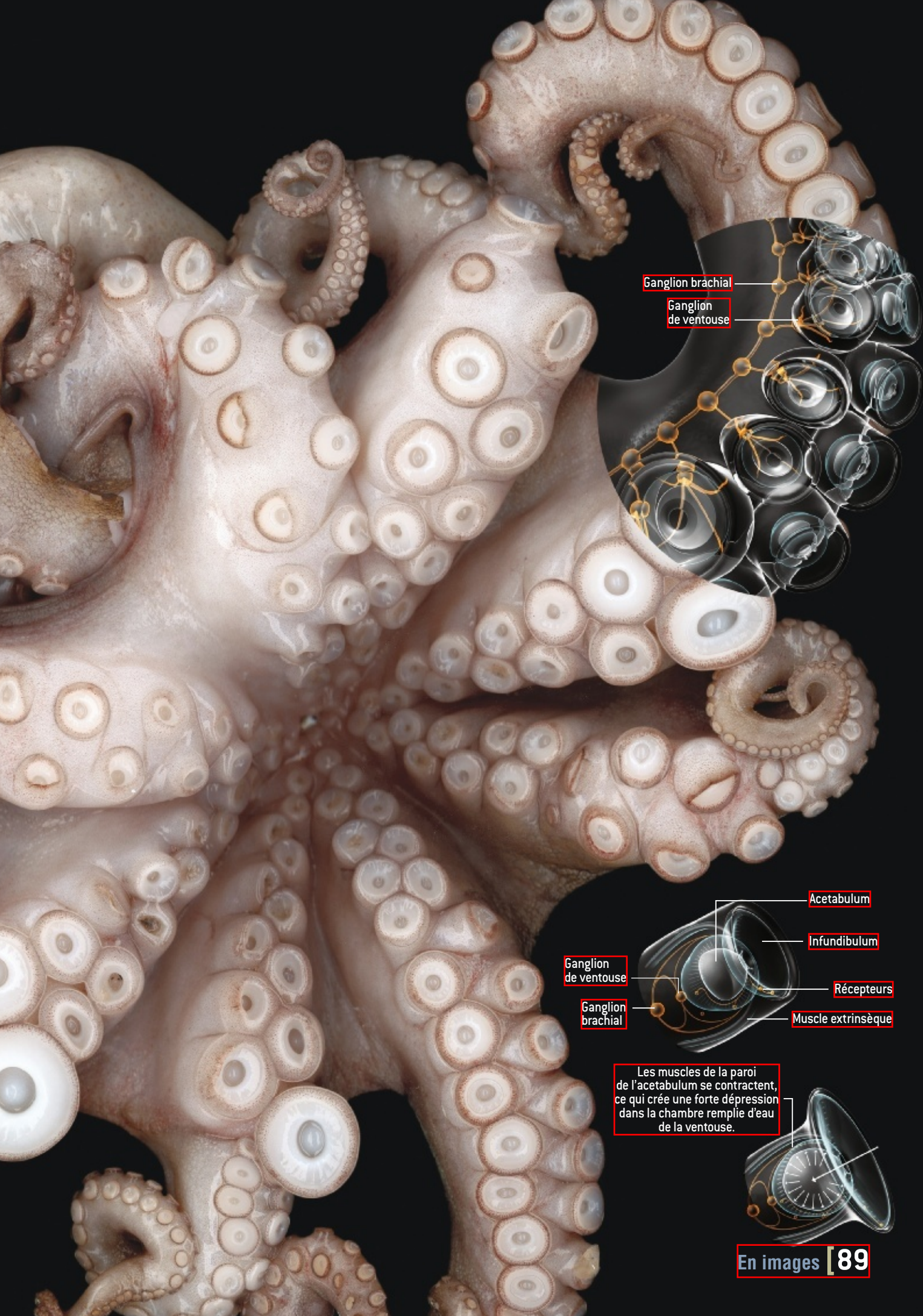
Par ailleurs, un réseau de neurones parcourt la ventouse. Des neurones spéciali-

sés dans la détection des substances chimiques présentes sur les surfaces – des chimiorécepteurs – tapissent ses bords. Avec les mécanorécepteurs et les propriocepteurs, qui relaient respectivement les messages de contact avec la cible et de pression, et ceux liés à l'activité des muscles, les chimiorécepteurs sont reliés à un ganglion nerveux propre à chaque ventouse.

Chaque ganglion de ventouse reçoit donc des informations sensorielles et coordonne les réactions cohérentes de la ventouse, telle les contractions. Ces ganglions sont connectés les uns aux autres par une chaîne de ganglions brachiaux plus grands, disposés le long de chaque bras (la pieuvre en a huit). Les ventouses d'un bras peuvent ainsi coordonner leurs mouvements en l'absence d'ordre moteur venant du cerveau central. Reste à élucider comment ce dernier et les deux types de ganglions collaborent pour contrôler précisément le fonctionnement des ventouses et la capture des proies.

Frank GRASSO, professeur de psychologie, dirige le Laboratoire de robotique biomimétique et cognitive de la Faculté Brooklyn, à New York.

© JORDAN NEWMAN (PIED) - EVAN CHESIN (RESSUS)



Ganglion brachial

Ganglion
de ventouse

Acetabulum

Infundibulum

Ganglion
de ventouse

Récepteurs

Ganglion
brachial

Muscle extrinsèque

Les muscles de la paroi
de l'acetabulum se contractent,
ce qui crée une forte dépression
dans la chambre remplie d'eau
de la ventouse.

LOGIQUE & CALCUL

Du rêve à la réalité des preuves

Les ordinateurs ne savent pas prouver seuls des théorèmes profonds. Cependant, grâce aux assistants de preuve, ils garantissent les démonstrations découvertes par les mathématiciens.

Jean-Paul DELAHAYE

Il y a 100 ans paraissait le premier des trois tomes des *Principia Mathematica* d'Alfred Whitehead et Bertrand Russell. En s'appuyant sur les travaux de Gottlob Frege, Giuseppe

Peano, Richard Dedekind et Georg Cantor, cet ouvrage montre comment réduire les mathématiques à la logique symbolique. L'ouvrage est l'un des plus importants de l'histoire des mathématiques, car il montre pour la première fois qu'un savoir scientifique peut être entièrement formalisé.

Avant le travail de Whitehead et Russell, écrire une démonstration mathématique était un exercice de nature littéraire où il fallait convaincre les lecteurs d'une affirmation abstraite. L'acceptation d'une preuve ou son refus résultait d'un consensus entre spécialistes conduisant le plus souvent à un accord unanime. Dans toutes les sciences, cette situation prévalait : il n'y a pas de procédure automatique et absolue de validation d'un résultat ou d'une théorie. On dispose de méthodes de contrôle, variées selon les disciplines, mais l'affaire reste humaine et dans certaines situations, les désaccords persistent longtemps.

Avec les *Principia*, la formalisation des mathématiques fait basculer ces dernières dans une situation différente : vérifier si un résultat mathématique est juste peut être confié à un opérateur ignorant de ce dont

traite la démonstration et qui se contentera de contrôler si les règles de manipulations symboliques des *Principia*, en nombre fini et fixées à l'avance, ont été respectées.

Cette formalisation est un immense progrès, puisque plus aucune controverse ne peut exister sur la validité d'une preuve écrite dans le langage des *Principia*. Si quelqu'un prétend qu'une preuve est fautive, l'opérateur ignorant trouvera l'erreur. Tout se passe comme pour un calcul arithmétique : aucune faute ne peut se dissimuler. Grâce à la formalisation, et comme l'avait imaginé Leibniz avec sa *characteristica universalis* au XVII^e siècle, démontrer est devenu un simple calcul.

Tout cela est très beau, mais c'est un rêve : la formalisation proposée par Whitehead et Russell est trop complexe pour être pratiquée dès qu'on aborde autre chose que des théorèmes élémentaires de logique ou d'arithmétique. Dans les *Principia*, les preuves formelles sont rarement écrites entièrement, les auteurs se contentant de montrer qu'elles existent et d'indiquer ce qu'il faudrait faire pour les écrire.

Avec les *Principia*, les mathématiques deviennent formalisables *en principe*, mais pas en réalité. S'en tenir au langage des *Principia* conduit à des preuves dont la longueur empêche leur écriture effective et donc leur contrôle. Le formalisme des *Principia* n'est pas praticable et la

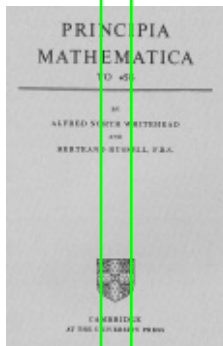
garantie qu'aurait dû donner le formalisme ne fonctionne pas.

D'autres formalisations générales des mathématiques ont été proposées, dont celle de Bourbaki, le célèbre mathématicien français polycéphale. Sa proposition, qui date des années 1930, s'appuie sur la théorie des ensembles et le logicien Adrian Mathias en a révélé une propriété cocasse. Dans le formalisme de Bourbaki, la notation complète pour désigner le nombre « 1 » est une longue suite de symboles et Bourbaki indiquait que si l'on tentait de la déployer sans utiliser aucun raccourci, l'écriture complète du « 1 » comporterait quelques dizaines de milliers de symboles. A. Mathias a montré que la situation était pire et qu'écrire le nombre « 1 », en respectant à la lettre le formalisme de Bourbaki, nécessiterait 4 523 659 424 929 symboles, soit l'équivalent de quatre millions de livres de 400 pages.

L'informatique rend-elle tout simple ?

Les premiers formalismes complets proposés pour les mathématiques ne sont pas destinés aux mathématiciens terrestres ! Pourtant, l'informatique et un siècle de travail de la part des logiciens ont maintenant transformé le rêve en réalité. Le *en principe* qui était juxtaposé à « mathématiques formalisables » peut être enlevé.

L'informatique n'a pas peur des grandes quantités de données. La formalisation des



Principia ou celle du traité de Bourbaki à l'aide des ordinateurs fonctionnerait-elle sans peine ?

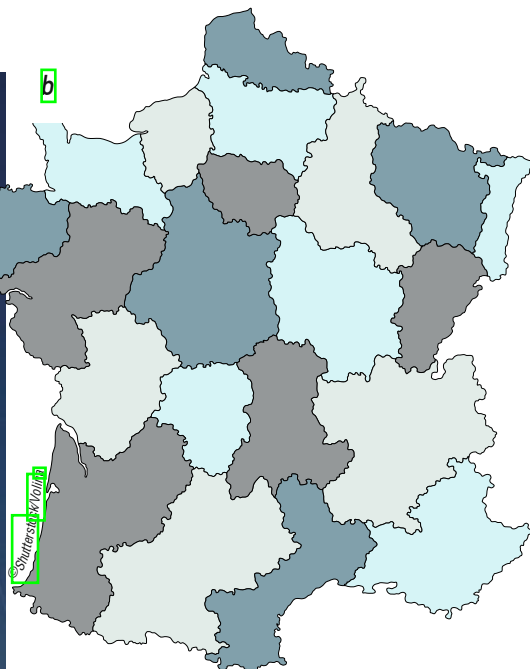
Non. Les calculs informatiques ne peuvent tout affronter et la formidable puissance des ordinateurs ne dispense pas d'être intelligent. Nos machines sont de capacité limitée et ce n'est pas parce que le progrès est rapide que l'on dispose d'une puissance infinie. Ainsi, on ne sait aujourd'hui ni trouver un nombre premier de plus de 13 millions de chiffres, ni calculer un million de milliards de décimales de π , on en est seulement à 5 000 milliards de décimales. Le formalisme des *Principia* ou du traité de Bourbaki est bien trop gourmand en puissance, même pour les plus puissants des ordinateurs ou des réseaux informatiques.

Attendre serait une solution, mais il n'est pas certain que les progrès technologiques ne buttent pas sur une limite ultime : il est probable, au contraire, que la miniaturisation ne pourra aller en deçà de la taille des atomes. Le plus sage pour obtenir une formalisation pratique et réelle des mathématiques est donc de mener une double attaque : améliorer les formalismes en les simplifiant pour les rendre praticables et profiter des gains de puissance que la technologie nous offre. C'est ce que l'on a fait et l'heure du succès est maintenant arrivée.

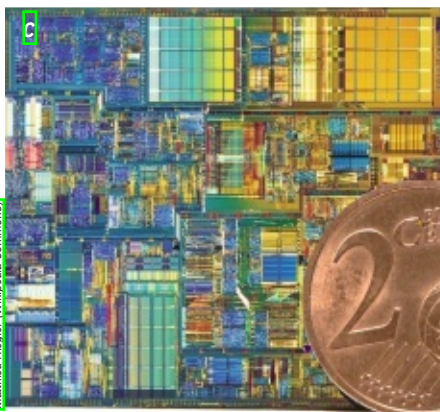
Assistant de preuve

Le premier travail de formalisation des mathématiques fut le projet *Automath* conçu et développé aux Pays-Bas à partir de 1966 par Nicolaas de Bruijn. Il fut suivi par une série de projets dont les plus avancés sont, en Pologne le projet *Mizar*, en Grande-Bretagne et aux États-Unis le projet *HOL-Isabelle* et, en France, le projet *Coq*.

L'idée est de mettre à la disposition du mathématicien un système informatique interactif et un formalisme de démonstration qui lui permettent d'élaborer une version formelle du résultat auquel il s'intéresse en dialoguant avec le logiciel (voir la figure 4). Le logiciel libère le mathématicien d'une partie du fastidieux travail d'écriture et opère les contrôles minutieux nécessaires à



1. AVEC DES ASSISTANTS DE PREUVE, des erreurs auraient été évitées. Le 4 juin 1996, la fusée *Ariane 5* explosait 40 secondes après son décollage (a). La catastrophe résultait d'une erreur de programmation. On peut colorier une carte, comme celle des régions de France, avec quatre couleurs seulement (b) : le « théorème des quatre couleurs » a été définitivement prouvé par un assistant de preuve, ce qui a mis fin à une controverse sur les premières démonstrations. Ces logiciels, qui aident à produire des démonstrations formalisées de théorèmes, sont aussi utilisés pour démontrer que certains circuits de microprocesseurs, dont le *Pentium 4* (c), fonctionnent correctement. La démarche est prudente, car, en octobre 1994, Thomas Nicely, de l'Université de Lynchburg (États-Unis), a dévoilé un dysfonctionnement dans l'unité de calcul en virgule flottante du *Pentium* : il s'est rendu compte que certaines opérations du processeur renvoyaient une valeur erronée par excès.



2. Sphères empilées

Le travail d'écriture de preuves formelles en utilisant les assistants de preuve informatiques est parfois considéré avec méfiance et scepticisme. L'idée est que, pour peu que les démonstrations mathématiques soient écrites avec suffisamment de soin et contrôlées par des experts humains, on élimine tout risque d'erreur. Cette idée n'est plus défendable depuis que Thomas Hales a proposé une démonstration (non formelle) de la conjecture de Kepler, jugée impossible à contrôler par les experts à qui on l'avait confiée.

Cette conjecture affirme que l'empilement de sphères le plus dense est celui utilisé pour les boulets de canon ou les oranges : un réseau triangulaire de boulets est créé sur le sol plat ; on pose dessus un autre réseau analogue en exploitant les creux du premier et de même un troisième réseau, etc.

La démonstration de Th. Hales a été publiée par le prestigieux *Annals of Mathematics* en 2005 avec la mise en garde que, du fait de la complexité de la démonstration et de l'utilisation pour certaines de ses parties de programmes informatiques, le comité d'experts chargé de l'examiner ne pouvait pas en garantir l'exactitude. Devant cette situation inédite, Th. Hales a entrepris le projet de produire une preuve formelle (et donc mécaniquement vérifiable) de son théorème. Son programme de travail, qui pourrait occuper son équipe pour une durée de dix années ou plus avance régulièrement. Il a déjà donné lieu à deux doctorats de mathématiques et à la mise au point d'une preuve formelle d'un résultat à l'énoncé simple, mais dont la démonstration formelle posait des difficultés : le théorème de Jordan.

Celui-ci indique que lorsqu'on enlève les points d'une courbe plane continue et fermée qui ne se recoupe pas (une boucle), la partie du plan qui reste est composée de deux morceaux disjoints, chacun d'un seul tenant.

Les mathématiques donnent lieu à des démonstrations de plus en plus longues et difficiles et l'utilisation de preuves formalisées pourrait bien devenir routinière.

chaque étape de l'explicitation d'une démonstration formelle. Le logiciel stocke aussi les résultats démontrés formellement par d'autres mathématiciens lors de séances antérieures, et ces résultats sont utilisables pour des preuves nouvelles.

Pour mesurer le succès des logiciels assistants de preuve qui formalisent de vraies mathématiques, nous examinerons la liste des théorèmes centraux des mathématiques dont on a aujourd'hui réussi à produire une preuve formalisée qui en garantit de manière quasi absolue l'exactitude.

Imitant l'idée de la liste des 100 meilleurs chansons, Nathan Kahn, mathématicien du *Steven Institute of Technology*, dans le New Jersey, a composé une liste des « 100 théorèmes mathématiques les plus importants ». Cette liste, subjective, a cependant été adoptée comme repère par les chercheurs qui mettent au point les logiciels de formalisation des mathématiques et elle permet d'en comparer les succès.

Formalisation de 85 théorèmes sur 100

Au cours du temps, le nombre des théorèmes que l'on a formalisés dans la liste de Kahn augmente et, aujourd'hui, on en est à 85 sur les 100 de sa liste.

Citons quelques-uns de ces théorèmes maintenant garantis par la machine.

– Irrationalité de la racine carrée de 2 : $\sqrt{2}$ n'est pas égal à un quotient de deux nombres entiers.

– Infinité des nombres premiers : la suite des nombres entiers n'ayant pas d'autres diviseurs que 1 et eux-mêmes est une suite infinie $(2, 3, 5, 7, 11, 13, \dots)$.

– Impossibilité de la trisection d'un angle par une construction exacte menée avec seulement une règle et un compas.

– Théorème des quatre carrés de Lagrange : tout nombre entier s'écrit comme la somme de quatre carrés (par exemple $23 = 3^2 + 3^2 + 2^2 + 1$).

– Formule de Leibniz : $\pi/4 = 1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + 1/9 - \dots$

– Divergence de la série harmonique $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots$

– Théorème fondamental de l'algèbre : un polynôme de degré n à coefficients complexes possède n racines.

– Théorème fondamental de l'analyse : la dérivée de l'intégrale, prise entre une constante a et x , de la fonction continue f , est égale à $f(x)$.

– Transcendance de e : le nombre $e = 2,7182818284590\dots$ n'est racine d'aucun polynôme à coefficients entiers.

– Premier théorème d'incomplétude de Gödel : tout système formel non contradictoire pour l'arithmétique ou une théorie plus puissante laisse sans démonstration certains énoncés vrais.

– Théorème des nombres premiers par Hadamard et par de La Vallée Poussin : la densité des nombres premiers autour de n est $1/\log(n)$.

– Théorème des quatre couleurs : toute carte dessinée sur un plan peut être coloriée avec quatre couleurs de façon que deux pays voisins soient de couleurs différentes.

Ce dernier théorème est le plus difficile de tous ceux dont la démonstration a pu être contrôlée par la méthode de l'écriture complète d'une preuve formelle. La preuve formelle a été obtenue en 2004 par Georges Gonthier et Benjamin Werner avec le logiciel *Coq* de l'INRIA (Institut national de la recherche en informatique et automatique).

Précisons que ce théorème avait été démontré en 1976 en utilisant une démonstration comportant deux parties. Une partie de la preuve était informelle, c'est-à-dire exposée dans un texte en langue naturelle (l'anglais) comme le sont toutes les preuves mathématiques publiées dans les journaux et livres mathématiques. Une autre partie de la démonstration était un calcul mené par ordinateur, calcul trop long pour qu'on puisse le réaliser sans machine. La preuve de 1976 n'était en rien formalisée et elle pouvait parfaitement comporter des erreurs, soit dans la partie informelle, soit dans la partie informatique si les programmes utilisés étaient incorrects ou que la machine avait commis des erreurs.

Le travail consistant à prouver le théorème des quatre couleurs de façon formelle n'était donc pas du tout réglé d'avance ni même rendu plus facile par l'utilisation d'or-

dinateurs pour une partie de la preuve de 1976. Cette utilisation était en fait seulement l'indice que l'on avait affaire à un résultat particulièrement compliqué.

Notons aussi que le logiciel *Coq* est souple et adaptable à de nombreux problèmes, et que José Grimm de l'INRIA a pu grâce à lui entreprendre de formaliser les *Éléments de mathématique* de Bourbaki. L'idée n'est pas de suivre exactement le formalisme décrit dans le traité – nous avons vu que ce n'était pas envisageable –, mais de concevoir un formalisme équivalent permettant d'exprimer tous les résultats que l'on y trouve en même temps qu'on formalise le détail des preuves. En janvier 2011, une grande partie du livre I du traité de Bourbaki avait été formalisée.

Des théorèmes encore trop complexes

Parmi les 15 résultats de la liste des 100 théorèmes qui restent trop difficiles à formaliser aujourd'hui, même en utilisant des assistants de preuve, citons en deux.

– La transcendance du nombre π . C'est l'affirmation que π n'est racine d'aucun polynôme à coefficients entiers (ce résultat montre que l'antique problème de la quadrature du cercle est insoluble). Le théorème a été démontré par Lindemann en 1882 et on peut dire qu'il est à la limite de ce que peuvent faire les assistants de preuve actuels. Il est probable qu'il sera rapidement prouvé de manière formelle.

– Le théorème de Fermat-Wiles. C'est l'affirmation, démontrée en 1993 par Andrew Wiles, qu'il n'existe pas de solutions à l'équation $x^n + y^n = z^n$ où x, y, z sont des entiers positifs et n un entier fixé supérieur à 2.

Sa preuve est extrêmement difficile. Elle avait été recherchée pendant 350 ans et elle n'est vraiment comprise que par quelques spécialistes. En produire une version formelle serait intéressant.

Même si les erreurs sont fréquentes, le fait qu'une démonstration soit faite et refaite par de nombreux mathématiciens assure qu'aucun résultat classique n'est faux. Jamais dans les parties centrales des mathématiques une erreur grave n'est

restée longtemps cachée. Aussi le délicat, long et pénible travail de formalisation des mathématiques avec assistant informatique est-il vraiment utile ? La réponse est deux fois « oui ».

Vraiment utiles ?

Oui, la formalisation est utile, car certaines démonstrations récentes sont si longues que personne n'est entièrement persuadé de leur exactitude. C'est le cas du théorème de Thomas Hales qui résout la conjecture de Kepler concernant l'empilement optimal des sphères dans l'espace. Personne ne peut dire que la preuve de Hales a été contrôlée. Mener la vérification formelle d'une telle preuve n'est donc pas un luxe, mais une nécessité (voir la figure 2). La situation est pire encore dans le cas du théorème de classification des groupes simples, dont la première démonstration a été annoncée en 1983. Elle s'étend sur des dizaines d'articles mathématiques écrits par plus d'une centaine de mathématiciens différents et couvre un total de plus de 10 000 pages. Un trou important y a été découvert, qu'un complément de 1 300 pages est venu combler dans les années 1990. La seconde version de cette démonstration est en cours d'élaboration et s'étendra sur environ 5 000 pages. Bien qu'impossible à envisager dans l'immédiat, il est clair que seule la mise au point d'une preuve formelle sera susceptible de rassurer définitivement les mathématiciens qui, comme Jean-Pierre Serre, contestent l'affirmation que ce théorème « monstrueux » a été démontré.

Oui, la formalisation des démonstrations mathématiques est utile, car elle sert à certifier des logiciels ou des puces informatiques ainsi d'ailleurs qu'à y repérer des erreurs. Les « assistants de preuve » utilisés pour la mise au point des preuves formelles sont des outils puissants exploités par l'industrie du logiciel pour les morceaux de programme dont on veut avoir la certitude qu'ils font correctement certaines tâches cruciales. Aujourd'hui, assez peu de logiciels sont ainsi validés par la formalisation complète de la démonstration qu'ils font ce qu'on attend et rien d'autre, et de nombreuses autres méthodes de contrôle et de certification sont utilisées.

3. Démonstrations

Les démonstrations formelles sont peu lisibles et même souvent illisibles. Cela ne doit pas surprendre, car, sans qu'on ait toujours bien fait la distinction, les démonstrations mathématiques possèdent deux fonctions.

La première fonction d'une démonstration est de garantir que l'affirmation exprimée dans l'énoncé du théorème est exacte. C'est la fonction de certification.

La seconde fonction est de permettre au mathématicien de percevoir et de comprendre pourquoi les choses sont comme le théorème l'énonce. C'est la fonction didactique.

Lorsque les démonstrations ne sont pas trop compliquées, les deux fonctions peuvent être envisagées simultanément : le texte de la démonstration assure la validité de l'énoncé et, en même temps, il en explique les raisons profondes.

Lorsqu'on a affaire à des résultats vraiment difficiles, un double travail est nécessaire. La complexité dans le cas des mathématiques a donc pour conséquence la nécessité d'une part, de mener un contrôle formel (par l'utilisation des assistants de preuve), d'autre part de présenter un texte non formel illustré et largement commenté expliquant les idées mises en œuvre dans la démonstration.

C'est ce second texte qui permettra aux mathématiciens de saisir le sens du théorème... et d'imaginer le prochain théorème et la façon dont il faudra à son tour le démontrer.



4. Les assistants de preuve

Un logiciel assistant de preuve est destiné à aider un mathématicien à écrire des démonstrations formelles lors de sessions de travail interactives. Pour ce faire, le mathématicien traducteur de la démonstration classique en démonstration formelle doit avoir une parfaite connaissance de la preuve, ce qui

n'est pas facile dans le cas d'une démonstration complexe. De plus, la traduction est difficile et lente : un ou plusieurs jours par page.

La partie du programme informatique qui gère les interactions est longue et délicate et, de ce fait, peut comporter des erreurs. C'est sans importance, car la preuve produite à

l'issue du dialogue sera vérifiée par le cœur du système, qui lui seul doit être correct. Cette partie centrale est courte et vérifiée de façon indépendante par plusieurs spécialistes. On utilise parfois un autre logiciel assistant de preuve pour démontrer que ce cœur fonctionne correctement. La petite taille des parties centrales,

et le soin particulier à les vérifier et à les prouver n'annulent pas le risque d'erreur finale (et donc de validation de preuves erronées), mais réduisent de plusieurs ordres de grandeur ce risque. Avec la formalisation des preuves, on améliore donc sensiblement la garantie de justesse de ce qui est démontré.



Utilisateur mathématicien

Dialogue

Système d'aide interactive informatique d'écriture des démonstrations

ORDINATEUR

Démonstration résultat du dialogue

Vérificateur de démonstrations formalisées

OK

Cependant on a là, venue des mathématiques et de la logique, une technique quasi définitive permettant d'assurer l'absence de bogues dans les parties clefs d'un programme ou d'un microprocesseur. En 1993, la firme Intel avait mis en circulation une puce qui commettait des erreurs arithmétiques ennuyeuses ; elle utilise aujourd'hui la méthode des assistants de preuve pour éviter que cela se reproduise.

Récemment dans un article du *New York Times*, Adi Shamir (le S du système de cryptage RSA) faisait remarquer que la présence d'une seule erreur dans une puce informatique largement utilisée mettrait en danger la sécurité de millions de machines ; elle rendrait peut-être manipulables frauduleusement toutes les transactions faussement sécurisées du commerce électronique.

Non seulement la présence d'erreurs dans les logiciels et les puces peut faire tomber la fusée Ariane, ce qui s'est produit le 4 juin 1996, mais elle peut aussi être à l'origine de problèmes économiques majeurs. Les difficultés qu'on a en mathématiques à garantir l'exactitude des longues démonstrations et les méthodes élaborées pour résoudre ce qui ne semblait devoir

n'intéresser qu'une petite communauté de chercheurs se révèlent importantes pour tout le monde. C'est là un exemple nouveau et spectaculaire de l'utilité des théories abstraites, ici la logique mathématique.

Quelle certitude ?

Certains voient un paradoxe dans l'idée d'utiliser l'informatique pour contrôler des démonstrations mathématiques, car notre expérience des ordinateurs montre que loin d'être des outils fiables, ce sont des sources nouvelles et incontrôlables d'erreurs dont on ne comprend souvent pas l'origine : on redémarre sa machine et ça s'arrange (parfois...) sans que personne ne sache pourquoi. Comment, dès lors, croire que les preuves formelles par ordinateur sont plus sûres que les preuves informelles et humaines ?

La réponse est que les assistants de preuve reposent sur des noyaux logiciels, la partie qui mène le contrôle des preuves produites lors des séances de travail interactif, aussi petits que possible et que l'on contrôle minutieusement :

– En s'arrangeant pour que leur présentation soit la plus lisible et la plus simple

possible, et en demandant ensuite à un nombre aussi grand que possible de spécialistes de relire ces programmes clefs.

– En testant ces noyaux logiciels sur de très nombreux exemples : si une erreur persistait, elle aurait très probablement des conséquences et aurait produit des effets visibles lors des essais.

– En démontrant formellement que ces noyaux logiciels sont corrects à l'aide de versions différentes du même noyau ou, mieux encore, avec d'autres assistants de preuve écrits par des groupes de chercheurs indépendants.

Bien sûr, on n'arrive pas à une certitude totale que le noyau de l'assistant de preuve est sans erreur, mais à une très faible probabilité qu'il en contienne. Tout le risque se concentre sur un petit nombre de lignes de programmes (moins de 500 dans le cas de l'assistant HOL) et sur lui seul. Au total, on a considérablement gagné en sûreté et sans doute réduit le risque d'erreur de plusieurs ordres de grandeur. De même que les théorèmes les plus anciens des mathématiques ayant été redémontrés (sans utiliser d'assistant de preuve) un grand nombre de fois ne contiennent certainement aucune

erreur, les noyaux des assistants de preuve gagnent en fiabilité de jour en jour. Toutes les autres preuves reposent sur eux, et l'on atteint donc une certitude de correction quasi absolue.

Les assistants de preuve ne seraient-ils pas susceptibles de changer notre façon de faire des mathématiques ? C'est l'idée du manifeste QED dont le nom vient de l'expression latine *Quod Erat Demonstrandum* (Ce qu'il fallait démontrer). Formulé en 1994 par des chercheurs qui ont souhaité rester anonymes, ce manifeste énonce l'objectif de mettre au point un assistant de preuve général pour toutes les mathématiques, de manière à garantir la totalité de tout ce qui se fait dans la discipline.

L'assistant de preuve envisagé serait à la fois puissant, fonctionnant avec un formalisme proche du langage qu'utilisent les mathématiciens, et évidemment serait aussi sûr que possible. Avec un tel assistant de preuve, on formaliserait toutes les mathématiques existantes et à chaque fois qu'un nouveau résultat serait proposé, le chercheur qui le soumettrait en donnerait une preuve formelle, ce qui dispenserait de le faire expertiser par d'autres chercheurs. La pratique de la recherche mathématique en serait transformée.

Aujourd'hui, cet assistant de preuve idéal n'existe pas. Les assistants de preuve actuels restent trop compliqués et les langages qu'ils utilisent souvent éloignés de celui pratiqué par les mathématiciens. Formaliser une preuve reste un énorme travail et il faut un ou plusieurs jours par page pour traduire une preuve classique d'un article mathématique en preuve formelle.

Tout cela fait que les chercheurs en mathématiques n'utilisent que très rarement les assistants de preuve disponibles et que la communication entre mathématiciens continue de fonctionner par échange de preuves informelles et sans processus de validation informatique. Le chemin menant à une nouvelle pratique des mathématiques n'est pas achevé et il n'est pas sûr qu'on atteindra l'idéal imaginé par le manifeste QED.

Toutefois, Henk Barendregt et Freek Wiedijk, deux spécialistes des preuves formelles, prédisent que le changement dans la

recherche mathématique se produira dans la prochaine décennie.

Mentionnons encore deux points. Il n'est pas question de laisser à la machine l'initiative de la recherche mathématique : sauf dans des cas exceptionnels ou à propos de problèmes se réduisant à du calcul, les méthodes de recherche automatique de preuves ne trouvent que des résultats faciles et ne peuvent donc pas se substituer au mathématicien humain, qui reste la clef des découvertes.

Les assistants de preuve permettent d'accroître la sûreté des démonstrations, mais la fonction d'une démonstration, en particulier dans l'enseignement, est aussi de faire comprendre ce qui se passe mathématiquement dans l'univers des objets abstraits. Or les preuves formelles, désagréables à lire, entravent la compréhension plus qu'elles ne l'aident. Même si les objectifs du manifeste QED sont un jour atteints, on continuera d'écrire des preuves informelles, car ce sont elles qui font passer les idées d'un cerveau de mathématicien à un autre.

Prouver ainsi tous les résultats ?

D'ici quelques années, les assistants de preuve seront probablement en mesure de prouver l'ensemble des résultats mathématiques classiques.

Aujourd'hui, des théorèmes très difficiles ont pu être validés par la méthode des preuves formelles. C'est le cas du théorème des nombres premiers de Jacques Hadamard et Charles de La Vallée Poussin (qui précise la densité asymptotique des nombres premiers), dont deux démonstrations différentes ont été formalisées et validées.

Il n'en est pas de même pour des résultats plus avancés comme le grand théorème de Fermat, qui reste trop complexe pour les outils actuels. Mais F. Wiedijk et d'autres chercheurs du domaine considèrent que ce n'est qu'une question de moyens, et que même les plus difficiles des grands théorèmes sont maintenant à portée de main.

L'AUTEUR



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

BIBLIOGRAPHIE

F. Wiedijk, Formalizing the « top 100 » of mathematical theorems, 2011 : <http://www.cs.ru.nl/~freek/100/>

H. Geuvers, Proof assistants : History, ideas and future, *Sadhana*, vol. 34-1, pp. 3-25, février 2009 : <http://www.ias.ac.in/sadhana/Pdf2009Feb/3.pdf>

G. Gonthier, The four-color theorem, *Notices of the AMS*, vol. 55, n° 11, pp. 1382-1393, 2008.

Th. Hales, A proof of the Kepler conjecture, *Annals of Mathematics*, vol. 162, pp. 1065-1185, 2007.

F. Wiedijk, Formal proof - Getting started, *Notices of the AMS*, vol. 55, n° 11, pp. 1408-1414, 2008.

Th. Hales, Formal proof, *Notices of the AMS*, vol. 55, n° 11, pp. 1370-1380, 2008.

F. Wiedijk, The QED manifesto revisited, *Studies in Logic, Grammar and Rhetoric*, vol. 10(23), pp. 121-133, 2007.

F. Wiedijk (éd.), *The Seventeen Provers of the World*, Springer, 2006.

ART & SCIENCE

Le fantôme de Louis XV

Dans un portrait allégorique, Charles-Amédée Van Loo dissimule le portrait de Louis XV dit le Bien-Aimé : il n'apparaît qu'avec une lentille polyédrique dont le fonctionnement « magique » est fondé sur les lois de la réfraction.

Loïc MANGIN

L'anamorphose est un jeu optique par lequel la perspective d'une image est distordue. L'image et sa signification n'apparaissent alors que sous un point de

vue donné ou grâce à un « décodeur », tel un miroir. La plus ancienne connue serait due à Léonard de Vinci : il s'agit de l'anamorphose d'un œil d'enfant, que l'on trouve dans le *Codex Atlanticus*, daté de 1485. L'une des plus célèbres est celle figurant dans la partie inférieure du tableau *Les Ambassadeurs*, du peintre allemand Hans Holbein le Jeune (1498-1543). Dans cette toile exposée à la *National Gallery* de Londres, la forme oblongue au pied des deux personnages devient, lorsqu'elle est observée en vue rasante, un crâne. Ces différents exemples sont des anamorphoses simples, ou directes. Mais on en distingue deux autres types.

Ainsi, les anamorphoses à miroir (on parle aussi d'anamorphoses catoptriques) nécessitent un cylindre ou un cône réfléchissant sur lequel l'image « normale » apparaît. L'image déformée est peinte sur une surface autour d'un emplacement prévu pour y placer le miroir. Aux XVII^e et XVIII^e siècles, cette technique d'anamorphoses a favorisé la diffusion de caricatures, de scènes érotiques...

Enfin, les anamorphoses dioptriques sont les plus spectaculaires. Un exemple est au château de Versailles et a été présenté lors d'une exposition consacrée aux liens entre sciences et cours royales : le Por-

trait allégorique de Louis XV (voir page ci-contre, figure b), peint par Charles-Amédée Van Loo, en 1742. Cette œuvre a été étudiée par Hélène Delalex, adjoint de conservation au château de Versailles. Qu'y voit-on ?

La Magnanimité, sous la forme d'un personnage féminin, a une main posée sur un grand bouclier blanc cerclé d'or et rehaussé de trois fleurs de lys dorées. Autour d'elle, sont représentées les allégories de la Justice (en bas à droite), de la Valeur mili-

**La Justice
fournit au visage
de Louis XV
une partie de l'œil,
car « rien n'échappe
aux regards
de la justice ».**

taire (derrière la Magnanimité, avec ses lances et son drapeau), de l'Intrépidité (le soldat derrière la Valeur militaire), de la Vertu héroïque (guerrier sous les attributs d'Hercule tenant une massue et les trois pommes d'or), de la Vertu invincible (représentée par Minerve, un rameau à la main) et de la Générosité (la jeune fille à gauche). Et Louis XV ?

Le peintre a donné la clef de l'œuvre à Barraly, son gérant, qui a transmis l'information à l'Académie de peinture de Mar-

seille : « Ces Vertus concourent à former la tête du Roy. » En effet, en regardant le tableau à travers une lentille polyédrique insérée dans un tube (de façon à faire une sorte de longue-vue), différentes parties des Vertus représentées sont réfractées par le dispositif et s'assemblent en un portrait du monarque au centre du bouclier (voir figure a, une reconstitution informatique réalisée par H. Delalex) : la Magnanimité prête au roi la joue, une partie de l'œil, une oreille et un sourcil ; la Justice donne une partie d'un œil ; la Valeur militaire cède le nez et la bouche ; la Vertu héroïque partage la petite joue, la bouche, le nez et les narines ; la Vertu invincible offre une partie d'un œil ; la Générosité participe aussi à un œil ainsi qu'à la tempe ; un lion se retrouve dans la tempe et le front ; enfin, le masque joue un rôle dans le front et un sourcil.

Rien n'est laissé au hasard ! Van Loo précise que la Justice fournit au visage de Louis XV une partie de l'œil, car « rien n'échappe aux regards de la Justice ». De même, la Valeur militaire prête sa bouche « pour le commandement ».

Ces anamorphoses dioptriques ont été théorisées par le père de l'ordre des Minimes Jean François Nicéron (1613-1646) dans le premier ouvrage qui a été consacré à ces effets d'optique, *La Perspective curieuse*, publié en 1638. On y trouve une des premières occurrences des travaux de Descartes sur la réfraction publiés l'année précédente dans *La Dioptrique* (un dioptre est la surface séparant deux milieux).

Rappelons que la réfraction consiste en une déviation de la lumière lorsqu'elle passe d'un milieu à un autre, par exemple de l'air à l'eau : un bâton plongé dans l'eau, mais dont une pointe est émergée, semble brisé. Ce phénomène avait été décrit par le mathématicien arabe Ibn Sahl à la fin du X^e siècle. Nicéron donne plusieurs exemples d'anamorphoses dioptriques, dont le portrait de Louis XIII obtenu à partir de fragments d'Ottomans (voir figure c).

De façon étonnante, le *Portrait de Louis XV* illustre le doute que Descartes a mis au centre de ses réflexions. Selon

le philosophe, nous devons douter de nos sens, car ils sont parfois trompeurs, les illusions d'optique l'attestent. L'image du bâton brisé dans l'eau le conduit même à s'interroger : nos sens ne nous trompent-ils pas tout le temps ? Louis XV ne s'embarassa pas de telles considérations et fut « satisfait et très satisfait » de son portrait magique.

H. Delalex, « Le portrait caché de Louis XV », dans *Sciences et curiosités à la cour de Versailles*, catalogue de l'exposition, RMN et château de Versailles, 2010.



IDÉES DE PHYSIQUE

Sonner comme une cloche

Les qualités musicales d'une cloche dépendent de sa forme. Et le son produit dépend de l'endroit où le battant frappe.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Un tintement dans le lointain qui marque l'heure, la joyeuse sonnerie qui accompagne les mariés à la sortie de l'église...

Les sons des cloches rythment nos vies profanes ou spirituelles, mais d'où vient la qualité musicale de ces instruments ? Qu'est-ce qui détermine les vibrations qui vont persister dans le matériau et, ainsi, seront audibles ? La réponse réside dans la forme de la cloche, dont la conception reste un secret jalousement gardé par les fondeurs.

Une harmonie qui ne va pas de soi

Dans le principe, il est difficile de faire plus simple qu'une cloche. Une pièce en métal homogène, en l'occurrence du bronze, est mise en vibration par le choc du battant. Et, tout comme la membrane d'un haut-parleur, la surface de la cloche met en mouvement l'air environnant et engendre les variations de pression que nous appelons ondes sonores.

La situation est bien plus simple que pour les instruments à vent, où intervient un subtil couplage entre l'embouchure et le tuyau résonnant ; bien plus simple aussi que pour les instruments à cordes, où les cordes, excitées de diverses façons, transfèrent de l'énergie à une paroi vibrante, seule à même d'émettre un son assez puissant.

Pourtant, obtenir une cloche musicale n'est pas immédiat. Lorsqu'on frappe un

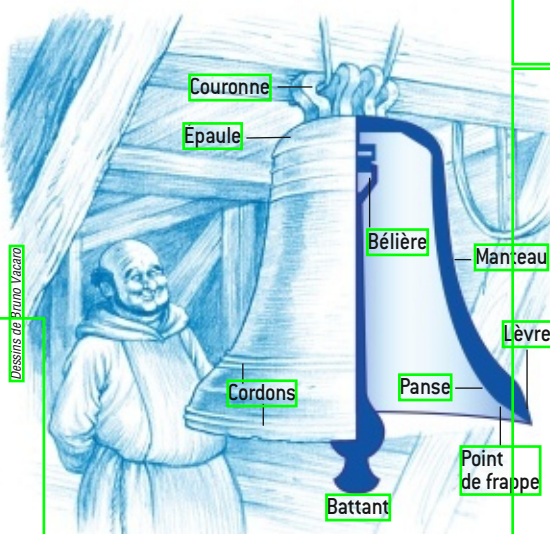
solide, il est rare d'obtenir un son harmonieux et durable. On obtient plutôt un bruit, c'est-à-dire une superposition d'ondes sonores sans ordre particulier.

Or les règles de l'harmonie occidentale requièrent des relations bien précises entre les fréquences émises simultanément. Ces relations sont satisfaites avec les cordes des pianos et des violons. On peut considérer les vibrations de chacune de ces cordes comme une superposition de vibrations sinusoïdales. La fréquence la plus basse, la « fréquence fondamentale », définit la note émise. Les fréquences supérieures, qui déterminent le timbre, sont des harmo-

niques, c'est-à-dire des multiples entiers de cette fréquence fondamentale ; c'est ce qui rend le son harmonieux à nos oreilles.

Prenons maintenant un solide dont la forme est proche de celle d'une cloche et dont on sait calculer exactement les modes de vibration : un cylindre long par rapport à son diamètre et creux, ouvert à ses deux extrémités, comme pour les carillons de porte d'entrée. Un tel tube a toujours une fréquence fondamentale, la plus basse, mais les fréquences suivantes n'en sont plus des multiples entiers [les rapports de fréquence valent 2,68, 7,59, 14,55, ...]. Le son obtenu sera un tintement au son métallique, auquel on peut associer une note, mais qui n'aura pas la rondeur et la musicalité d'un son de cloche.

L'art ancestral des fondeurs de cloches a consisté à trouver la forme la plus appropriée pour un son musicalement juste. Quelques millénaires ont conduit à la forme à symétrie axiale que nous connaissons, du moins en Europe (voir la figure 1). Des écarts régionaux existent et le détail des tracés est encore aujourd'hui rarement connu, les fondeurs ne révélant pas leurs secrets. Mais toutes les cloches ont des formes très proches et produisent, lorsqu'elles sonnent, un « arpège mineur » de cinq notes, dont les fréquences successives sont $0,5f_0$ (octave inférieure, do_2), f_0 (la note fondamentale, do_3), $1,2f_0$ (tierce mineure, mi_3), $1,5f_0$ (quinte, sol_3), $2f_0$ (octave supérieure, do_4). Ce mode mi-



1. LES CLOCHES SEMBLENT être des instruments de musique très simples. Cette apparence est trompeuse : leur forme doit être soigneusement conçue pour qu'elles produisent des sons harmonieux.

neur confère à la cloche son timbre mélancolique caractéristique.

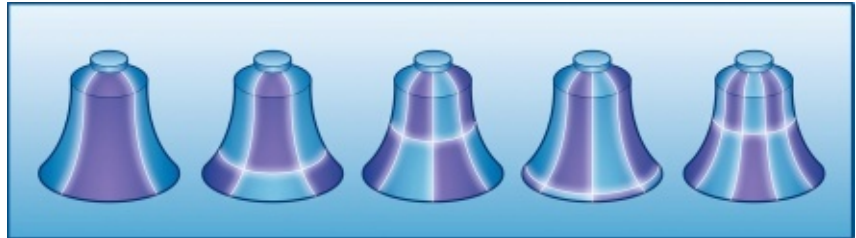
Ce sont les modes de déformation de la cloche qui déterminent ces fréquences. La situation est moins simple que pour une corde tendue, dont chaque mode de vibration dessine un nombre entier de fuseaux (« ventres » de vibration) de même taille, nombre qui correspond au multiple de la fréquence fondamentale émis.

Pour un solide creux tridimensionnel, la question, plus complexe, n'a reçu de réponse définitive que récemment (eu égard au passé de l'instrument), grâce à la théorie des groupes et au développement de l'interférométrie holographique. À la place des fuseaux de la corde, les modes résonnants de la cloche sont définis par les lignes nodales, constituées par les points où l'amplitude de vibration du matériau est nulle (nœuds).

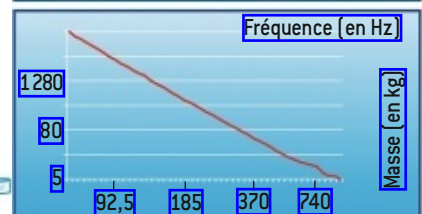
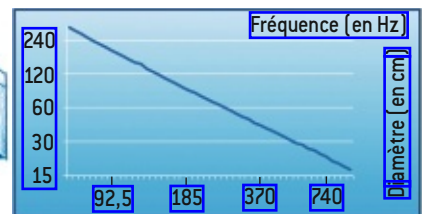
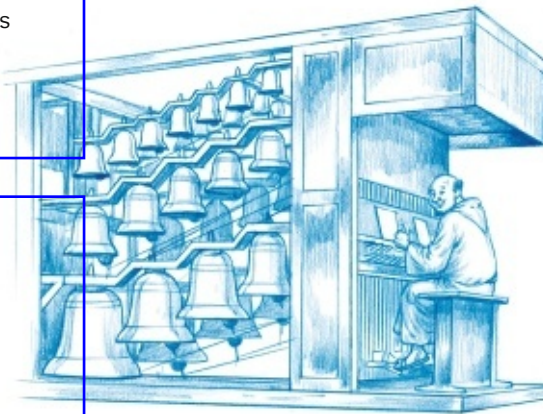
Frapper au bon endroit

Les lignes nodales séparent des domaines qui vibrent en opposition (voir la figure 2), et nous renseignent sur l'endroit le plus adapté pour frapper. Si le battant frappe au niveau d'un nœud, le mode de vibration correspondant ne sera pas excité et la note associée non émise. Si le point de frappe se situe au niveau de la panse (près du bord de la cloche), le battant aura un effet maximal, le bras de levier étant le plus long, et l'on est sûr d'obtenir toutes les notes, même si la proximité de la ligne nodale de la quinte fait qu'elle sera peu sonore.

Réaliser une cloche harmonieuse n'est pas tout. Les fondeurs doivent aussi réaliser des séries de cloches dont les notes sont fixées à l'avance, qu'il s'agisse des quelques cloches d'un clocher ou des 32 cloches et plus d'un carillon. Heureusement, il n'est pas nécessaire de déterminer un nouveau tracé pour chaque cloche : il suffit de réaliser des cloches homothétiques. En d'autres termes, on garde le même profil, mais on multiplie la taille (et l'épaisseur) de la cloche modèle par un coefficient. Avec une suite bien choi-



2. UNE MÊME CLOCHE PEUT VIBRER selon différents modes. Chaque mode est notamment caractérisé par ses lignes nodales (en blanc), lieux où l'amplitude de vibration est nulle. Deux domaines séparés par une ligne nodale vibrent en opposition : lorsque les points d'un domaine (en bleu) effectuent un mouvement vers l'extérieur de la cloche, les points du domaine adjacent (en violet) se dirigent vers l'intérieur. En général, lorsque le battant frappe la cloche, plusieurs modes sont produits simultanément (cinq d'entre eux sont illustrés ci-dessus). Les modes qui sont excités dépendent notamment du point de frappe. Par ailleurs, après être sortie des forges, la cloche peut être accordée en enlevant de la matière en des endroits bien choisis, ce qui modifie légèrement les modes de vibration.



3. UN CARILLON EST CONSTITUÉ d'un ensemble de cloches permettant de couvrir toutes les notes d'une gamme. Pour ce faire, on fabrique des cloches homothétiques : on multiplie la taille et l'épaisseur d'une cloche modèle par un facteur k , déterminé de façon à obtenir la bonne fréquence fondamentale de vibration. Lorsqu'on applique un facteur d'homothétie k , la masse de la cloche est multipliée par k^3 (courbe bleue), tandis que, très approximativement, sa fréquence fondamentale est divisée par k (en fait par k^a , où $a < 1$).

sie de coefficients, on obtient toutes les notes de la gamme chromatique.

Les vibrations d'une cloche étant compliquées, il n'y a pas de relation simple entre le facteur d'homothétie et la fréquence fondamentale de vibration. On en a cependant une approximation grossière en utilisant la loi relative aux cylindres creux : la fréquence fondamentale est proportionnelle au rapport de l'épaisseur sur le diamètre au carré. Pour une homothétie de facteur k (ce qui correspond à multiplier le diamètre et l'épaisseur de la cloche par k , et sa masse par k^3), la fréquence est divisée par k . Ainsi, pour obtenir une variation de trois octaves vers

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>

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

✓ BIBLIOGRAPHIE

N. McLachlan *et al.*, *The design of bells with harmonic overtones*, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114, n° 1, pp. 505-511, 2003.

T. D. Rossing (éd.), *Acoustics of Bells*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1984.

le grave, soit une division de la fréquence par huit, on doit multiplier par 512 la masse de la cloche. C'est pourquoi les cloches ont des masses qui vont de quelques dizaines de grammes à plusieurs tonnes !

La seule exception sur l'homothétie concerne les petites cloches qui produisent les sons les plus aigus. La puissance sonore émise dépend en effet de la superficie vibrante. Cela explique qu'une corde émet très peu et que, pour rendre le son audible, on a besoin d'une caisse de résonance, comme pour un violon ou une guitare.

Les cloches présentent au contraire des surfaces d'émission importantes, donc produisent des sons puissants, qui s'entendent de loin. Mais à chaque fois que l'on double la fréquence, on diminue l'aire de la cloche et, partant, la puissance émise par un facteur quatre environ. Même si

l'oreille humaine entend mieux les aigus que les graves, la perte de puissance est telle qu'il faut s'éloigner de la loi homothétique : pour ces petites cloches, on préfère moins diminuer le diamètre (et donc accroître la surface) et augmenter l'épaisseur (pour conserver la fréquence). Là encore, l'art du fondeur est crucial.

La conception des cloches n'est pas un art dépassé : les ordinateurs permettent d'effectuer des simulations numériques et d'améliorer les tracés existants, voire d'explorer des profils innovants. Le fondeur Royal Eijsbouts, aux Pays-Bas, a récemment conçu des cloches qui émettent un arpège majeur. On a aussi fabriqué des cloches harmoniques, qui produisent les mêmes vibrations qu'une corde tendue. Ces innovations sonneront-elles la fin de la mélancolie ou de la joie dans nos campagnes ?



Professeurs, chercheurs, étudiants des filières technologiques, scientifiques et management : inventez avec McDonald's France des solutions inédites pour l'énergie, les emballages ou l'agriculture.

LES LAURÉATS DES ANNÉES PRÉCÉDENTES :
 El Purpan Toulouse • HEI Lille • Institut EGID Bordeaux
 ISSBA Angers • L'école de design Nantes Atlantique
 LERMAB-UHP Nancy • LGM² Bordeaux • UTT Troyes

SCIENCE & GASTRONOMIE

Quand le sucre fond

En chauffant, le sucre ne fait pas que fondre : il se transforme en divers composés, aujourd'hui identifiés, qui inspireront différentes créations culinaires.

Hervé THIS



La glace fond à 0 °C, une température constante, parce que l'eau n'est composée que d'une sorte de molécules. Cependant, le beurre, composé de molécules variées, commence à fondre à -10 °C et il est complètement fondu vers 50 °C. Alors pourquoi le sucre de table, le saccharose, dont toutes les molécules sont identiques, n'a-t-il pas un point de fusion bien net ? Et quelle importance ?

La température de fusion du sucre augmente avec la vitesse à laquelle on le chauffe. Le glucose et le fructose, eux aussi faits de molécules identiques, présentent également ce comportement anormal. Cela, ce sont les faits de la science des aliments. Parallèlement, en pâtisserie et en confiserie, les artisans ont leurs observations centenaires : les sirops chauffés d'une « certaine » façon ne recristallisent pas quand ils sont ensuite refroidis.

Si l'empirisme confiseur n'est pas à même d'expliquer les observations, sinon par des intuitions souvent fausses (parce que fondées sur l'usage de concepts macroscopiques, et non moléculaires), les chimistes ont expliqué que les sucres se décomposent quand on les chauffe, de sorte qu'il n'y aurait plus de raison pour que la masse chauffée fonde à une température fixe. Le phénomène a été étudié par Joo Won Lee et ses collègues de l'Université d'Urbana-Champaign, dans l'Illinois. Ces chimistes ont séparé les composés apparaissant à des températures différentes.

On n'avait pas attendu 2011 pour étudier la décomposition thermique du saccharose, du glucose ou du fructose, laquelle diffère en présence ou en absence d'eau ; mais, cette

fois, les analyses sont plus subtiles. On tient compte du fait que les sucres sont très hygroscopiques (ils absorbent l'humidité) : les cristaux sont le plus souvent entourés d'eau, venue de l'atmosphère.

Avec les années, on avait identifié que le saccharose, par exemple, peut se décomposer en fructose et glucose. Selon la teneur en eau, on sait aussi que le saccharose peut former des anhydrides de saccharose, par perte d'atomes d'hydrogène et d'oxygène (sous la forme d'eau), ou bien des isomères du saccharose. Pour le fructose, la transformation conduit soit au 5-hydroxyméthylfurfural, à l'odeur de caramel, soit à des anhydrofructoses, soit à des oligosaccharides, c'est-à-dire des enchaînements de quelques maillons (résidu de fructose, résidu de saccharose, etc.). Quand la température augmente encore, une foule de composés se forment par pyrolyse, et l'avenue du caramel commence.

Pour en rester au sucre chauffé, non caramélisé, les chimistes américains ont mis au point des techniques de chauffage et de trempe qui ont permis des analyses aux résultats fiables. À l'aide de ces techniques et par chromatographie en phase liquide, ils ont bien montré que le saccharose se décompose lorsqu'il est chauffé jusqu'au point de « fusion ». Ce point doit donc être plutôt nommé « perte de cristallinité » : il ne correspond pas *stricto sensu* à la fusion du saccharose, mais à la fusion d'un mélange de composés formés par les sucres de base et leurs produits de décomposition.

Comme les diverses réactions de transformation moléculaire s'effectuent à des

vitesse différentes, on comprend mieux pourquoi les vitesses d'échauffement donnent des comportements différents.

De surcroît, J. W. Lee et ses collègues ont mesuré les absorptions et dégagements de chaleur liés aux transformations chimiques qui expliquent, avec d'autres phénomènes comme la perte de cristallinité des produits, les variations des températures de « fusion » et la variété des corps obtenus.

La confiserie gagnera à s'emparer de ces résultats pour orienter ses productions. Elle saura produire des sirops qui ne recristallisent pas si elle sait patiemment orchestrer la dissociation du saccharose en glucose et en fructose, qui viendront s'intercaler entre les molécules de saccharose et bloquer leur assemblage en édifices réguliers, cristallins. Elle maîtrisera les goûts si elle utilise les courbes établies, qui montrent les proportions des divers produits de décomposition du saccharose. Elle y perdra en art, mais y gagnera en régularité... à condition que le gourmand le veuille vraiment : ne sommes-nous pas incessamment partagés entre le désir de retrouver un goût merveilleux et l'envie de la découverte ?



Hervé THIS dirige le groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

→ MATHÉMATIQUES

Parcours de mathématiciens

Philippe Pajot
Préface de Michel Serres

Le Cavalier Bleu, 2011
[240 pages, 18 euros].

Ce recueil d'entretiens menés par Philippe Pajot, journaliste scientifique, présente les itinéraires intellectuels de neuf chercheurs en mathématiques (Benoît Mandelbrot, auteur de la théorie des fractales ; Jean-Paul Delahaye, bien connu des lecteurs de *Pour la Science* ; trois lauréats de la médaille Fields, Maxim Kontsevich, Wendelin Werner, Jean-Christophe Yoccoz ; Jean-Pierre Bourguignon ; Michel Broué ; Nicole El Karoui ; Marie-Françoise

pas été attirés par les mathématiques au lycée. C'est souvent après avoir hésité, ou un peu par hasard, qu'ils les ont choisies de préférence aux lettres ou à la philosophie. L'ambiguïté des mathématiques (on discute à perte de vue sur la nature de leurs objets) ne serait donc pas qu'une question abstraite. Elle aurait aussi une conséquence concrète : les mathématiques attirent ceux qui ne veulent renoncer ni aux sciences ni aux lettres.

Expliquer au public non spécialisé l'apport d'un mathématicien est toujours une gageure. Pari gagné, cependant. En quelques pages, sans technicité, chaque interviewé évoque le domaine mathématique qu'il a enrichi et en donne une idée au lecteur. Cela peut mener à aborder des questions actuellement brûlantes ; par exemple, lorsque Nicole El Karoui expose en quoi consistent les mathématiques financières et les défend contre les attaques qu'elles subissent depuis la crise de 2008.

Le non-mathématicien trouvera de quoi mieux cerner les mathématiques. Par exemple, il constatera, entre autres surprises, que Bourbaki est une figure positive pour plusieurs intervenants, mais négative pour Mandelbrot, qui lui reproche la prééminence donnée à l'abstraction. Contrairement à une image répandue, les mathématiques n'ignorent pas plus les désaccords internes que les autres entreprises intellectuelles.

Ce livre vivant, alerte, révèle les mathématiciens dans leur humanité, leur affectivité, et devrait les faire mieux connaître. Il montre que ce sont des hommes et femmes comme tout le monde. Les faire parler aussi de leurs échecs pourrait être instructif. Cela corrigerait l'impression d'autosatisfaction qu'ils donnent parfois ici. L'échec est une épreuve connue de tous les

hommes. Montrer comment les mathématiciens l'affrontent les rendrait encore plus humains !

→ Didier Nordon

→ HISTOIRE DES SCIENCES

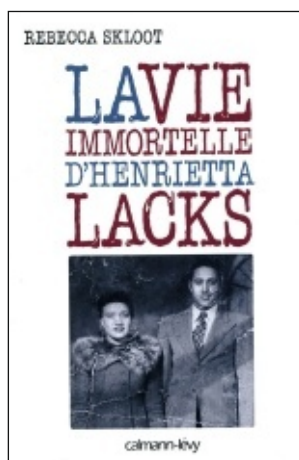
La vie immortelle d'Henrietta Lacks

Rebecca Skloot

Calmann-Lévy, 2011
[440 pages, 21,50 euros].

En février 1951, à l'Hôpital Johns Hopkins (Baltimore, États-Unis), des cellules cancéreuses de l'utérus furent prélevées, à son insu et à celui de sa famille, chez une femme nommée Henrietta Lacks, pendant une séance de radiothérapie. Ces cellules mises en culture par le docteur George Gey donnèrent naissance à la première lignée cellulaire humaine qu'il appela HeLa du nom de leur progénitrice. Ces cellules étaient dotées d'une capacité de reproduction étonnante et, très vite, elles envahirent les laboratoires du monde entier. Elles suscitèrent des espoirs immenses en recherche médicale, en particulier contre le cancer. Cependant, cela n'empêcha pas Henrietta Lacks de mourir cette année-là.

Rebecca Skloot, journaliste scientifique pour le *New York Times magazine*, a enquêté pendant près de dix années pour reconstituer les multiples aspects de cette histoire humaine et scientifique. Le résultat est passionnant à lire. En effet, dans cette histoire s'imbriquent des dimensions sociales, scientifiques et éthiques. Henrietta Lacks était noire et pauvre. Elle venait d'un petit village de Virginie où elle était née dans une ancienne maison d'esclaves, sans l'eau courante ni l'électricité, avant de suivre son mari parti travailler dans une aciérie de la

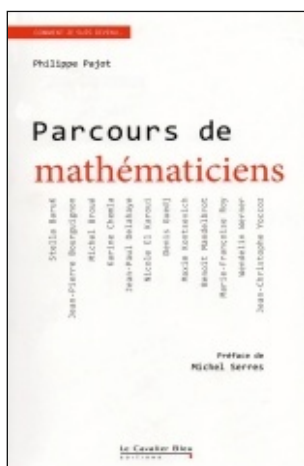


banlieue de Baltimore. Le livre raconte la ségrégation qui sévissait encore à l'époque dans les hôpitaux où des salles d'opération séparées étaient réservées aux Noirs et aux Blancs. Le livre raconte aussi les progrès réalisés grâce à ses cellules, par exemple dans la mise au point d'un vaccin antipoliomyélite. Leur dissémination et les profits réalisés par des firmes privées alors que les membres de sa famille ne touchèrent jamais un sou. La souffrance de ses enfants, en bas âge lorsqu'elle mourut.

Au-delà de tous ces aspects, le livre pose en filigrane, sans vraiment y répondre, la question essentielle de la définition du soi humain. Y a-t-il un peu d'Henrietta Lacks dans les cellules HeLa ? Beaucoup semblent le croire, notamment les membres de sa famille et probablement aussi George Gey puisqu'il leur donna ce nom. Rien n'est moins sûr. C'est oublier qu'un humain, même d'un point de vue strictement biologique, en faisant abstraction de sa dimension psychique, est un être pluricellulaire dont l'identité s'efface sans le tissu de relations qui unissent ses cellules entre elles et dans leur relation à l'environnement.

→ Jean-Jacques Kupiec

Centre Cavailles, ENS/INSERM, Paris



Roy), d'une historienne des mathématiques (Karine Chemla), d'une pédagogue (Stella Baruk), d'un romancier (Denis Guedj). Les entretiens suivent tous le même plan : la naissance de la vocation et le cursus de la personne interrogée ; son apport aux mathématiques ; les figures qui l'ont marquée ; son regard sur l'état actuel de la discipline.

Un point est frappant : en majorité, ces mathématiciens n'ont

→ ANTHROPOLOGIE

Pasteurs nomades de Mongolie

Linda Gardelle

Buchet Chastel, 2010
(190 pages, 25 euros).**Pasteurs touaregs dans le Sahara malien**

Linda Gardelle

Buchet Chastel, 2010
(214 pages, 25 euros).

Le nomadisme a-t-il encore un avenir à l'heure de la mondialisation économique et du changement climatique ? Telle est la question à laquelle l'anthropologue Linda Gardelle tente de répondre dans ces deux ouvrages, rédigés pour un large public et dotés de superbes photographies en couleur. Sa démarche, fondée de manière originale sur deux enquêtes distinctes, vise à comparer des types de populations pastorales nomades très différents, en Mongolie et dans le Sahara malien. C'est-à-dire des peuples qui pratiquent le déplacement régulier des animaux et de toute la communauté humaine en fonction des ressources

disponibles, et sont donc sans habitat fixe. Le but de cette recherche est de comprendre les transformations de ces sociétés, comme le rôle que peut y jouer l'État.

Que nous apprend-elle ? Dans les deux cas, ces sociétés se révèlent en transition et soumises à de grandes difficultés. Le troupeau est leur seul capital : vaches, moutons, chèvres, yaks pour les Mongols ; chameaux et chèvres pour les Touaregs. Les nomades se déplacent en pesant le moins lourd possible, emportant le minimum d'eau, de nourriture et d'abri, dans des conditions climatiques extrêmes : fortes amplitudes thermiques, irrégularité des précipitations. Le nomadisme est une technique très bien adaptée à ces climats arides, le déplacement des troupeaux évitant d'user l'écosystème fragile. Autre point commun, ces populations savent se moderniser : les Touaregs utilisent quand ils le peuvent des camions 4x4 et des citernes d'eau, les Mongols disposent pour leur habitation traditionnelle (la yourte) de l'électricité par panneau solaire et d'antennes paraboliques. Il reste que le réchauffement climatique précarise ces deux populations : désertification du Sahara, pollution et pluies acides dans les steppes mongoles. Et la pratique fréquente du surpâturage n'arrange rien. Enfin, la difficulté à s'insérer dans l'économie mondialisée est la même : concurrence étrangère, manque d'infrastructures, éloignement des principales routes commerciales, pas d'accès aux soins pour les animaux.

Toutefois, le rôle de l'État doit être pris en compte. Au Mali, l'État ne se soucie pas de ses nomades, qui sont présentés de manière péjorative dans les livres d'histoire comme des « pillards ». Les nomades mongols bénéficient quant à eux de retraites et de maigres pen-

sions, de la part d'un gouvernement qui les érige en symboles de l'identité nationale, au sein d'une propagande faisant de Gengis Khan, premier empereur mongol, le héros « fondateur » du pays.

→ Régis Meyran

Docteur de l'École des hautes études en sciences sociales

→ GÉOLOGIE

De la Durance aux monts de Vaucluse

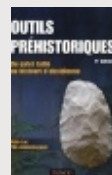
Georges Bronner

Jeanne Laffitte, 2010
(64 pages, 23 euros).

Dans cet ouvrage, Georges Bronner, géologue et ancien enseignant à l'Université de Marseille, a su combiner deux passions : l'aquarelle et la géologie. La géologie, d'abord, puisque c'est le troisième volume du même type qu'il propose sur la géologie provençale. Les deux premiers racontaient l'histoire du littoral méditerranéen, de la Côte d'Azur à la Camargue, tandis que le dernier s'enfonçait dans les terres de Haute-Provence pour nous faire découvrir les merveilles du parc régional du Luberon, de la Durance au mont Ventoux.

Le spécialiste tout comme le néophyte ou l'enseignant y trouveront leur compte, car à travers l'histoire géologique du Luberon, c'est celle de la Provence qui est racontée, depuis l'époque où la mer du Trias baignait la région (après l'érosion des massifs hercyniens, il y a 250 millions d'années) jusqu'aux dernières glaciations quaternaires où l'homme préhistorique se gelait dans les grottes creusées au flanc même de somptueuses falaises. De la chaîne « pyrénéo-provençale » à la chaîne « alpine »

Brèves

OUTILS PRÉHISTORIQUESJ.-L. Piel Desruisseaux
Errance, 2011
(196 pages, 22 euros).

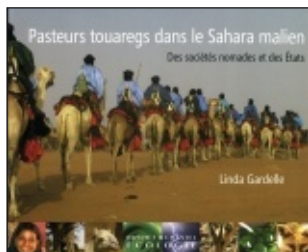
amusante, cette petite encyclopédie pratique des outils lithiques. Elle résume les principes de la taille, parfois pratiquée depuis des millions d'années, des principaux types d'outils préhistoriques. Elle sera utile aux (futurs) préhistoriens, et dotera les passionnés de Préhistoire de sensations nouvelles dans les musées.

**LA VIE, L'ÉVOLUTION ET L'HISTOIRE**Michel Morange
Odile Jacob, 2011
(202 pages, 23 euros).

Il existe deux biologies, l'une évolutive et l'autre fonctionnelle. L'auteur analyse les conséquences de leur convergence, attirant l'attention sur le fait que la sélection naturelle n'est pas l'unique mécanisme producteur de formes. Ainsi, aujourd'hui, le biologiste doit analyser les relations complexes existant entre ce qui est de l'ordre de la nécessité (pour la survie,...), et ce qui est de l'ordre de la contingence (le hasard,...).

L'HOMME, L'ANIMAL ET LA MACHINEGeorges Chapouthier
et Frédéric Kaplan
CNRS Éditions, 2011
(220 pages, 19 euros).

Ce stimulant ouvrage fait le point sur les manières dont les animaux et les machines sont comparables aux humains. Les auteurs abordent tant les aptitudes des trois types d'êtres (complexité, cerveau, intelligence, conscience...) que leurs relations (amour, sexualité, droits...), avant de donner des « conclusions croisées », l'une du biologiste et l'autre de l'ingénieur.



Brèves

BONNES BACTÉRIES
ET BONNE SANTÉ

Gérard Corthier

Quæ, 2011 (128 pages, 19 euros).



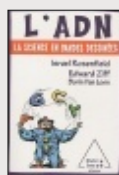
Qui sont ces milliards de bactéries qui peuplent nos intestins et quel est leur rôle ? Comment sont-elles arrivées là et pourquoi ne nous rendent-elles pas malades ? Telles sont les questions auxquelles répond de façon claire et accessible un spécialiste de microbiologie et de physiologie digestive.

L'ADN

Israel Rosenfield *et al.*

Odile Jacob, 2011

(258 pages, 19 euros).



L'histoire de la découverte de l'ADN et de

son rôle pas à pas, à travers le regard de deux professeurs d'université américains et d'un dessinateur de bandes dessinées. C'est ce que nous propose cet ouvrage qui réussit, par des dessins très explicites, à rendre tangibles les mécanismes les plus complexes de réplication et de réparation de l'ADN.

CULTURE SCIENTIFIQUE
ET HUMANISME

Nicole Hulin

L'Harmattan, 2011

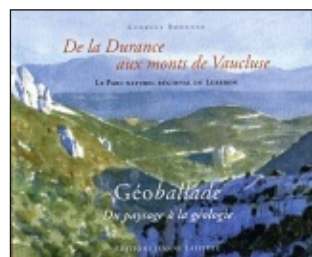
(202 pages, 20 euros).

La question de la place des sciences dans l'enseignement n'est pas nouvelle, rappelle cet ouvrage qui retrace les principaux débats du XIX^e et du XX^e siècles sur le sujet. Nombre de scientifiques s'étaient mobilisés pour améliorer l'enseignement des sciences, de la leçon de choses de l'école primaire au rapport entre sciences et lettres dans le secondaire. Les questions soulevées – quelles sciences enseigner ? Dans quels buts ? Comment favoriser la recherche ? Comment former les professeurs ? – sont toujours d'actualité.

responsable des séismes actuels, tout est relaté avec précision, y compris la grande période d'érosion qui a façonné les paysages lorsque la *Mare Nostrom* avait disparu pour renaître aussitôt, il y a entre cinq et six millions d'années. La lecture et la compréhension sont facilitées par une bonne corrélation de cartes, schémas et coupes géologiques simplifiées et coloriées.

La vie n'est pas absente de cet ouvrage où une grande place est faite aux fossiles terrestres et marins qui ont servi de bornes au calendrier terrestre. Même l'homme, dont les activités ancestrales ont été intégrées au parc naturel, a droit à un chapitre spécifique.

Mais sans le don artistique de l'auteur, initié aux couleurs et aux grands espaces sahariens, en Mauritanie, ce livre ne serait qu'un guide géologique de plus. Ce qui en fait l'originalité, ce sont les magnifiques aquarelles illustrant paysages et fossiles. Il est vrai que les tons pastel de la Haute-Provence, des bleus profonds des forêts aux blancheurs lumineuses des falaises « urgoniennes » en passant par les ocres d'Apt et les vio-



lets des champs de lavande, se prêtent bien à l'exercice.

Mieux que des photographies, ces esquisses soulignent les grands traits géologiques et, quand cela n'est pas suffisant, les paysages sont expliqués par une gravure géologique. De même, les difficultés sont aplanies, comme le séisme de Lambesc, précédé d'une explication sur le mécanisme des

séismes. Une manière de faire aimer la géologie de 7 à 77 ans.

→ Michel Villeneuve

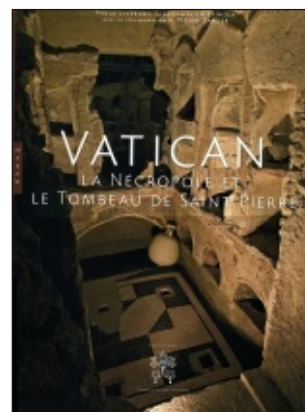
CNRS/Université de Provence

→ ARCHÉOLOGIE

Vatican
La nécropole
et le tombeau
de saint PierrePaolo Liverani,
Giodomenico Spinola
et Pietro Zander

Hazan, 2010

(352 pages, 79 euros).



Le qualificatif de « Pompei funéraire » n'est pas usurpé !

Voilà l'impression que procure cet ouvrage richement illustré et documenté. Les auteurs nous présentent une vue claire et synthétique des fouilles menées dans la cité vaticane de 1930 à 2006. Entre le I^{er} et le IV^e siècle, la zone orientale de ce territoire accueillait un vaste espace funéraire en bordure d'une voie romaine (*via Triumphalis*). La nécropole s'étendait sur le versant d'une petite colline où de fréquents éboulements, durant l'Antiquité et le Moyen Âge, ont contribué à la conservation de nombreux tombeaux antiques.

La présentation est axée sur deux zones de la nécropole, sous la basilique Saint-Pierre et près de la *via Triumphalis*. Dans la première, d'importants tombeaux maçonnés et richement décorés ont été édifiés par une frange aisée de la population. Un éclairage spécifique est apporté à l'un d'eux, attribué à l'apôtre Pierre et sur lequel des générations de pèlerins se sont recueillis.

La nécropole de la *via Triumphalis* est abordée à travers différents secteurs de fouilles dont celui de Santa-Rosa, impressionnant par sa conservation et qui a fait l'objet d'une fouille récente.

Le principal intérêt de cet ouvrage est de montrer, à travers les monuments, le mobilier et l'iconographie (peintures, mosaïques, statuaire...), le passage progressif de l'incinération à l'inhumation entre les I^{er} et IV^e siècles à Rome. On observe ainsi la succession chronologique des sépultures et les divers aménagements au sein d'une nécropole vite saturée. Les deux zones offrent l'avantage de présenter des tombes monumentales et des tombeaux plus modestes de type columbarium, voire d'humbles tombes avec de simples vases surmontés de conduits à libations. Les stèles funéraires nous renseignent parfois sur le statut social des individus en révélant, outre leur identité, leur statut (esclave, affranchi de l'empereur...) et leur fonction au sein de la société romaine.

→ Philippe Blanchard

INRAP, Tours



Retrouvez l'intégralité de votre magazine
et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr