POUR LA SCIENCE

RYTHMES SCOLAIRES : l'avis des scientifiques

POUR LA SCIENCE

Mars 2013 - n° 425

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Modéliser le cerveau humain
Un projet gigantesque et ambitieux

Les météorites primitives
La nébuleuse solaire cartographiée

Tours de magie
L'art de mélanger les cartes

Les fractales lisses
Un nouvel objet mathématique

M 02687 - 425 - F: 6,20 €

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

Telligo

Bien plus que des colos

Pour que votre enfant vive pleinement sa passion !



Telligo, l'inventeur des séjours à thème pour les 6/17 ans, propose de vraies rencontres entre des jeunes avides d'aventures inoubliables et des animateurs experts qui veulent partager leurs passions.

Pour recevoir nos brochures
01 46 12 18 50
www.telligo.fr

POUR LA SCIENCE
www.pourlascience.fr
8, rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Standard : **01 55 42 84 00**

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossiers Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe
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 :
Guillaume Aulanier, Sophie Gallé-Soas, Évelyne Heyer, Tarik Issad, Christopher Jarvis, Pierre Jouventin, Lucile Julien, François Nez, Jeanne Peiffer, Christophe Pichon, Frédéric Pont, Perrine Ruby, David Saadoun, Julien Siebert, Daniel Tacquenet, François Tronche, Maéva Vignes, Bernard Vitrac.

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr)
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
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de livres ou de magazines :
0805 655 255 (numéro vert)

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : 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 contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

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

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

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2011 www.ojd.com

Mathémagie

Les neurobiologistes se penchent sur les mécanismes cérébraux qui permettent aux magiciens de se jouer de nous, nous donnant à voir ce qui n'existe pas ou nous masquant ce qui crève les yeux. Détourner l'attention est leur maître mot. La neuromagie est une nouvelle discipline où des scientifiques travaillent avec des magiciens pour préciser les bases neurobiologiques des phénomènes attentionnels. Elle est en plein essor et, contrairement à ce que certains esprits chagrins craignaient, ces découvertes n'enlèvent rien à la magie. Ce n'est pas parce que l'on comprend un peu mieux comment procèdent les magiciens que l'on se laisse moins facilement piéger ! La magie continue d'opérer.

Si les magiciens ont une excellente compréhension intuitive du fonctionnement cérébral, ils ont aussi des connaissances mathématiques qu'ils appliquent à leur art. Ainsi, leur façon de mélanger les cartes ne laisse rien au hasard. On est toujours surpris qu'après avoir coupé, mélangé, recoupé, mélangé à nouveau, ils retrouvent la carte que l'on avait choisie sans la leur montrer et

Pour percer les secrets de la beauté

placée sur le haut de la pile. En fait, rien de plus simple… après d'innombrables heures d'entraînement et avec une dextérité sans égale ! Ils appliquent le « mélange déterministe » : ils coupent en deux tas strictement égaux et, quand ils mélangent, alternent une carte de chaque paquet. Après quelques cycles, dont ils connaissent le nombre, ils retrouvent la configuration initiale *(voir Des cartes bien mélangées, page 80)*.

Existe-t-il d'autres passerelles entre magie, mathématiques et art ? Chez Dürer, d'abord, qui chercha à mettre en évidence les lois géométriques de la nature pour percer les secrets de la beauté, et les appliqua à son art *(voir Les coniques selon Dürer, page 74)*. Dans les fractales lisses aussi. Les mathématiciens ont découvert ce nouvel objet géométrique en cherchant à préserver les longueurs quand on passe d'une portion de plan à un tore *(voir Les fractales lisses, page 20)*. Par une sorte de « mathémagie », ils rendent possible ce maintien des longueurs, opération longtemps jugée impossible. Les enjeux des mathématiciens et ceux des magiciens sont à l'évidence différents, mais certaines stratégies semblent les rapprocher. ■

SOMMAIRE

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 **Une nouvelle source d'énergie dans les neurones**

8 **Mémoire défaillante contre famine**

9 **Des gènes indiens chez les aborigènes australiens**

10 **Un problème de taille pour le proton**



12 **Pesticides contre amphibiens**

... et bien d'autres sujets.

Opinions

14 POINT DE VUE
Rythmes scolaires : les recentrer sur l'enfant
François Testu

15 DÉVELOPPEMENT DURABLE
L'obsolescence programmée est-elle une stratégie répandue ?
Alain Geldron

19 VRAI OU FAUX
Une température absolue peut-elle être négative ?
Roger Balian

Ce numéro comporte un encart *Pour la Science* / Salon du livre 2013 posé en 4e de couverture de l'édition abonnés Paris IDF, deux encarts d'abonnement brochés sur la totalité du tirage et une offre d'abonnement *Pour la Science* p. 65.
En couverture : © *V. Borrelli, S. Jabrane, F. Lazarus, D. Rohmer et B. Thibert*

À LA UNE

20 MATHÉMATIQUES
Les fractales lisses
Vincent Borrelli, Francis Lazarus et Boris Thibert

Il est possible de transformer une portion de plan en une surface torique sans modifier les longueurs. Le résultat, visualisé pour la première fois, inaugure une nouvelle famille d'objets géométriques.

28 ÉVOLUTION
Le plus étrange des oiseaux
Ewan Fordyce et Daniel Ksepka

L'étonnante adaptation des manchots à des conditions extrêmes est le fruit d'une lente évolution, qui se déroule depuis plus de 60 millions d'années.

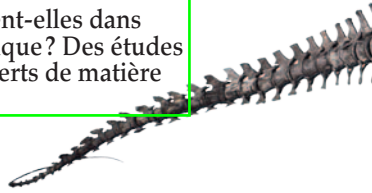


36 NEUROSCIENCES
***Human Brain Project* : simuler le cerveau humain**
Henry Markram

Le projet Cerveau humain a été désigné comme l'un des deux programmes phares de la recherche européenne. Grâce à lui, les neurosciences pourraient progresser à pas de géant.

44 PHYSIQUE
D'où vient l'électricité statique ?
Meurig Williams

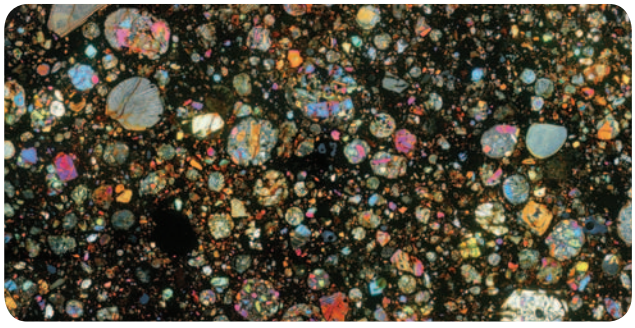
Comment les charges s'accumulent-elles dans les phénomènes d'électricité statique ? Des études récentes montrent que des transferts de matière sont parfois à l'œuvre.



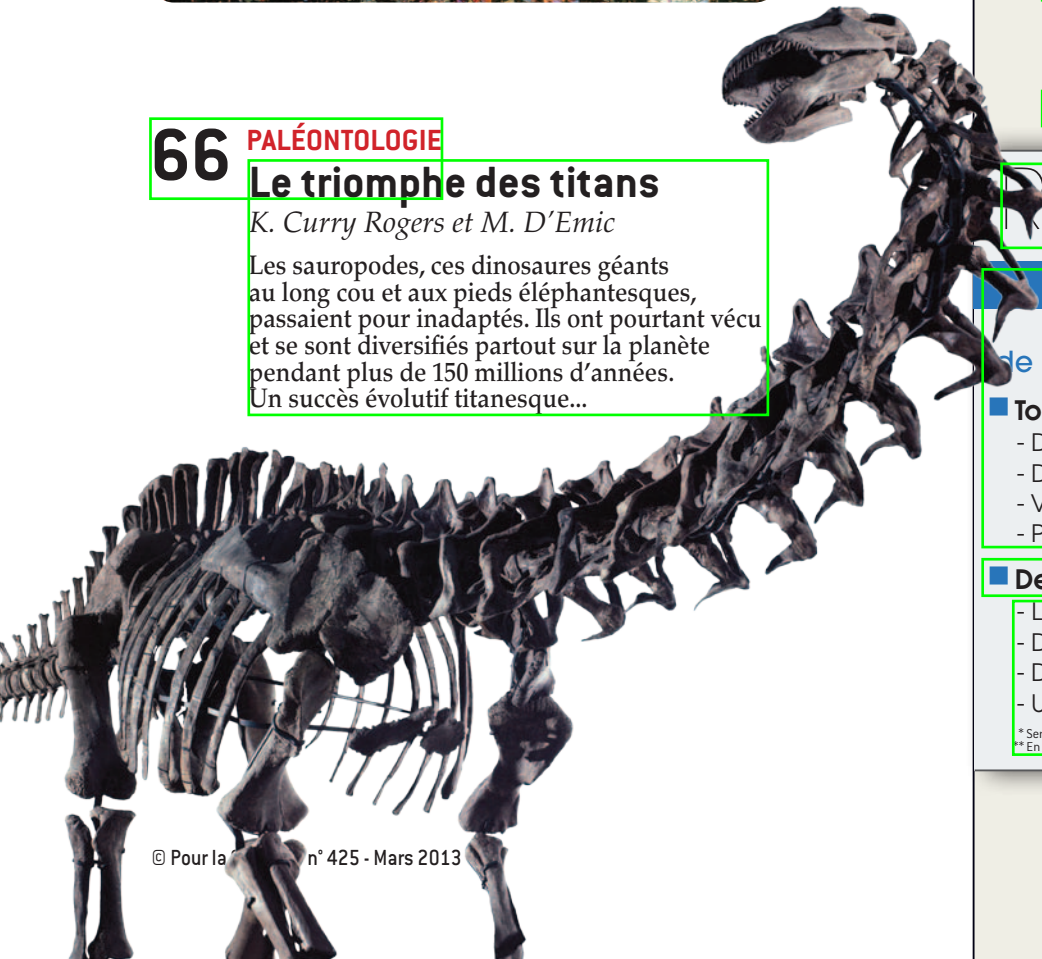
© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

52 ENVIRONNEMENT
El Hierro, île écologique modèle ?
Alain Gioda, Carlos Recio et Luis Santana
Sur El Hierro, une île des Canaries, des dispositifs innovants sont mis en place pour la gestion de la biodiversité, de l'eau et de l'énergie.

58 ASTROPHYSIQUE
Les secrets des météorites primitives
Alan Rubin
L'analyse microscopique des chondrites, les plus vieilles roches du Système solaire, laisse entrevoir ce qu'était la nébuleuse solaire peu avant la formation des planètes.



66 PALÉONTOLOGIE
Le triomphe des titans
K. Curry Rogers et M. D'Emic
Les sauropodes, ces dinosaures géants au long cou et aux pieds éléphantesques, passaient pour inadaptés. Ils ont pourtant vécu et se sont diversifiés partout sur la planète pendant plus de 150 millions d'années. Un succès évolutif titanesque...



Regards

74 HISTOIRE DES SCIENCES
Les coniques selon Dürer
Daniel Silver
À la Renaissance, la méthode de construction des coniques d'Albrecht Dürer a été source d'inspiration tant dans les arts que dans les sciences.

80 LOGIQUE & CALCUL
Des cartes bien mélangées
Jean-Paul Delahaye
Les mathématiciens comprennent de mieux en mieux le mélange des cartes.

86 SCIENCE & FICTION
Combien de doigts pour un extraterrestre ?
J.-S. Steyer et R. Lehoucq

88 ART & SCIENCE
La pomme d'Adam est un citron
Loïc Mangin

90 IDÉES DE PHYSIQUE
La courbe antisecousse
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE
De l'huile en perles
Hervé This

94 À LIRE

Rendez-vous sur
POUR LA SCIENCE .fr
Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

■ Toutes les sciences en un clic
- Des actualités quotidiennes
- Des articles en libre accès
- Votre magazine numérique en ligne*
- Plus de 8 ans d'archives*

■ Des services exclusifs
- Les réactions aux articles**
- Des offres d'emploi scientifiques
- Des newsletters**
- Un espace abonnement

* Service payant. Si vous êtes abonné(e), les numéros compris dans votre abonnement sont offerts.
** En créant votre compte.

MAL À LA TÊTE OU MAL AU VENTRE ?

« L'étude des sciences abstraites fatigue beaucoup plus les organes digestifs que les autres travaux, surtout quand on les étudie avec l'application que j'y ai mise et dont vous trouverez bien peu d'exemples. » Cette remarque bizarre est due à un mathématicien éminent (Cauchy, lettre de 1832). Alors, je n'ose en sourire…

D'autant que la science moderne la confirme. En 1891, a été observée chez les singes une relation inverse entre la taille du cerveau et celle de l'estomac. Ce phénomène a reçu l'explication que voici. Dans le métabolisme des primates, deux organes sont exigeants en énergie : le cerveau et le système gastro-intestinal. Certains primates – nos ancêtres – ont appris à retenir où se trouvaient les arbres à fruits, et quand ceux-ci fructifiaient. Ces efforts intellectuels pour choisir une meilleure nourriture ont amené leur cerveau à grossir, donc à devenir exigeant en énergie, mais ont allégé le travail de l'intestin. Sa taille dépendant du régime alimentaire, l'intestin a diminué au cours de l'évolution, ce qui a compensé le coût métabolique d'un gros cerveau (Christine Tardieu, *Comment nous sommes devenus bipèdes*, Éd. Odile Jacob, 2012).

Une fois de plus, les mathématiques ont magnifiquement anticipé. Cauchy a pressenti que penser met le ventre à rude épreuve. Cela a-t-il un rapport avec le fait que, par ailleurs, il est à l'origine du « théorème des résidus » ?



À MENTEUR, MENTEUR ET DEMI

Le principal grief d'Alceste contre les hommes est que ceux-ci ne cessent de dissimuler. Et le principal grief des hommes contre Alceste est que celui-ci se refuse à le faire. Résumée à la hussarde, l'idée générale du *Misanthrope* est : le misanthrope est celui qui dit la vérité.

En bonne logique, cette proposition équivaut à : le philanthrope est celui qui ment.

Conclusion toujours d'actualité. À qui donne-t-on le nom de philanthrope ? En général, à un requin des affaires qui subventionne une institution charitable. Il se dit mû par l'amour du prochain, mais on peut le soupçonner de vouloir surtout sauver son âme et s'éviter je ne sais quelle damnation. En cela, ce philanthrope est un dissimulateur. Inversement, qui est dissimulateur par excellence ? Celui qui, convoitant le pouvoir, abreuve de promesses les gens qui le lui feront obtenir. Il ne se présente pas à eux comme un arriviste, bien sûr, mais comme leur défenseur. Un vrai philanthrope.

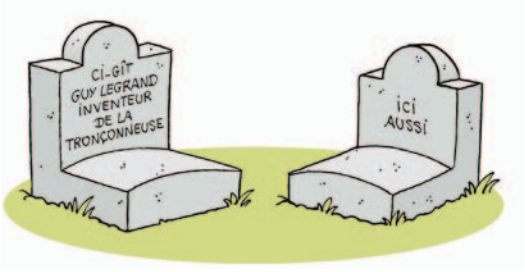
De nos jours, Molière pourrait écrire *Le Philanthrope*. Le héros serait un *golden boy* qui s'enrichit au-delà de toute décence puis, grâce à la fortune ainsi acquise, fonde une faction chargée de le mener par tous les moyens à quelque poste suprême. Pour le seul bien du peuple, évidemment.

LE PIRE N'EST JAMAIS SÛR…

On ne compte plus les physiciens et les chimistes blessés ou tués en faisant des expériences ; les médecins et les biologistes testant sur eux-mêmes, au risque de leur vie, un médicament nouveau ; les explorateurs disparus en expédition ; les logiciens et les mathématiciens devenus fous… Il faut avoir en soi un peu de l'apprenti sorcier pour se hasarder dans l'inconnu, et s'exposer à ses réactions imprévisibles.

La recherche du savoir n'est pas une sagesse. La Bible et la mythologie grecque l'avaient compris. Mais pas notre société. Quand un problème l'inquiète, elle fait figurer des scientifiques dans des « comités de sages ». Or il ne suffit pas qu'ils soient honnêtes pour qu'ils soient de bon conseil. Leur psychologie, façonnée par leur formation scientifique, les incite à surestimer les bienfaits à espérer d'une tentative et à sous-estimer ses risques. Pour prôner la retenue, il leur faut réagir contre leur pente. C'est un effort de réévaluation auquel ils peuvent ne pas être prêts.

La prochaine fois qu'on créera une commission, confions la présidence à Hybris, déesse de la démesure, et nommons membres Faust, Icare, Lucifer, Prométhée. Si ces personnalités indépendantes rendent un rapport incitant à la prudence… c'est que la catastrophe aura déjà eu lieu !



ACCOUPLEMENT FÉCOND

Pourquoi a-t-il fallu plus de temps pour inventer le vélo (fin du XIX^{e} siècle) que le train (début du même XIX^{e}) ? Parce que, au début du XIX^{e} siècle, le mot *vélo* n'existait pas, ce qui a inhibé la conception de l'objet. Le mot *vélocipède* existait, certes, mais cela n'a rien à voir : essayez donc de courir le Tour de France sur un vélocipède ! Alors que les termes *train*, *chemin*, *fer* étaient là depuis longtemps. Il suffisait de les assembler.

Mais les mots *roulette* et *valise* sont là depuis longtemps, eux aussi, de même que l'expression : « Aller comme sur des roulettes. » Or la valise à roulettes est récente. Il faut donc une autre explication. Le philosophe Raphaël Enthoven s'est amusé à observer que, depuis l'invention de la valise à roulettes, les maris sont devenus inutiles.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

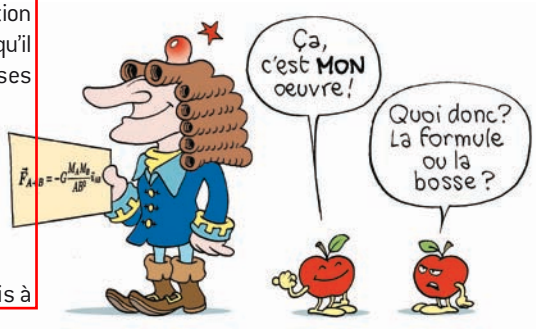
De fait, dans un monde où les moteurs suppléent la force physique, rares, désormais, sont les situations incitant les femmes à demander aux hommes de bien vouloir jouer du muscle pour elles. Pas de doute : ce sont eux, les hommes, qui ont intrigué pour empêcher le plus longtemps possible que germe l'idée si simple d'accoupler les valises et les roulettes.

L'ART DE L'EXPÉRIENCE

L'expression « œuvre d'un artiste » – qu'elle désigne une œuvre précise ou l'ensemble de sa production – n'est en général pas associée à la notion d'expérience. C'est une erreur : l'histoire des arts est une suite d'expérimentations. Bach explorant le tempérament jusqu'à ses limites ; Beethoven, le piano-forte ; les musiciens actuels, l'électronique et l'informatique. Un art qui ne ferait pas d'expériences avec les techniques nouvelles, les poussant le plus loin possible et se transformant à leur contact, cet art s'étiolerait vite.

Chose curieuse, l'expression « œuvre d'un savant » n'évoque pas non plus la notion d'expérience. Elle désigne plutôt les lois qu'il a énoncées, les théories et les hypothèses qu'il a formulées – bref, ses écrits. C'est que les expériences passent pour éphémères, donc subalternes : leur rôle cesse dès que sont énoncées les conclusions auxquelles elles mènent. Aujourd'hui, cependant, la pérennité et la fixité sont moins liées qu'autrefois à la notion d'œuvre – les installations des plasticiens en témoignent. Alors, rien ne devrait retenir de considérer les expériences comme des œuvres.

Une œuvre est une expérience. Une expérience est une œuvre. Ce qui ne signifie ni que ces deux termes sont synonymes ni que l'art et la science sont une seule et même activité. ■



universcience présente

cité des sciences & de l'industrie

les conférences

Cité des sciences et de l'industrie

entrée libre

Les mardis 19, 26 mars et 2 avril à 19h

CYCLE "Économie : échanger autrement"

Les expériences d'économies solidaires ou respectueuses de l'environnement se multiplient. Épiphénomènes ou mutations profondes de nos sociétés ?

En partenariat avec

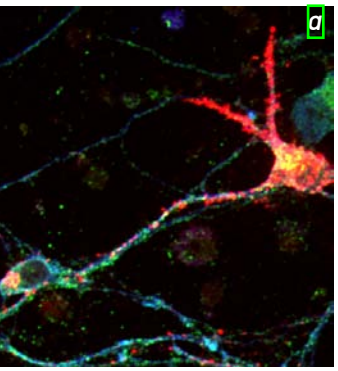
Avec le soutien de

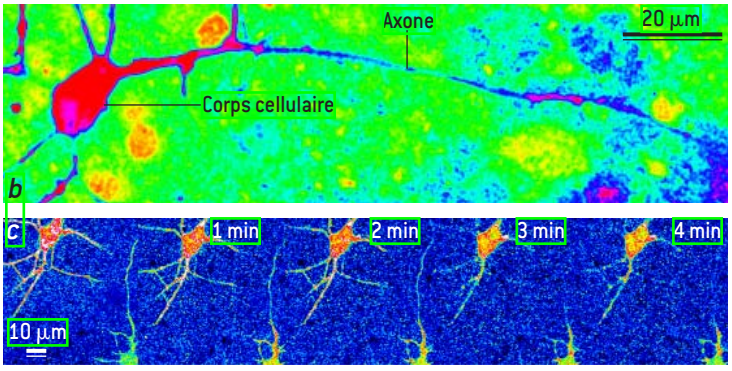
programme complet sur www.universcience.fr

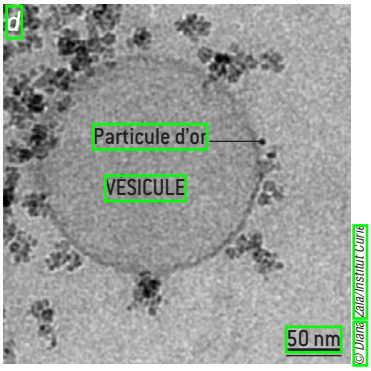
Biologie cellulaire

Une nouvelle source d'énergie dans les neurones

Pour se déplacer dans les neurones, les vésicules synaptiques produisent elles-mêmes, grâce à une machinerie embarquée à leur surface, l'énergie dont elles ont besoin, indépendamment des mitochondries.







Dans un neurone de rat observé en microscopie à fluorescence, l'enzyme GAPDH *(a, en rouge)*, indispensable à la transformation du glucose en énergie, et la protéine huntingtine *(en vert)*, sont visibles sur des vésicules synaptiques *(en bleu)*. À l'aide de particules d'or couplées à un anticorps, GAPDH est aussi détectée sur des vésicules de transport extraites des neurones et observées en microscopie électronique *(d)*. Lorsqu'on diminue fortement l'ATP mitochondrial *(b et c, en rouge)* dans les axones, soit en maintenant les mitochondries dans le corps cellulaire *(b)*, soit en bloquant la production d'ATP mitochondrial par une drogue *(c, on voit ici l'action de la drogue au fil du temps)*, le transport neuronal n'est pas perturbé.

Les mitochondries ne seraient pas les seuls compartiments cellulaires à produire de l'énergie dans les neurones : de minuscules vésicules, les vésicules synaptiques, porteraient leur propre machinerie de production énergétique. Cela leur permettrait de se déplacer d'un bout à l'autre des axones, ces longs prolongements qui transmettent les signaux électriques entre neurones. Diana Zala et Frédéric Saudou, du Laboratoire Signalisation, neurobiologie et cancer (Institut Curie/CNRS/INSERM), à Orsay, et leurs collègues sont parvenus à cette conclusion en étudiant de plus près le mouvement de ces vésicules.

Dans les neurones, la principale source d'énergie est le glucose. Celui-ci fournit de l'énergie aux cellules en deux étapes, sous la forme de molécules d'ATP. D'abord, dans le milieu intracellulaire (le cytoplasme), le glucose est converti par glycolyse en pyruvate, ce qui libère un peu d'énergie (deux molécules d'ATP par molécule de glucose). Puis, au sein des mitochondries, le pyruvate est dégradé, ce qui produit l'essentiel de l'énergie neuronale : 34 molécules d'ATP par molécule de glucose initiale. Toutefois, les mitochondries sont rares dans les axones. Sont-elles capables de fournir en ATP les vésicules synaptiques tout au long de leur voyage ?

Qu'on en juge : pour alimenter les zones synaptiques en diverses protéines, ces vésicules de quelques dizaines de nanomètres parcourent à grande vitesse des axones mesurant de un millimètre à plus d'un mètre de long. Or le moyen de locomotion des vésicules, bien connu, ne consomme pas moins d'une molécule d'ATP tous les… huit nanomètres. Les vésicules sont transportées sur de longs filaments, les microtubules, par des moteurs moléculaires, des protéines qui transforment l'énergie chimique – l'ATP – en énergie mécanique. Comment le neurone fournit-il continûment cette énergie aux moteurs moléculaires ancrés dans les vésicules ?

D. Zala et ses collègues ont d'abord montré que les mitochondries ne jouent aucun rôle dans le mouvement des vésicules synaptiques : dans des neurones de rat en culture, l'inhibition de la production énergétique des mitochondries n'a pas d'incidence sur leur déplacement. En revanche, leur transport est perturbé lorsque l'on bloque une enzyme clef de la glycolyse, GAPDH. L'énergie des vésicules serait-elle uniquement fournie par la glycolyse cytoplasmique ? Pas seulement. En purifiant des vésicules synaptiques à partir de cerveaux de souris, les neurobiologistes se sont aperçus que l'enzyme, bien que principalement sous forme soluble dans le cytoplasme des neurones, est aussi présente à la surface des vésicules, et qu'elle y produit de l'ATP. Mieux, c'est la glycolyse à la surface des vésicules qui fournit l'énergie du transport, et non celle qui a lieu dans le cytoplasme.

Les biologistes n'étaient pas au bout de leurs surprises. Recherchant comment GAPDH se fixe sur les vésicules, ils ont montré que sa liaison est assurée par la protéine huntingtine, impliquée dans une maladie neurodégénérative rare, la maladie de Huntington. Ses symptômes – troubles mentaux, détérioration intellectuelle, mouvements involontaires – seraient-ils liés à une perturbation de la source d'énergie embarquée sur les vésicules synaptiques ? Affaire à suivre…

→ Marie-Neige Cordonnier

Cell, vol. 152, pp. 479-491, 2013

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Entomologie

La boussole galactique du bousier



Les bousiers sont incapables de percevoir la plupart des étoiles, mais ils sont sensibles au gradient d'intensité lumineuse de la Voie lactée.

Comment préserver un trésor nutritif de la concurrence ? Le bousier (un scarabée) a développé une stratégie originale : lorsqu'il découvre une bouse, il confectionne une boule et s'enfuit avec son butin en suivant le chemin le plus rectiligne possible. Marie Dacke, de l'Université de Lund, en Suède, et ses collègues ont montré qu'un bousier sud-africain le fait en s'orientant grâce à la Voie lactée.

Les entomologistes ont placé des bousiers *Scarabaeus satyrus* au centre d'une enceinte et mesuré la distance parcourue (ou, de façon équivalente, le temps mis par les insectes) pour s'en échapper. Lorsque le ciel nocturne était couvert ou que l'on empêchait les insectes de le voir grâce à un cache, leur trajectoire était plus irrégulière. Les chercheurs ont alors placé leur enceinte dans un planétarium et recréé diverses conditions (ciel étoilé « complet », Voie lactée seule, etc.). Sous un ciel étoilé complet, les performances des insectes étaient voisines de celles sous un ciel ne montrant que la traînée lumineuse diffuse de la Voie lactée. C'est donc bien par rapport à la Galaxie que s'orientent ces bousiers !

→ Guillaume Jacquemont

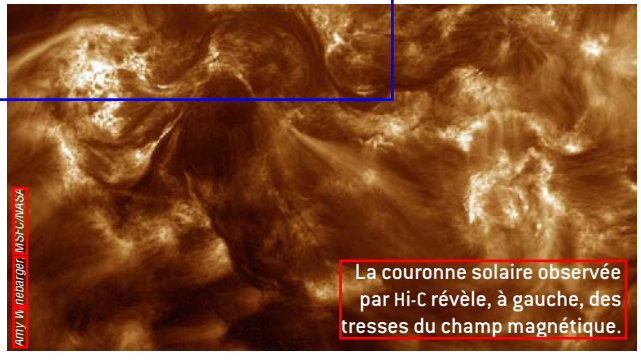
M. Dacke et al., Current Biology, en ligne le 24 janvier 2013

Astrophysique

Les tresses de la couronne solaire

La couronne solaire, partie la plus externe de l'atmosphère de notre étoile, est formée de gaz ionisé peu dense dont la température atteint quatre millions de degrés. Le mécanisme responsable de telles températures reste aujourd'hui mal compris. Or Jonathan Cirtain, du Centre de vol spatial Marshall de la NASA, et ses collègues ont observé des structures de champ magnétique mesurant une centaine de kilomètres et qui pourraient intervenir directement dans le chauffage de la couronne solaire.

L'obstacle principal dans cette étude était de parvenir à une résolution suffisamment fine pour voir ces structures dans l'ultraviolet profond, à la limite des rayons X, ce qui permet de sonder des parties du champ magnétique associées à des températures d'environ trois millions de degrés. Une seconde contrainte était qu'une telle gamme du spectre électromagnétique ne peut être observée qu'à partir d'un instrument situé en dehors de l'atmosphère terrestre.



La couronne solaire observée par Hi-C révèle, à gauche, des tresses du champ magnétique.

En juillet 2012, J. Cirtain et ses collègues ont utilisé l'Imageur coronal à haute résolution, Hi-C, installé sur une fusée. Ils ont obtenu cinq minutes d'enregistrement avant que l'appareil ne pénètre de nouveau dans l'atmosphère. Les images ont mis en évidence des structures du champ magnétique d'une taille caractéristique de 150 kilomètres. Les chercheurs ont observé des assemblages de lignes de champ enchevêtrées ou « tressées » en raison du mouvement complexe du gaz ionisé. Ils ont aussi vu une éruption solaire située à l'intersection de structures indiquées par Hi-C. Ils ont pu estimer l'énergie accumulée dans ces structures et montrer qu'elle serait suffisante pour chauffer la couronne si elle est libérée lors de reconnexions magnétiques – des réarrangements topologiques des lignes de champ.

→ Sean Bailly

J. W. Cirtain et al., Nature, vol. 493, pp. 501-503, 2013

En bref

Un nouveau type d'éruption

Melissa Rotella, de l'Université Victoria en Nouvelle-Zélande, et ses collègues ont identifié un nouveau type d'éruption volcanique sous-marine, intermédiaire entre le type effusif et le type explosif. Comme dans ce dernier cas, il y a formation de pierres ponces. La lave se détache en petites sphères, dans lesquelles le gaz dissous forme des vésicules, à cause de la baisse de pression ambiante. L'extérieur de ces sphères durcit vite et présente peu de vésicules, contrairement à leur cœur qui devient très peu dense.

Richard III sous un parking

Richard III d'Angleterre était brave, est mort au combat en 1485 et a laissé une réputation terrible. Richard Buckley, de l'Université de Leicester, a étudié sa dépouille présumée, retrouvée sous un parking de cette ville. Il vient d'annoncer « qu'au-delà de tout doute raisonnable », il s'agit bien de Richard III, notamment parce que son crâne portait tous les coups reçus au combat mentionnés par les chroniqueurs. R. Buckley a aussi constaté que le roi a été maltraité après sa mort et qu'il aurait été enterré les mains liées.

Testostérone antisclérose

La sclérose en plaques touche, en France, environ 80 000 personnes. Elle entraîne divers troubles neurologiques et se caractérise par une perte de myéline, la gaine protectrice des fibres nerveuses. Une équipe française a traité à la testostérone (ou à un analogue de synthèse) des souris aux fibres démyélinisées qui présentaient les symptômes de la maladie : ces symptômes se sont atténués, la testostérone ayant entraîné la différenciation de cellules souches neurales en cellules fabriquant de la myéline.

En bref

Gènes et maladie de Behçet

La maladie de Behçet touche surtout la Turquie, avec près de 400 cas pour 100 000 habitants. Il s'agit d'une inflammation des parois des vaisseaux sanguins qui se caractérise par des aphtes buccaux et génitaux et qui touche aussi les yeux. Daniel Kastner, de l'Institut de recherche sur le génome humain de Bethesda, aux États-Unis, et ses collègues ont identifié quatre nouveaux gènes liés à cette maladie. Certains se retrouvent dans d'autres pathologies, d'où, peut-être, une piste pour des traitements.

Comme se lie l'insuline

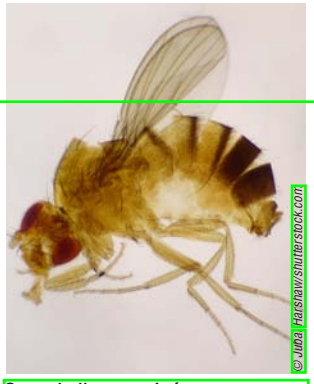
Comment l'insuline se lie-t-elle à son récepteur à la surface des cellules ? Une équipe internationale vient de répondre à cette question. Par cristallographie aux rayons X, John Menting et ses collègues ont décrit la structure du complexe, et montré comment l'interaction modifie la conformation des deux molécules. Ces précisions devraient aider à mieux comprendre pourquoi certaines anomalies de l'insuline entraînent le développement d'un diabète, et à affiner les traitements antidiabétiques.

Neurosciences

Mémoire défaillante contre famine

Près d'un milliard d'êtres humains dans le monde souffrent de la faim et 38 millions sont menacés de famine. Comment l'organisme s'adapte-t-il à une telle pénurie en calories ? Le cerveau contrôle la répartition des ressources dans l'organisme et, en cas de sous-alimentation, il restreint la consommation d'énergie des organes périphériques, afin de maintenir le fonctionnement des organes vitaux. Ce ne serait pas tout : Pierre-Yves Plaçais et Thomas Preat, du Laboratoire de neurobiologie de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de Paris (UMR CNRS/ESPCI), ont montré, chez la drosophile, que le cerveau se prive lui-même d'énergie en bloquant les mécanismes de mémorisation à long terme.

Les neurobiologistes français ont montré l'année dernière comment les drosophiles gardent durablement en mémoire une odeur associée à un danger : dans leur centre de la mémoire olfactive (le « corps pédonculé »), l'activité électrique de deux paires de neurones particuliers oscille et différents mécanismes moléculaires de consolidation de la trace mnésique sont mis en œuvre. Cette fois, ils ont déterminé comment le cerveau des drosophiles s'adapte à une pénurie en calories. Ils ont constaté qu'en privant les mouches de nourriture pendant 24 heures, on les empêche de mémoriser à long terme. En outre, si l'on force cette mémorisation en stimulant les deux paires de neurones, la mémoire à long terme est rétablie, mais les drosophiles vivent alors 30 pour cent de temps en moins ! Cela montre qu'elles ont manqué d'énergie.



Quand elle est privée de nourriture, la drosophile augmente ses chances de survie en inhibant certains mécanismes cérébraux de mémorisation à long terme.

Le cerveau est donc capable de se réguler lui-même : il inhibe un mécanisme de mémorisation coûteux en énergie, de sorte que les chances de survie des drosophiles augmentent. L'amnésie, une stratégie d'adaptation cérébrale à la famine ?

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

P.-Y. Plaçais et T. Preat, Science, vol. 339, pp. 440-442, 2013

Physique

Comment une route se déforme en tôle ondulée

Les routes non asphaltées présentent souvent des ondulations *(voir la photographie)*, formées par le passage répété de véhicules sur une chaussée meuble. Baptiste Percier, Sébastien Manneville et Nicolas Taberlet, à l'École normale supérieure de Lyon, apportent de nouveaux éléments dans la compréhension de ces « corrugations ».

Les modélisations attribuaient un rôle important au roulement et aux suspensions des véhicules, les petites irrégularités initiales présentes sur la voie étant peu à peu amplifiées. Mais il y a quelques années, N. Taberlet et d'autres collègues ont montré que traîner une simple lame inclinée le long d'une piste de sable suffit à y créer des corrugations analogues.

Ces travaux ont établi l'existence d'un seuil de vitesse au-dessous duquel le lit de sable reste plat, et au-dessus duquel les irrégularités initiales se développent en une déformation périodique. Ce seuil augmente avec la masse de l'objet qui circule sur la voie. Enfin, pour des vitesses supérieures au seuil, le motif de corrugations apparaît au fur et à mesure des passages répétés de la lame inclinée. La longueur d'onde du motif reste constante, tandis que son amplitude augmente jusqu'à atteindre une valeur limite.

Avec leur dispositif expérimental – une piste de sable circulaire à la surface de laquelle une plaque inclinée est entraînée à vitesse constante –, B. Percier et ses collègues ont caractérisé la force exercée par le sable sur la plaque. Puis ils ont mis en équations le système en supposant que l'amplitude des déformations est faible. Ils parviennent ainsi à un modèle en accord avec les expériences (vitesse seuil, variation de sa valeur avec la masse de la plaque, longueur d'onde des corrugations). Il reste toutefois à mieux comprendre la physique du phénomène.

→ Maurice Mashaal

Physical Review E, vol. 87, 012203, 2013



Une piste déformée en tôle ondulée, en Mongolie.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Neurobiologie

Du stress à la dépression

Un stress chronique ou excessif peut causer une dépression. Jacques Barik, du CNRS, et ses collègues ont précisé les mécanismes neurobiologiques en cause.

Le stress entraîne la libération d'hormones, telle la corticostérone chez les rongeurs. Les chercheurs ont modifié génétiquement des souris pour que les neurones du noyau accumbens soient insensibles à cette hormone. À l'inverse de souris normales, elles ne développaient pas d'aversion sociale (un symptôme dépressif) lorsqu'elles étaient stressées par des attaques répétitives de leurs congénères. L'action de la corticostérone dans le noyau accumbens, où elle augmenterait la concentration en dopamine, serait donc nécessaire à ce symptôme. En revanche, les souris modifiées et stressées devenaient anxieuses, ce qui suggère que cet autre symptôme dépressif est contrôlé par une aire cérébrale distincte.

→ G. J.

J. Barik et al., Science, en ligne le 18 janvier 2013



© Lichtmeister/shutterstock.com

Le stress favoriserait la dépression en agissant sur les circuits cérébraux de la dopamine, un neurotransmetteur.

Génétique

Le chien s'est adapté au pain

Avec des collègues, Erik Axelsson, de l'Université d'Uppsala en Suède, a identifié un groupe de gènes à l'origine de la capacité du chien à digérer l'amidon. Comment expliquer que le loup, dont le chien n'est qu'une forme domestiquée, ne possède pas ces gènes ? Les chercheurs proposent que des loups, à force de se nourrir de ce que jetaient les humains, auraient développé la capacité de digérer l'amidon, puis auraient été domestiqués. C'est possible, si l'on considère que l'homme consommait déjà des graminées au Paléolithique supérieur, époque de la domestication du loup. Toutefois, il semble plus vraisemblable que c'est seulement quand l'amidon s'est introduit massivement dans le régime alimentaire humain, il y a quelque 10 000 ans, au Néolithique, que les chiens l'ont rencontré assez souvent pour devoir s'y adapter. Le chien et l'homme ont appris ensemble, d'abord à se comprendre, puis à digérer l'amidon...

→ François Savatier

E. Axelsson et al., Nature, en ligne le 23 janvier 2013

Anthropologie

Des gènes indiens chez les aborigènes australiens

Des Indiens ont-ils migré en Australie il y a 4 000 ans ? C'est ce que laisse supposer une récente étude comparative du génome d'aborigènes australiens et de populations indiennes, sud-asiatiques et guinéennes.

Selon le scénario prévalent parmi les généticiens des populations, les premiers hommes ont foulé le sol australien il y a au moins 45 000 ans. Partis d'Afrique du Sud, ils ont, en suivant la côte le long de la péninsule Arabique et de l'Inde, gagné le Sahul – le bloc continental qui rassemble l'Australie et la Nouvelle-Guinée. Puis de nouvelles arrivées ont brassé les gènes des populations installées sur les côtes de la Nouvelle-Guinée. Ces échanges se sont-ils propagés jusqu'en Australie ? La question fait toujours débat aujourd'hui. Malgré quelques études suggérant que des gènes humains ont circulé de l'Inde vers l'Australie durant l'Holocène (les 12 000 dernières années), les généticiens pensent en général que l'Australie est restée isolée jusqu'à l'arrivée des Européens, au XVIII^{e} siècle. La nouvelle étude suggère le contraire.

Irina Pugach, de l'Institut Max Planck pour l'anthropologie évolutionnaire de Leipzig, et ses collègues ont analysé les différences entre les génomes entiers de 344 individus : des aborigènes du Nord de l'Australie et des Indiens, mais aussi diverses populations d'Asie du Sud. Ils ont ainsi confirmé que les populations d'Australie et de Nouvelle-Guinée ont divergé il y a 36 000 ans. Un résultat qui corrobore l'idée que ces peuples descendent d'une même migration ancienne en provenance d'Afrique *via* l'Asie du Sud.

Mais les généticiens ont aussi détecté la signature d'un transfert d'environ 11 pour cent de gènes de l'Inde vers l'Australie. Absente de l'archipel guinéen, cette signature serait postérieure à la première migration qui a peuplé l'Australie ; et sa répartition parmi la population aborigène de l'Australie du Nord est trop uniforme pour qu'elle ait pu se propager *via* la colonisation européenne tardive. À l'aide de simulations, les chercheurs estiment qu'elle remonte à 141 générations, soit il y a environ 4 000 ans. Ils doivent à présent étendre leurs recherches à toute l'Australie pour en savoir plus – une tâche compliquée par la réticence des aborigènes à fournir leur ADN.

→ M.-N. C.

I. Pugach et al., PNAS, en ligne le 14 janvier 2013



© Gi_no Amelin, Suisse/shutterstock.com

Une aborigène de Cairns, dans le Queensland au Nord de l'Australie.

Archéologie

La très ancienne charpenterie européenne

Comment débiter un tronc d'arbre sans scie ? En le brûlant. Du moins était-ce l'une des techniques utilisées par les charpentiers du début du Néolithique européen. La datation de coffrages en bois de quatre puits de l'Est de Allemagne, achevée par Willy Tegel, de l'Université de Fribourg, et des collègues, prouve qu'en Europe, le travail du bois est aussi ancien que celui de la terre.

Les chercheurs ont daté par dendrochronologie 151 planches de chêne utilisées dans la construction des coffrages. Les résultats indiquent que les puits ont été construits entre –5190 et –5098, en plein Rubané, la période de la conquête de l'Europe septentrionale par les paysans. Or les modes de construction de ces puits révèlent une véritable charpenterie : après avoir abattu des arbres à la hache de pierre, les hommes de cette culture les ont débités en planches à l'aide de coins et de masses de bois, d'herminettes de pierre, voire de charbons ardents. Puis ils ont assemblé des planches en y taillant des encoches, ou à l'aide de tenons et de mortaises.

Des processus aussi techniques suggèrent que les puits ont été coffrés par des artisans habiles et spécialisés. Cette information bat en brèche l'idée ancienne selon laquelle la véritable charpenterie n'était pas apparue avant l'âge des métaux, l'emploi de haches métalliques ayant été jugé indispensable pour travailler le bois dans sa masse.

→ F. S.

PLoS ONE, vol. 7, e51374, 2012



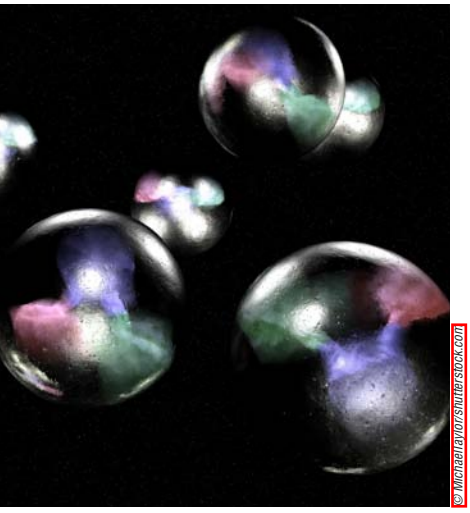
M. Tegel et al., PLoS ONE, 2012

L'un des coffrages de puits qui a été assemblé, tel une cabane en rondins, à l'aide d'encoches.

Plus de 700 : c'est le nombre d'espèces de bactéries contenues dans le lait maternel. Moins en cas de surpoids de la mère ou de césarienne...*

Physique

Un problème de taille pour le proton



© Michaeljaviorshutterstock.com

Quelle est la taille du proton, particule formée de trois quarks ? On la définit comme le rayon moyen de la répartition spatiale de charge électrique. Mais les mesures donnent deux résultats divergents.

Le proton, l'une des particules les plus communes dans l'Univers, est un constituant du noyau atomique. Sa taille intrigue les physiciens. Plusieurs expériences indiquaient un rayon d'environ 0,88 femtomètre (c'est-à-dire $0{,}88 \times 10^{-15}$ mètre). Cependant, Randolf Pohl, de l'Institut Max Planck d'optique quantique à Garching, en Allemagne, et ses collègues de la collaboration internationale à laquelle participe le Laboratoire Kastler Brossel (ENS-Paris/UPMC/CNRS) ont conçu une expérience qui donne une valeur de 0,84 femtomètre. Annoncée une première fois en 2010, cette valeur est aujourd'hui confirmée par l'analyse de données supplémentaires. Ces résultats divergents sont un enjeu pour les calculs théoriques, qu'ils entachent d'une incertitude importante.

Dans l'atome d'hydrogène, système formé d'un proton lié à un électron, la taille du proton joue sur son interaction électromagnétique avec l'électron. La charge électrique du proton étant répartie dans l'espace, son interaction avec l'électron (une particule ponctuelle, jusqu'à nouvel ordre) s'en ressent et dépend du rayon moyen de la distribution de charge du proton.

Comment mesurer ce rayon ? L'une des approches est l'analyse spectroscopique : on mesure l'écart d'énergie entre deux niveaux excités particuliers de l'électron. Cela permet d'estimer le rayon du proton, qui intervient dans le calcul théorique de cette énergie. La valeur obtenue ainsi est de 0,88 femtomètre.

R. Pohl et ses collègues ont procédé de façon similaire, mais en remplaçant l'électron de l'atome par un muon. Cette particule a les mêmes propriétés, mais est 207 fois plus massive et de ce fait évolue dans une région plus proche du centre du proton. L'écart d'énergie entre niveaux excités est alors davantage sensible au rayon de charge du proton, et l'expérience a donné pour valeur environ 0,84 femtomètre. Les deux valeurs du rayon ne sont pas compatibles, mais aucune faille, expérimentale ou théorique, n'a été identifiée. L'existence d'une interaction proton-muon inconnue jusqu'ici expliquerait-elle ce résultat contradictoire ? C'est peu probable, car dans ce cas d'autres expériences très précises auraient dû la mettre en évidence. L'atome d'hydrogène semble garder encore quelques secrets.

→ S. B.

A. Antognini et al., Science, vol. 339, pp. 417-420, 2013

F.S. Cabrera-Kubiz et al., American Journal of Clinical Nutrition, vol. 96(3), pp. 544-551, 2012

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Astronomie

Ciel nuageux sur naine brune

Esther Buenzli, de l'Université de l'Arizona, et ses collègues ont utilisé simultanément les télescopes spatiaux *Hubble* et *Spitzer* pour sonder à différentes profondeurs l'atmosphère de la naine brune 2MASSJ22282829-431026. Ces astrophysiciens ont obtenu les premiers indices d'une structure atmosphérique en couches, probablement formées de nuages de compositions chimiques différentes.

Les naines brunes sont des astres trop peu massifs pour amorcer la fusion nucléaire de l'hydrogène. Néanmoins, elles ont emmagasiné de l'énergie pendant leur formation, énergie qui leur assure une température de plusieurs centaines de degrés. Ainsi, ces astres rayonnent dans l'infrarouge, gamme du spectre électromagnétique à laquelle sont sensibles les instruments de *Hubble* et *Spitzer*. C'est l'étude de la luminosité de l'astre dans ce domaine spectral qui a permis d'établir que l'atmosphère n'est pas homogène, mais structurée verticalement en couches nuageuses distinctes.

→ S. B.

E. Buenzli et al., The Astrophysical Journal Letters, vol. 760, L31, 2013



Les télescopes spatiaux *Hubble* et *Spitzer* ont sondé l'atmosphère de la naine brune 2MASSJ22282829-431026 *(ici une vue d'artiste)*.

universcience présente

Palais découverte

les conférences

mercredi 20 mars à 19h

Palais de la découverte

entrée libre

Salut les aliens !

Chaque jour, les astronomes découvrent des nouvelles planètes autour d'étoiles lointaines. Certaines abritent peut-être la vie. Quelle tête peuvent bien avoir leurs habitants ? À vous de l'imaginer sans complexe.

Avec les auteurs de la rubrique « Science & Fiction » de la revue *Pour la science* : Roland Lehoucq et Sébastien Steyer.

Avec le soutien de

Pour la Science · Science & Vie · France Culture · plus

programme complet sur www.universcience.fr

Géophysique

Du magma encore plus profond

À cause de la chaleur interne de la Terre, le manteau solide et visqueux subit des mouvements convectifs entre le noyau et la croûte. En remontant des profondeurs, une partie des roches fond lorsque les conditions de température et de pression le permettent. Mais à quelle profondeur peut fondre le matériau mantellique ? Les géologues ont longtemps pensé que la zone de fusion partielle du manteau démarre entre 70 et 85 kilomètres de profondeur sous les dorsales océaniques. Cependant, certaines observations laissaient supposer l'apparition de roche fondue aux environs de 200 kilomètres. Rajdeep Dasgupta et son équipe de l'Université Rice, aux États-Unis, l'ont expérimentalement confirmé : la présence de dioxyde de carbone dans la roche permet à celle-ci de fondre dès 200 kilomètres de profondeur.

→ S. B.

R. Dasgupta et al., Nature, vol. 493, pp. 211-215, 2013

Neurobiologie

Petits et grands rêveurs

Les dormeurs se souviennent plus ou moins de leurs rêves au réveil. Jean-Baptiste Eichenlaub, de l'INSERM, et ses collègues l'ont expliqué par une différence de réactivité des circuits cérébraux de l'attention.

On pense qu'un rêve doit être rapidement suivi d'une phase d'éveil pour être mémorisé. Les neurobiologistes ont d'abord montré que les grands rêveurs se réveillent plus souvent, puis ils ont mesuré par électro-encéphalographie l'activité cérébrale de sujets endormis ou réveillés lorsqu'un son leur était présenté. Dans les deux cas, un type particulier d'activité cérébrale, associé à l'orientation involontaire de l'attention, était plus intense chez les grands rêveurs. Ces derniers seraient donc plus sensibles aux perturbations environnementales, d'où un sommeil plus léger et une meilleure mémorisation des rêves.

→ G. J.

J.-B. Eichenlaub et al., Cerebral Cortex, en ligne le 2 janvier 2013

Toxicologie

Pesticides contre amphibiens

Les amphibiens (grenouilles, tritons, salamandres, etc.) subissent un rapide déclin à l'échelle du monde entier. Les causes de ce déclin (maladies, changement climatique, pollution, disparition des habitats, etc.) sont encore débattues. Or une équipe germano-suisse a montré sur de jeunes grenouilles rousses *(Rana temporaria)* que l'exposition à des pesticides conduit à une forte mortalité, allant de 40 pour cent après sept jours à 100 pour cent après une heure, selon le produit testé.

Carsten Brühl et Annika Alscher, de l'Université de Coblence-Landau, en Allemagne, et leurs collègues ont étudié en laboratoire l'effet de sept produits pesticides (quatre fongicides, deux herbicides et un insecticide) sur des grenouilles rousses juvéniles (150 individus au total). Ils ont appliqué au sol humide de la cage de chaque grenouille une dose (quantité par unité de surface) de pesticide correspondant à 0,1, 1 ou 10 fois la dose maximale recommandée en contexte agricole.

Pour les fongicides *Headline* et *Captan Omya* administrés à la dose recommandée, la mortalité résultante des grenouilles était de 100 pour cent. Des niveaux importants de mortalité, allant de 40 à 60 pour cent, ont été obtenus avec les autres produits commerciaux testés à la même dose. Et les chercheurs ont aussi montré que les additifs du produit peuvent augmenter la toxicité...

→ M. M.

Scientific Reports, 24 janvier 2013



Un crapaud vert juvénile *(Bufo viridis)* dans un vignoble du Sud de l'Allemagne. L'impact des pesticides sur les amphibiens n'est actuellement pas pris en compte dans les procédures d'homologation.

DERNIÈRE minute...

BOISSONS *LIGHT*, RISQUE DE DIABÈTE
On savait que les boissons artificiellement sucrées (sodas) accroissent le risque de diabète dit de type 2, qui touche environ 2,7 millions de personnes en France. Une étude épidémiologique menée auprès de 66 118 femmes françaises a montré que les boissons *light* l'augmentent aussi, et ce encore plus que les sodas normaux : la différence atteint 59 pour cent pour 1,5 litre de boisson consommée par semaine ! Les édulcorants qui remplacent le sucre pourraient être en cause.

PROTONS ACCÉLÉRÉS PAR SUPERNOVA
Comment les protons du rayonnement cosmique acquièrent-ils leur haute énergie ? Pour une partie d'entre eux au moins, l'accélérateur est une explosion de supernova. C'est ce que confirme l'équipe du télescope spatial *Fermi*, qui a analysé les photons gamma provenant de deux supernovae. Les caractéristiques de ces photons indiquent qu'ils sont créés par la désintégration de pions, particules instables elles-mêmes produites par l'impact des protons – accélérés par les ondes de choc de la supernova – sur le gaz du milieu interstellaire.

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

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

FONDATION ÉCOLOGIE D'AVENIR

INSTITUT DE FRANCE

COLLOQUE

" ÉNERGIES RENOUVELABLES ET INTERMITTENCE: Quels défis ? Quelles solutions ? "

Sous la direction de **Pascal Colombani** et **Bernard Salha**



Informations, programme et inscription:
WWW.FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG

JEUDI 18 AVRIL 2013
15H-19H

La Maison du Barreau
2 rue de Harlay – 75001 PARIS

ENTRÉE GRATUITE FONDATIONECOLOGIEDAVENIR.ORG
Réservation obligatoire - Places limitées

POINT DE VUE

Rythmes scolaires : les recentrer sur l'enfant

L'aménagement du temps à l'école doit respecter les rythmes de l'enfant. L'idéal serait une semaine allégée de quatre jours et demi, avec cours le samedi matin.

François TESTU

Dans le débat récurrent sur les rythmes scolaires, les intérêts des adultes prennent vite le pas sur ceux des enfants. C'est ce qu'il faut éviter pour les nouveaux aménagements des temps scolaires, périscolaires et extrascolaires envisagés à la rentrée 2013 en France. Aujourd'hui, on en sait assez sur les rythmes de vie des enfants pour que les décisions prises soient fondées et adaptées à leurs besoins. La chronobiologie et la chronopsychologie aident à comprendre, d'une part, les rythmes de vie des jeunes et, d'autre part, les conséquences de tel ou tel aménagement sur le développement de l'enfant et sur les comportements des jeunes à l'école et en dehors.

Des études menées, il ressort que trois principaux rythmes doivent être respectés en priorité : le sommeil, les variations, au fil de la journée, de divers paramètres – indicateurs physiologiques, vigilance, activité intellectuelle, comportements – et les états de fatigue saisonniers. Parmi ces rythmes, le sommeil est le plus important. Du respect de sa durée, de sa qualité, de sa régularité au fil des nuits dépendent l'adaptation des comportements à la situation scolaire, mais aussi extrascolaire (vacances, congés) et périscolaire (temps avant et après la classe, pause de midi). Toutefois, veiller à ce que chaque enfant puisse dormir suffisamment n'est pas simple, les durées de sommeil variant beaucoup d'un individu à l'autre.

Les travaux de chronopsychologie scolaire en France et dans divers pays ont montré que les performances intellectuelles varient au cours de la journée. Indépendamment du pays d'origine et des modes de vie scolaire des enfants, deux moments sont reconnus comme difficiles : les débuts de matinée et d'après-midi. Examinons les résultats français. Pour la plupart des élèves de 6 à 11 ans, la vigilance et les performances psychotechniques progressent du début jusqu'à la fin de la matinée scolaire, baissent après le déjeuner, puis progressent à nouveau dans l'après-midi. Ce rythme classique est proche de celui de l'évolution, au fil de la journée, de la température corporelle – un indicateur important du métabolisme. Il permet d'évaluer l'adéquation entre les emplois du temps quotidiens et hebdomadaires des enfants et leurs rythmes biologiques.

Ce rythme se met progressivement en place jusqu'à l'adolescence. Plus l'élève est jeune (6 ans), plus longs et marqués sont les moments de moindres attention et résistance physique au cours de la journée, et moins nette est la reprise d'activité intellectuelle l'après-midi. Alors que l'activité intellectuelle reste faible l'après-midi en cours préparatoire (CP, 6-7 ans), les élèves du cours moyen 2 (CM2, 10-11 ans) obtiennent des résultats comparables à ceux du matin. Nous avons aussi montré que les fluctuations au cours de la journée évoluent entre la moyenne section de maternelle (4-5 ans) et le CM2. Rapides chez les tout-petits (plusieurs cycles par jour), elles ralentissent avec l'âge.

MODULER LES HORAIRES
et les durées de classe en fonction de l'âge.

Des recherches de terrain sur différents aménagements expérimentaux du temps scolaire, on tire en outre trois enseignements. Tout d'abord, les variations des performances intellectuelles dans la journée sont plus fortes chez les élèves qui ne maîtrisent pas la tâche. Des élèves de 10-11 ans qui apprennent à exécuter les mêmes problèmes en 15 jours, par exemple, ont des fluctuations de performances « classiques » en début d'apprentissage, lesquelles s'estompent en fin d'apprentissage, lorsque les procédures sont maîtrisées. Les apprentissages doivent donc être concentrés sur les moments de la journée les plus favorables à l'activité intellectuelle.

Ensuite, les activités éducatives périscolaires et extrascolaires contribuent à l'épanouissement des jeunes. Proposer à des enfants de zones d'éducation prioritaire des activités éducatives socioculturelles et sportives périscolaires et extrascolaires aux moments les moins propices aux apprentissages scolaires favorise leur développement physique et psychique, facilite leurs apprentissages et contribue à une meilleure intégration dans la cité.

Enfin et surtout, la semaine de quatre jours désynchronise le rythme de la journée et entraîne un affaiblissement de la vigilance, ainsi qu'une baisse des performances lorsqu'elle n'est pas accompagnée d'activités péri- et extrascolaires. En CP, des élèves travaillant quatre jours par semaine sont moins vigilants, ont plus de comportements scolaires inadaptés et dorment moins que des élèves travaillant aussi le samedi matin. De plus, en début de semaine, l'évolution de la vigilance dans la journée tend à s'inverser, signe d'une rupture de synchronisation entre l'emploi du temps de l'enfant et son propre rythme de vie. Alors que les enfants ayant cours le samedi matin ne ressentent ces effets perturbateurs que le lundi, ces derniers perdurent jusqu'au mardi midi avec la semaine de quatre jours.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Cette rupture semble d'autant plus nette que les activités extrascolaires sont pauvres ou inexistantes. En CM2, si l'accompagnement péri- et extrascolaire permet de limiter certains effets négatifs de la semaine de quatre jours, il n'empêche pas l'inversion du rythme de la journée en début de semaine.

Qui plus est, la semaine de quatre jours alourdit la journée scolaire, déjà beaucoup trop longue, et la demi-journée supplémentaire de congé accordée n'est pas profitable à tous les enfants. Faute d'encadrement familial et d'une politique socioculturelle accessible à tous, certains pâtissent de ce temps libéré.

Alors, comment réussir les nouveaux aménagements français ? Plusieurs priorités se dégagent. La plus importante est de respecter les rythmes biologique et psychologique des enfants en allégeant le temps scolaire sur la journée, notamment pour les plus jeunes : réserver les moments reconnus comme favorables à l'activité intellectuelle (milieu-fin de matinée et fin d'après-midi chez les 10-11 ans) pour les apprentissages et les activités demandant le plus d'attention et d'effort cognitif ; occuper les moments les moins favorables par des activités d'entretien, d'éveil, des contenus plus ludiques et socialisants ; moduler les horaires et les durées de classe en fonction de l'âge ; aménager des structures « sas » pour accueillir les élèves avant et après la classe, et durant le creux de vigilance d'après-déjeuner, où des activités non scolaires, tout aussi éducatives mais moins fatigantes, seraient encadrées par des animateurs.

Les rythmes hebdomadaire et annuel doivent aussi être adaptés : éviter la semaine de quatre jours ; préférer l'école le samedi matin au mercredi matin, afin de limiter la désynchronisation du début de semaine ; proposer des vacances scolaires de deux semaines (notamment en novembre et février, périodes reconnues comme difficiles) et des périodes de travail scolaire de sept semaines au plus.

Enfin, le réaménagement du temps scolaire impose une réflexion sur le rôle de l'école et la répartition des responsabilités éducatives entre enseignants, parents et responsables des mouvements associatifs. ■

François TESTU est professeur émérite de psychologie de l'Université François Rabelais de Tours.

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'obsolescence programmée est-elle une stratégie répandue ?

L'obsolescence programmée est une limitation volontaire de la durée de vie des produits. Elle ne semble pas fréquente aujourd'hui, mais d'autres formes d'obsolescence existent…

Alain GELDRON

Sortie en 1908, la *Ford T* était la première voiture de grande série. Elle a remporté un succès triomphal, avant que les ventes ne se ralentissent : solide et facile à réparer, le modèle était conçu pour durer et n'avait pas besoin d'être renouvelé souvent. L'entreprise aurait alors été en difficulté si elle n'avait pas diversifié sa production.

Ainsi, un produit qui durerait indéfiniment conduirait à une saturation du marché et ne serait pas viable économiquement pour une entreprise. Cette constatation a conduit différents analystes, tel l'Américain Bernard London en 1932, à promouvoir un modèle économico-industriel fondé sur le renouvellement prématuré des produits, avant leur usure. Ce renouvellement devait permettre de stimuler la croissance et de surmonter la grande crise économique de 1929. B. London est ainsi à l'origine de l'expression « obsolescence programmée ».

Aujourd'hui, cette expression est utilisée pour décrire des situations variées. En France, un rapport de l'Assemblée nationale et une étude de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), publiés en 2011 et 2012, font le point sur ce sujet. Qu'est-ce que l'obsolescence programmée et quelle est son importance réelle ?

Un produit est dit obsolescent lorsque son utilisateur le jette avant qu'il ne soit usé. Les raisons en sont multiples. Elles sont parfois esthétiques, dues à un changement de mode. Dans certains cas, le produit tombe en panne et est impossible à réparer, faute de pièces détachées ou parce qu'il n'est pas démontable. Il peut également ne plus être compatible avec certains équipements, tels des logiciels qui ne fonctionnent pas sur des ordinateurs trop anciens, ou ne plus correspondre aux nouvelles normes : le passage à la télévision numérique terrestre (TNT) a par exemple rendu caducs les téléviseurs à tubes cathodiques, qui auraient nécessité

un boîtier complémentaire pour fonctionner, mais que les usagers ont préféré échanger contre des téléviseurs à écran plat, arrivés peu avant sur le marché. De façon générale, le progrès technologique est un facteur d'obsolescence, car de nouveaux produits, plus performants ou dotés de fonctionnalités inédites, sont sans cesse mis en vente. Enfin, le produit peut subir une panne ou se bloquer de façon quasi systématique, alors qu'il devrait fonctionner plus longtemps.

C'est ce dernier cas que l'on qualifie d'obsolescence programmée, du moins quand il résulte d'une stratégie délibérée de l'entreprise : celle-ci limite alors la durée de vie de son produit dès sa conception pour augmenter son renouvellement. Quelques exemples emblématiques ont fait l'objet de grandes polémiques. À la fin des années 1920, s'est ainsi mis en place le cartel *Phœbus* regroupant les principaux fabricants d'ampoules à incandescence : ce cartel a été condamné par la commission antitrust britannique pour entente sur les prix et est également soupçonné d'avoir imposé une limitation à 1 000 heures de la durée de vie de ses ampoules. Autre exemple, dans les années 1940, l'entreprise *DuPont* aurait mis sur le marché des bas en nylon dont la résistance aurait été volontairement diminuée.

Ces exemples sont toutefois anciens et l'obsolescence programmée ne semble pas être la règle aujourd'hui. De nombreux témoignages d'utilisateurs font peser de sérieux soupçons sur quelques produits, telles des imprimantes qui tombent systématiquement en panne après un certain nombre d'impressions, mais ces cas restent rares et aucune stratégie des industriels pour limiter la durée de vie des produits n'a pu être prouvée.

Il est en effet difficile de démasquer une telle stratégie. L'industriel peut facilement attribuer le dysfonctionnement incriminé à une erreur de conception. Notons qu'une stratégie d'obsolescence programmée serait risquée pour un industriel qui ne serait pas en situation de monopole ou qui n'aurait pas conclu une entente avec ses concurrents. En effet, les consommateurs pourraient se détourner d'un produit moins résistant que d'autres. La durée de vie pour laquelle les produits sont conçus devrait être systématiquement communiquée aux usagers. Une réglementation européenne l'impose déjà pour les lampes à basse consommation.

Quoi qu'il en soit, pour atteindre un fonctionnement durable et répondre à la raréfaction des matières premières, on ne doit pas lutter seulement contre l'obsolescence programmée, mais aussi contre l'obsolescence en général. Or aujourd'hui, c'est l'inverse qui se produit dans les sociétés de consommation, avec une obsolescence qualifiée d'accélérée : le marketing et la publicité incitent les consommateurs à changer leurs équipements pour des seules raisons d'esthétique ou de fonctionnalités complémentaires, et les différents facteurs examinés précédemment font que l'obsolescence n'a jamais été aussi rapide. En outre, le souhait d'acheter le moins cher possible conduit souvent les consommateurs à acquérir des produits peu résistants.

UNE STRATÉGIE D'OBSOLESCENCE programmée serait risquée pour un industriel, les consommateurs pouvant se détourner d'un produit peu résistant.

Le problème concerne donc l'ensemble des acteurs économiques, et en particulier les consommateurs. Sa résolution nécessitera un changement global de notre modèle de société. Le nouveau modèle ne devra plus être fondé uniquement sur la croissance de la production industrielle, mais plutôt sur le concept d'économie circulaire : il s'agit d'optimiser l'usage des matériaux à tous les stades de la vie des produits, par le biais de l'écoconception, de la réparation, de la réutilisation de certains composants, du recyclage, etc. Un tel modèle encouragerait moins l'obsolescence. ■

Alain GELDRON dirige le Service Filières responsabilité élargie du producteur et recyclage, à l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).



Connectez-vous au service d'offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec naturejobs



- Chaque semaine, plus de **8000 offres d'emploi dans le secteur des sciences.**
- En un clic **la sélection des postes à pourvoir en France** et dans les pays francophones ou voisins.
- Une équipe Naturejobs spécialisée, **au service des recruteurs francophones.**

Contact : Muriel Lestringuez
E-mail : m.lestringuez@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA SCIENCE .fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

ANALYSE ET MISE EN FORME DES DONNÉES

NOUVELLE VERSION



ORIGIN® 9

Data Analysis and Graphing Software



- Une interface intuitive
- Une gestion souple des données
- Des graphiques de qualité publication
- Des outils de programmation

Disponible pour Windows.

www.ritme.com/fr/product/origin

RITME - Distributeur Officiel • 34, bd Haussmann • 75009 Paris • France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42 • Fax : +33 (0)1 42 46 00 33
info@ritme.com • www.ritme.com

Sauf indication contraire : logiciel et documentation en anglais, et livraison par téléchargement ou par CD-Rom.
© Copyright 2012 RITME. Origin est une marque déposée par OriginLab.
Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

Distributeur officiel en France

En vente chez votre marchand de journaux





Retrouvez DIPLOMATIE sur Internet

www.GEOSTRATEGIQUE.com

Et ne manquez pas en librairie dès le 27 février prochain !

ATLAS GÉOPOLITIQUE MONDIAL 2013

270 cartes et graphiques pour décrypter toute l'actualité internationale
(Éditions ARGOS/AREION - Diffusion PUF - 212 pages - 22,50 €)

AREION GROUP • 91 rue Saint-Honoré • 75001 Paris (France) • Tel. +33(0) 175 435 271 • Fax : +33 (0) 811 622 931 • E-mail : diplomatie@areion.fr

VRAI OU FAUX

Une température absolue peut-elle être négative ?

Oui. Mais cela ne signifie pas qu'elle passe par le zéro absolu en devenant négative.



© Shutterstock/ Yuriy Kosourov

Roger Balian

En physique, on utilise une échelle de température dite absolue, dont l'unité est le kelvin (K). Selon le troisième principe de la thermodynamique, énoncé par le physicien allemand Walther Nernst en 1906, le zéro absolu (0 K, soit –273,15 °C) ne peut être atteint. Ce principe traduit l'impossibilité de créer un ordre parfait dans un système donné. Les physiciens refroidissent aujourd'hui des atomes jusqu'à moins de un nanokelvin (10^{-9} K), mais ils ne peuvent parvenir au zéro absolu.

Pourtant, depuis un demi-siècle, certains manipulent couramment des températures absolues négatives, en particulier dans le domaine de l'imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire (IRM). Comment comprendre ce paradoxe apparent ?

Pour ce faire, examinons comment est définie la température absolue. On l'interprète communément comme une mesure de l'agitation thermique : elle serait alors toujours positive. Cependant, cette interprétation est trompeuse. Elle n'est valide que lorsque l'énergie du système se réduit à l'énergie cinétique de ses molécules. C'est le cas des gaz classiques, qu'étudiaient les physiciens du XIXe siècle.

Pour la thermodynamique moderne, la température absolue caractérise la façon dont l'entropie d'un système varie avec son énergie (elle est égale à l'inverse de la dérivée de l'entropie par rapport à l'énergie). L'entropie est une grandeur qui mesure le désordre du système – plus précisément le nombre de configurations microscopiques compatibles avec les contraintes macroscopiques (énergie, volume, etc.). On montre qu'à l'équilibre thermodynamique, deux systèmes en contact ont la même température. Et dans le cas d'un gaz classique, on retrouve l'interprétation de la température en termes d'agitation.

Dans les systèmes usuels, l'entropie augmente toujours avec l'énergie, d'où une température absolue positive. Ce n'est pas le cas dans d'autres systèmes, tels ceux de spins nucléaires (moments magnétiques portés par les noyaux atomiques) soumis à un champ magnétique, comme nous allons l'expliquer. On utilise de tels systèmes en IRM, où les spins des noyaux d'hydrogène d'un organe placé dans deux champs magnétiques (l'un constant, l'autre variable) créent un signal qui permet de visualiser cet organe.

Deux températures distinctes

Dans le matériau renfermant les spins, l'énergie se répartit en une énergie de spin (résultant de l'interaction des spins avec le champ magnétique) et une énergie « de réseau » (comprenant les énergies cinétiques dues aux mouvements des atomes et les énergies de leurs interactions). Les spins sont si faiblement couplés avec les autres degrés de liberté du matériau qu'ils se comportent temporairement comme un système isolé. Dès lors, on a une température propre à ce système, dite de spin et distincte de la température de réseau.

Dans une assemblée de spins, l'énergie globale est minimale lorsque les spins sont tous dans le sens du champ. Elle augmente lorsqu'ils se retournent, ce qui fait d'abord croître l'entropie (le désordre). Mais à mesure que la majorité des spins se réorientent dans le sens inverse du champ, un ordre se rétablit tandis que l'énergie continue à croître : dès lors, l'entropie devient une fonction décroissante de l'énergie. La température absolue ayant le même signe que la dérivée de l'entropie par rapport à l'énergie, la température de spin est dans ce cas négative.

Notons que l'énergie du système de spins est plus élevée quand sa température est négative que quand elle est positive. De façon générale, un système de température négative cède de l'énergie à tout système de température positive. On ne peut donc pas considérer les températures négatives comme inférieures aux températures positives, ce qui explique que la température ne passe pas par le zéro absolu en devenant négative. Cette étrangeté mathématique résulte d'une définition malheureuse de la température au XIXe siècle. On aurait pu l'éviter en définissant la température comme l'inverse de la grandeur utilisée depuis cette époque.

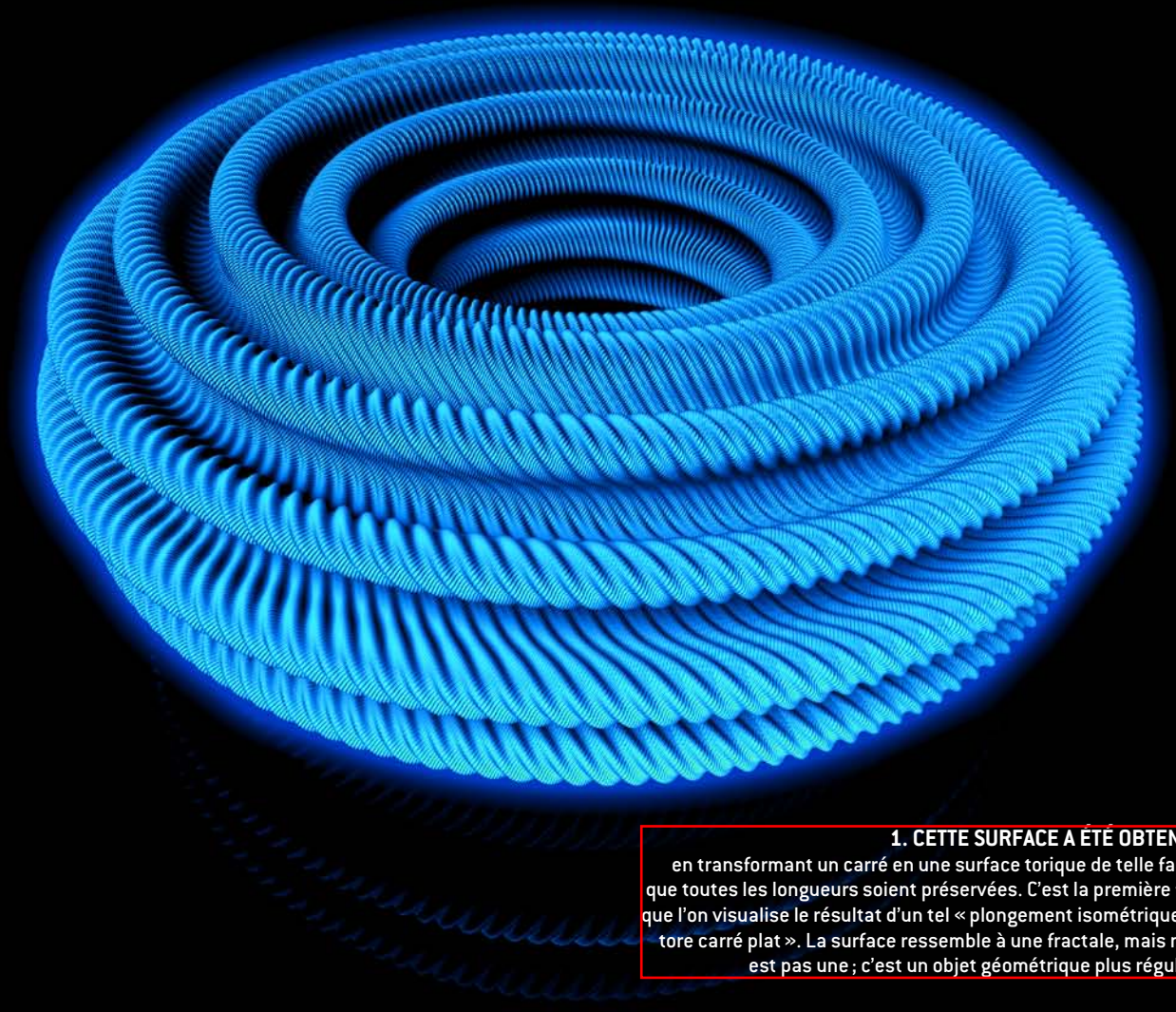
Ainsi, le zéro absolu reste impossible à atteindre. En outre, une température absolue négative ne peut pas subsister indéfiniment. Le système de spins n'étant pas parfaitement isolé, il échange de l'énergie avec les autres degrés de liberté et l'équilibre thermique global finalement atteint a une température positive. ■

Roger BALIAN, physicien, est membre de l'Académie des sciences.

Les fractales lisses

Vincent Borrelli, Francis Lazarus et Boris Thibert

Il est possible de transformer une portion de plan en une surface torique sans modifier les longueurs. Le résultat, visualisé pour la première fois, inaugure une nouvelle famille d'objets géométriques.



1. CETTE SURFACE A ÉTÉ OBTENUE en transformant un carré en une surface torique de telle façon que toutes les longueurs soient préservées. C'est la première fois que l'on visualise le résultat d'un tel « plongement isométrique du tore carré plat ». La surface ressemble à une fractale, mais n'en est pas une ; c'est un objet géométrique plus régulier.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

En 1961, Pearl Buck écrivit : « Toute chose est possible tant qu'elle ne s'est pas révélée impossible – et même en ce cas, elle ne l'est peut-être que provisoirement ». Elle aurait pu citer John Nash en exemple. Dans les années 1950, ce mathématicien américain et futur prix Nobel d'économie découvrit à la surprise générale qu'un problème géométrique réputé impossible, celui du « plongement isométrique », avait en réalité des solutions en abondance. En deux mots – nous y reviendrons –, un plongement isométrique est une transformation qui fait passer d'un plan à une surface courbe en conservant toutes les distances.

Quelques pages d'arguments mathématiques suffirent à J. Nash pour passer de l'impossible au possible, en détruisant au passage un certain nombre de certitudes et d'intuitions. Mais il y avait un détail. Si sa démonstration ne laissait aucune place au doute, en pratique elle défiait l'imagination et personne ne voyait ni ne comprenait vraiment ces plongements isométriques. Or, grâce à une approche combinant mathématiques et informatique, nous avons récemment réussi à visualiser un plongement isométrique à la Nash *(voir la figure 1)*. Le résultat est une surface d'un type inédit, que nous avons qualifiée de fractale lisse en raison de sa ressemblance avec les fractales.

Pour ce faire, nous avons mis en œuvre une théorie conçue par le mathématicien franco-russe Mikhaïl Gromov et nommée intégration convexe. Inspirée en partie des travaux de J. Nash, cette théorie constitue un outil puissant pour résoudre de nombreux problèmes mêlant géométrie et analyse. Son caractère abstrait semblait interdire toute application, mais nos travaux montrent sur un exemple qu'il n'en est rien. Cette théorie permet de résoudre de façon concrète certaines classes d'équations aux dérivées partielles (équations différentielles où les inconnues sont des fonctions de plusieurs variables).

L'origine du problème du plongement isométrique remonte aux années 1850, à l'époque où Bernhard Riemann révolutionne la géométrie. Ce mathématicien allemand propose en effet un changement radical de perspective. Plutôt que de considérer les surfaces comme des objets de l'espace tridimensionnel, Riemann préfère les conceptualiser en les réduisant à des portions de plan. Ainsi, un cylindre ne sera pas pensé comme un tube, mais comme un carré dont deux côtés opposés sont abstraitement identifiés. De même, une surface ayant la forme d'une bouée (un tore géométrique) sera conceptualisée comme un « tore carré », c'est-à-dire un carré dont les côtés opposés sont identifiés deux à deux *(voir la figure 2)*.

Cette vision simplifie la façon de penser les surfaces, mais elle semble entachée d'un défaut rédhibitoire pour qui s'intéresse à la géométrie, c'est-à-dire à la mesure des longueurs et des angles. Hormis de rares exceptions, les longueurs ne se correspondent pas entre les surfaces et leurs idéalisations sous forme de portions de plan. Ainsi, sur la bouée, l'équateur extérieur est plus long que l'équateur intérieur, alors que les courbes correspondantes sur le tore carré, qui sont deux horizontales, ont même longueur *(voir la figure 3)*.

L'ESSENTIEL

- En recollant ses côtés, un carré peut être courbé en une surface torique (une bouée). Si cette opération préserve les longueurs, on parle de « plongement isométrique du tore carré plat ».
- Ce plongement isométrique est possible à condition d'accepter des surfaces moins lisses que d'habitude.
- En appliquant la « théorie de l'intégration convexe », la surface obtenue par une telle transformation a été visualisée. Ni fractale ni surface ordinaire, elle constitue un nouveau type d'objet géométrique.

© Saul Mentor Contraire Les illustrations sont de Vincent Borrelli, Sabrina Francis Lazarus, Damien Rohmer et Boris Thibert

Pour Riemann, les surfaces sont des portions de plan

Riemann va corriger ce défaut en imaginant que la règle qui mesure les longueurs sur le tore carré se contracte ou se dilate selon la direction et l'endroit où on l'utilise. Il détermine précisément l'ampleur de ces variations pour que les longueurs mesurées coïncident avec celles directement observées sur la surface. Certes, c'est une façon inhabituelle de mesurer des distances, mais elle a pour avantage de coder toute la géométrie de la surface. L'outil mathématique permettant de réaliser ce codage, la règle fluctuante, porte depuis le nom de son inventeur, c'est la métrique riemannienne.

La démarche de Riemann permet de se désintéresser de la forme éventuellement très tourmentée des surfaces pour ne travailler qu'avec des domaines du plan munis de métriques riemanniennes. Elle suggère que l'objet essentiel n'est pas la surface, mais le couple formé par la portion de plan et sa métrique riemannienne. En fait, on peut totalement oublier les surfaces pour ne considérer que leur encodage sous forme d'une région du plan où les distances sont mesurées avec une règle fluctuante. Ce point de vue se révélera extraordinairement efficace. Il est en particulier à la base de la formulation mathématique de la théorie de la relativité générale.

Ainsi, pour Riemann, faire de la géométrie, c'est tout simplement opérer avec une



2. RÉALISATION D'UN CYLINDRE ET D'UNE SURFACE TORIQUE à partir d'un carré. Le cylindre s'obtient en recollant deux côtés opposés du carré ; la surface torique nécessite en plus de recoller les deux autres côtés. Le problème du plongement isométrique pour le « tore carré plat » est celui de trouver une façon d'effectuer tous ces recollements sans modifier les distances.

règle plus ou moins capricieuse. Toutefois, avec cette nouvelle approche, une question épineuse se pose : si l'on choisit arbitrairement une façon de faire varier la longueur de la règle sur une portion de plan, existe-t-il une surface qui réalise concrètement cette géométrie dans l'espace tridimensionnel ? Tel est le problème dit du plongement isométrique (rappelons que le terme isométrie désigne toute transformation qui conserve les distances ; les rotations ou translations globales en sont des exemples).

Cela revient à déterminer s'il y a équivalence entre les surfaces riemanniennes – des portions de plan munies d'une certaine métrique – et les surfaces au sens usuel. Comme on le verra, la réponse apportée par J. Nash est positive.

Du carré au tore en gardant les longueurs

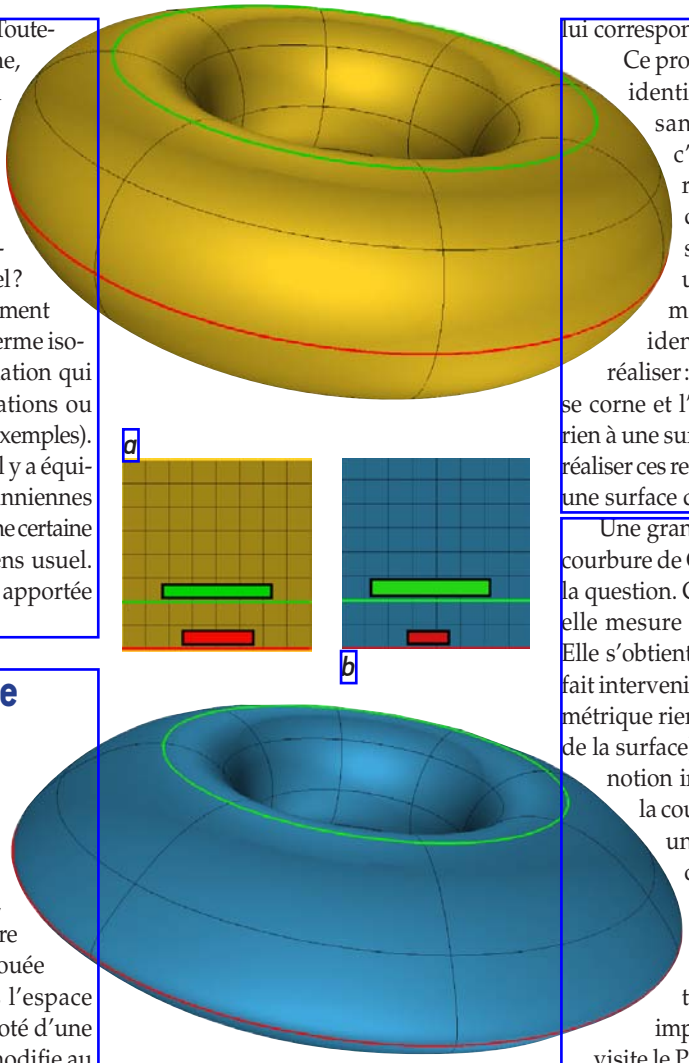
Le problème du plongement isométrique est d'une difficulté redoutable. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer le cas du tore carré. Nous avons vu que la bouée est la surface qui réalise dans l'espace tridimensionnel un tore carré doté d'une certaine règle, dont la taille se modifie au gré de la position. Or rien n'empêche de considérer ce même tore carré, mais avec d'autres règles, et de former ainsi d'autres objets géométriques abstraits. Parmi ces derniers, le plus simple est celui obtenu en choisissant une règle invariable ; cet objet est nommé « tore carré plat ».

La bouée ne pouvant alors correspondre à une réalisation de ce tore carré plat, le problème du plongement isométrique pour ce tore est précisément de savoir quelle est la surface de l'espace tridimensionnel qui lui correspond, si d'aventure elle existe.

Ce problème revient à effectuer les identifications du tore carré plat sans modifier les longueurs, c'est-à-dire à recoller matériellement les côtés opposés d'un carré pour obtenir une surface. Quelques essais avec une simple feuille de papier montrent à quel point ces identifications sont difficiles à réaliser : le papier se froisse, se plie, se corne et l'objet final ne ressemble en rien à une surface. Serait-il impossible de réaliser ces recollements de façon à obtenir une surface digne de ce nom ?

Une grandeur géométrique nommée courbure de Gauss permet de répondre à la question. Comme son nom le suggère, elle mesure la courbure d'une surface. Elle s'obtient au moyen d'un calcul (qui fait intervenir les dérivées secondes de la métrique riemannienne ou de l'équation de la surface) et recouvre peu ou prou la notion intuitive de courbure. Ainsi, la courbure de Gauss est nulle sur un plan ; elle l'est aussi sur un cylindre (que l'on peut dérouler parfaitement sur un plan) ; elle est presque imperceptible pour une sphère de la taille de notre planète, mais importante pour les planètes que visite le Petit Prince. Elle possède une propriété étonnante mise au jour au début du XIX^{e} siècle par Carl Friedrich Gauss : elle reste inchangée si l'on déforme la surface tout en préservant les distances.

La remarquable invariance de la courbure de Gauss est à l'origine du rôle central que joue cette dernière en géométrie, en particulier dans le problème du plongement isométrique. Qu'implique-t-elle dans le cas du tore carré plat ? La courbure de cet objet géométrique est nulle ; si l'on « plonge » le tore carré plat dans l'espace tridimensionnel



3. SUR LA SURFACE TORIQUE JAUNE, la courbe rouge est plus longue que la courbe verte. Cette surface peut être obtenue en joignant les côtés d'un carré où les longueurs sont mesurées avec une règle variable, l'horizontale rouge étant mesurée avec une unité de longueur plus courte que celle utilisée pour l'horizontale verte *(a)*. Un rétrécissement de la règle rouge dans le carré a pour effet d'augmenter la longueur de l'horizontale rouge sur la surface torique, ce qui modifie sa géométrie *(b)*. Existe-t-il une surface pour n'importe quel choix des règles sur le carré ? Tel est le problème du plongement isométrique.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

en formant une surface ressemblant à une bouée et si l'on respecte les distances lors de ce plongement, la surface résultante devra, elle aussi, être de courbure nulle. C'est une contrainte très forte. Or on démontre qu'on ne peut pas la satisfaire : sur une surface en forme de bouée, il y a toujours des endroits où la courbure est non nulle. Le problème du plongement isométrique pour le tore carré plat est donc impossible.

Pourtant, en 1954, J. Nash a surpris la communauté mathématique en révélant que cette impossibilité est relative, trompeuse et contournable. Il découvrit en effet que loin d'être impossibles, les plongements isométriques existent de façon pléthorique. Ses travaux ont été complétés un an après par le mathématicien hollandais Nicolaas Kuiper (1920-1994). Ce dernier s'est intéressé, entre autres, au cas du tore carré plat et a montré que l'on peut effectivement le réaliser d'une infinité de façons différentes dans l'espace euclidien tridimensionnel.

Comment expliquer l'existence de plongements isométriques du tore carré plat (et, plus généralement, de toutes sortes de surfaces riemanniennes) alors que, en s'appuyant sur la courbure de Gauss, on avait montré qu'ils étaient impossibles ? Il est nécessaire pour cela de s'intéresser à la régularité des surfaces. Une surface est certes un objet lisse, sans aspérité ni pincement, mais il y a plusieurs degrés dans cette « lissité ».

Une façon intuitive de comprendre ces degrés de lissité est de considérer des surfaces ressemblant à des pistes pour planches à roulettes. En première approximation, une telle surface s'obtient simplement en accolant en continuité un plan et une paroi courbée comme un cercle. Toutefois, un skateur qui dévalerait la pente la plus raide de cette surface ressentirait un choc au passage de la ligne de raccord *(voir la rubrique Idées de physique, page 90)*. Ce choc est dû à la discontinuité de la courbure : immédiatement après la portion circulaire, la courbure s'annule brutalement. Au contraire, dans une véritable piste de planches à roulettes, la courbure varie de façon continue, ce qui permet de dévaler la pente sans à-coup. Par conséquent, même si à l'œil les deux pistes présentent des formes comparables, la véritable piste est en réalité plus lisse que son ersatz en deux morceaux.

Le calcul différentiel permet de distinguer ces différences de lissité et de les classer. Le premier barreau de l'échelle s'appelle la régularité C^1 ; plus précisément, une fonction de plusieurs variables est dite de classe C^1 si ses dérivées premières existent et sont continues en chaque point. Le deuxième barreau est la classe C^2, qui correspond à l'existence et à la continuité des dérivées secondes (et *a fortiori* des dérivées premières). Et ainsi de suite, les fonctions les plus régulières de cette échelle étant celles de classe C^∞, qui sont infiniment dérivables.

En quoi ces raffinements dans la régularité des surfaces peuvent-ils élucider le paradoxe qui nous occupe ? L'impossibilité du plongement isométrique du tore plat n'a été démontrée qu'au prix d'un raisonnement faisant jouer un rôle central à la courbure de Gauss. Or celle-ci n'existe que si la surface est assez régulière : elle doit être de classe C^2 au moins. Si la surface n'est pas suffisamment lisse, si elle est de classe C^1 seulement, alors sa courbure n'est plus calculable et cette notion perd son sens. Par conséquent, tout raisonnement utilisant la courbure ne peut conduire qu'à des impossibilités relatives, ne concernant que des surfaces de classe C^2 ou plus. Aucun de ces raisonnements ne pourra interdire la possibilité de réaliser le tore carré plat au moyen d'une surface moins lisse, de classe C^1. Ainsi, avec la perte d'un seul degré de régularité, une frontière invisible est franchie et donne accès à un monde où la courbure de Gauss n'impose plus sa loi.

Un monde sans interdits

La disparition de la courbure de Gauss permet-elle pour autant la réalisation du tore carré plat ? *A priori*, mille autres obstacles pourraient – devraient – surgir et en interdire définitivement l'existence. La grande surprise du résultat de J. Nash, c'est précisément qu'aucun autre obstacle n'apparaît. L'effacement de la courbure ne signifie donc pas qu'elle cède sa place à d'autres formes de contrainte, mais bien qu'elle offre au mathématicien une totale liberté.

Pour mieux comprendre la surprise des mathématiciens, il faut avoir en tête la façon dont s'articule une démonstration en géométrie différentielle. Rappelons que cette branche des mathématiques met à profit le calcul différentiel (les dérivées, les intégrales) pour comprendre des objets tels que les courbes ou les surfaces. Une démonstration en géométrie différentielle

LES AUTEURS



Vincent BORRELLI est maître de conférences en mathématiques à l'Université Claude Bernard et membre de l'Institut Camille Jordan, à Lyon.



Francis LAZARUS, informaticien, est chargé de recherche au CNRS et membre du Laboratoire Gipsa-lab, à Grenoble.



Boris THIBERT est maître de conférences en mathématiques appliquées à l'Université Joseph Fourier et membre du Laboratoire Jean Kuntzmann, à Grenoble.

BIBLIOGRAPHIE

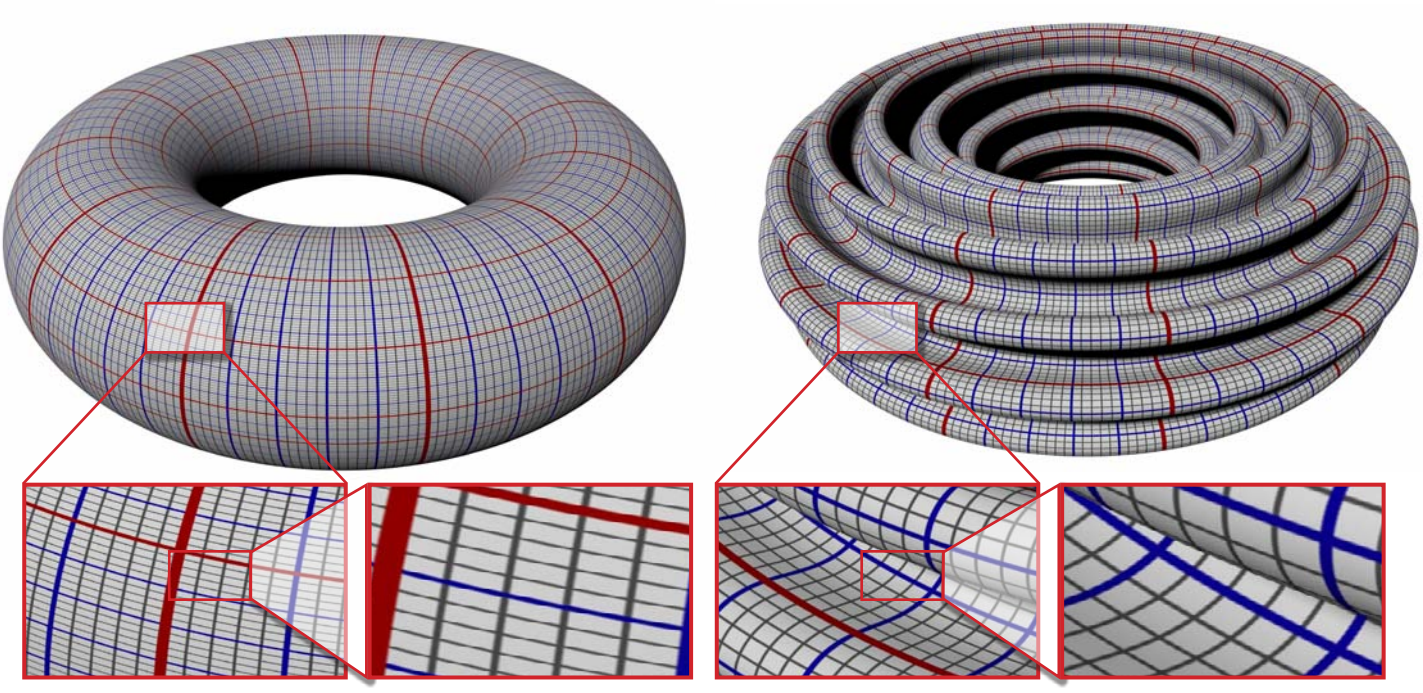
V. Borrelli *et al.*, **Flat tori in three-dimensional space and convex integration**, *PNAS*, vol. 109(19), pp. 7218-7223, 2012.

M. Audin et P. Pansu, **Le h-principe de Misha Gromov**, *Images des Mathématiques*, 25 juin 2009 : http://images.math.cnrs.fr/Le-h-principe-de-Misha-Gromov.html

V. Borrelli, **Gnash, un tore plat !**, *Images des Mathématiques*, 10 juin 2012 : http://images.math.cnrs.fr/Gnash-un-tore-plat.html

Equipe Hévéa, **Les tores plats visualisés !**, sur : http://math.univ-lyon1.fr/borrelli/Hevea/Presse/index.html

P. Pansu, **Rencontre avec Misha Gromov**, *Images des Mathématiques*, 1979 : http://images.math.cnrs.fr/Rencontre-avec-Misha-Gromov-1979.html



peut être comparée à un trajet joignant une ville de départ – les hypothèses du théorème – à une ville d'arrivée – les conclusions du théorème.

Deux sortes d'obstacles peuvent entraver le trajet : les contraintes physiques telles que les barrières ou les mers, et les interdictions légales telles que les sens interdits ou les frontières. Franchir les obstacles du premier type, c'est trouver une route allant du point de départ au point d'arrivée. L'existence d'une telle route est loin de garantir que l'on pourra effectivement joindre les deux villes, mais elle permet de se concentrer sur le second type d'obstacles : la présence ou non d'interdictions légales le long du parcours. En revanche, si aucune route ne joint les deux villes, alors la considération des sens interdits ou des frontières est sans objet, la partie est déjà perdue.

En général, trouver une route est une chose relativement aisée, un simple coup d'œil sur une carte suffit. Mais s'assurer que l'itinéraire choisi est libre de toute interdiction légale requiert plus d'attention. Une route, sélectionnée au hasard et débutant au centre de Paris pour finir au centre de Marseille, aura toutes les chances de rencontrer un grand nombre de sens interdits. La question dominante est donc celle de la possibilité légale.

Dans l'analogie avec une démonstration en géométrie différentielle, les sens interdits et les frontières correspondent aux obstacles théoriques rencontrés lorsqu'on applique le calcul différentiel. Ce calcul a ses lois, qui agissent comme un agent routier autorisant la circulation sur certaines voies et posant des panneaux de sens interdit sur d'autres. Il occupe souvent toute l'attention du mathématicien, qui peut alors oublier la présence d'un autre acteur moins visible : la topologie. Ce domaine des mathématiques consiste à étudier les propriétés qui résistent aux déformations continues. Par exemple, si l'on déforme un disque sur lequel on a dessiné une route joignant deux points, cette route sera tordue par la déformation, mais elle ne se brisera pas. L'existence de la route joignant les deux points est donc une propriété topologique.

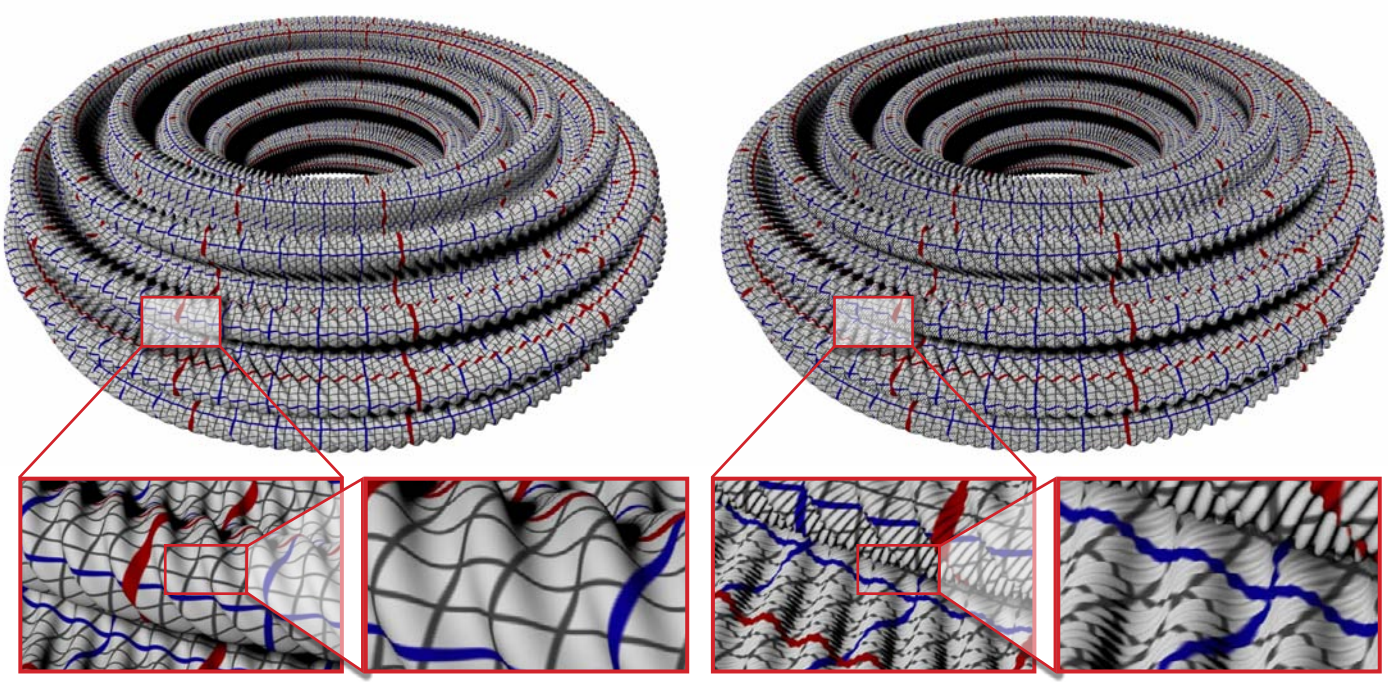
L'intégration convexe, théorie libératrice

Dans notre analogie, la topologie intervient en amont du calcul différentiel ; elle donne les outils et la théorie mathématiques nécessaires pour répondre à la question « Existe-t-il une route sans barrières allant de la ville de départ à la ville d'arrivée ? ». Dans le cas favorable où la réponse est positive, on repère ensuite, par le calcul différentiel, si la route envisagée comporte des sens interdits ou non. La résolution d'un problème de géométrie différentielle se divise donc en deux temps *(voir l'encadré page ci-contre)*. Le premier consiste à répondre à la question topologique de l'existence d'une route, et le second à vérifier avec le calcul différentiel que cette route ne comporte pas d'obstacles légaux. Ce second temps est souvent plus ardu que le premier.

La résolution du problème des plongements isométriques est un exemple emblématique d'application de la démarche en deux temps que l'on vient d'exposer. Le premier temps consiste à omettre l'aspect différentiel du problème, à savoir la préservation des distances, pour ne s'intéresser qu'à son aspect topologique. Dans le cas du tore carré plat, la résolution de la question topologique est une chose aisée. Quitte à déformer le carré initial, on peut facilement concrétiser les identifications et obtenir une surface qui a la forme d'une bouée *(voir la figure 2)*. Le passage du tore carré plat à la surface-bouée correspond à la route dépourvue de barrières évoquée plus haut.

Il faut ensuite s'attacher au second temps de la résolution du problème, celui où l'on se focalise sur la question géométrique – ici la conservation des longueurs. Pour les surfaces de classe C^2, un panneau de sens interdit, dû à la courbure de Gauss, apparaît immédiatement. Cette courbure, qui se détermine au moyen d'un calcul différentiel, doit en effet être partout nulle. Or cette contrainte est trop forte : comme nous l'avons déjà indiqué, toute surface représentant un tore dans l'espace à trois dimensions comporte des zones où la courbure n'est pas nulle. En revanche, pour les surfaces de classe C^1, ce panneau de sens interdit disparaît. Ce qui a tant déconcerté les mathématiciens, c'est qu'aucun autre panneau d'interdiction ne soit apparu.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013



4. LE MAILLAGE VISIBLE SUR LA SURFACE provient d'un quadrillage régulier du tore carré plat. Deux agrandissements permettent de constater les distorsions des longueurs verticales et horizontales dues aux identifications des côtés du carré initial. Avec l'accumulation infinie des distorsions *(ici trois étapes dans la création de ces « corrugations » sont représentées)*, le maillage subit des ondulations à toutes les échelles, mais, à la fin, les longueurs de toutes les mailles sont identiques. Le plongement est devenu isométrique.

Dans les années 1970-1980, M. Gromov a découvert que la situation rencontrée dans le problème des plongements isométriques de J. Nash est en fait étonnamment fréquente : pour une très vaste famille de questions en géométrie différentielle, celles vérifiant une propriété technique nommée h-principe ou principe homotopique, il n'y a pas de sens interdits, quelle que soit la route choisie pour aller d'une ville à l'autre. Pour elles, le second temps des démonstrations est inutile ; les contraintes dues au calcul différentiel s'évanouissent comme par enchantement et seule reste la contrainte topologique.

J. Nash, en cherchant à contourner ces interdits, et en y parvenant, a révélé à tous leur caractère fictif. Plus important encore, la façon dont il s'en est affranchi est à l'origine d'une théorie permettant de détecter des situations où un h-principe est présent : la théorie de l'intégration convexe, découverte et mise au point par M. Gromov bien après les travaux de J. Nash et Kuiper.

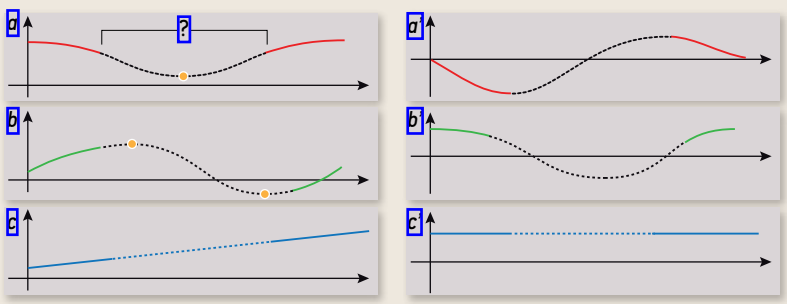
L'idée fondamentale de cette théorie, qui donne beaucoup de liberté aux spécialistes de la géométrie différentielle, est la suivante : si le chemin direct menant au résultat que l'on souhaite atteindre est impraticable, il faut alors inventer une nouvelle voie

Obstruction topologique et obstruction différentielle

En géométrie différentielle (partie des mathématiques où l'on applique le calcul différentiel et intégral pour étudier courbes, surfaces, etc.), la résolution des problèmes nécessite généralement deux étapes. La première consiste à franchir des obstacles de nature topologique, la seconde des obstacles imposés par les lois du calcul différentiel.

En voici un exemple simple, qui consiste à se demander s'il est possible de compléter les portions de graphe *(a)*, *(b)* et *(c)* de façon à éviter l'apparition de points où la tangente est horizontale *(en jaune)*. Remarquons d'abord qu'en un tel point, la fonction dérivée est nulle : le graphe de la dérivée coupe donc l'axe horizontal. Par conséquent, pour que la question posée ait une chance d'avoir une réponse positive, il faut déjà être capable de compléter les portions *(a')*, *(b')* et *(c')* des graphes des fonctions dérivées sans passer par l'axe horizontal. C'est le premier temps de la résolution d'un problème de géométrie différentielle, celui de la topologie.

On ne peut prolonger la courbe *(a')* sans couper l'axe ; on en déduit qu'il est impossible d'éviter la création d'une tangente horizontale pour la courbe *(a)*. En revanche, on peut prolonger les portions *(b')* et *(c')*. Pour ces deux cas, il est nécessaire de passer au second temps, celui du calcul différentiel. Pour la courbe *(b)*, on montre qu'il apparaît alors un panneau de sens interdit (le théorème de Rolle) ; il sera donc impossible de la continuer sans créer une tangente horizontale. Enfin, pour la courbe *(c)*, la voie est libre, le prolongement sans tangente horizontale est possible.



composée d'un très grand nombre de petits contournements du chemin direct. Ces contournements ont pour effet de diluer la difficulté du parcours et rendent ainsi le nouveau chemin praticable.

Un exemple très simple de problème « impossible » résolu par cette stratégie est la conception d'une route joignant les extrémités d'un segment vertical, mais dont la pente soit très faible afin qu'un véhicule puisse l'emprunter. Pour des questions de place, on exige également que cette route ne s'éloigne pas trop du segment vertical, par exemple qu'elle soit contenue dans un tube relativement petit entourant le segment.

Un premier raisonnement fait apparaître un interdit imaginaire : si la pente est presque horizontale, la route s'élève très doucement et devrait être hors du petit tube quand elle atteindra l'altitude de l'extrémité supérieure. Or cet interdit se contourne facilement et la solution est effectivement mise en pratique dans la vie quotidienne : c'est la rampe d'accès à un parking à étages ! Même si la pente est très faible, l'effet du parcours de chaque boucle est un pur déplacement vertical. Les boucles imposées à la route permettent donc de réaliser la même élévation verticale que le chemin direct, le segment, tout en offrant un parcours « praticable ».

Un effet de moyenne

D'un point de vue mathématique, le problème « impossible » que résout la rampe d'accès est de nature différentielle. En effet, l'une des deux contraintes porte sur une pente, qui se calcule au moyen d'une dérivée. Pour un tel problème, l'intégration convexe construit une solution – ici, une courbe en hélice – qui respecte également la seconde contrainte, celle de rester à l'intérieur d'un tube.

Pour ce faire, la théorie profite ingénieusement des effets de moyenne. Chaque fois que l'on parcourt une boucle sur l'hélice, l'extrémité du vecteur dérivé (un vecteur tangent à la courbe), translaté en l'origine, décrit un cercle horizontal de faible altitude. La moyenne sur une boucle du vecteur dérivé est donc un vecteur vertical de faible amplitude. Par conséquent, l'hélice, que l'on peut obtenir par intégration de son propre vecteur dérivé, reste proche d'un segment, lui-même obtenu en intégrant le vecteur vertical. L'hélice se retrouve ainsi contenue dans un tube dont l'axe est le segment. Cet effet de moyenne constitue le cœur de la théorie. Or déterminer une moyenne revient à réaliser une intégration. Et le résultat de cette intégration se trouve nécessairement à l'intérieur de la courbe suivie par le vecteur dérivé, c'est-à-dire dans son enveloppe convexe. Ce qui explique pourquoi la théorie porte le nom d'intégration convexe.

La théorie de l'intégration convexe constitue pour la géométrie différentielle un outil puissant. Son application au « retournement de la sphère » en est une illustration. Depuis la fin des années 1950, on sait grâce aux travaux de l'Américain Stephen Smale qu'il est possible de déformer continûment et sans pincements une sphère, dont on a peint l'extérieur et l'intérieur de couleurs différentes, jusqu'à obtenir une nouvelle sphère dont les couleurs sont interchangées (dans cette opération, on accepte que la surface s'interpénètre). À ce résultat déjà étonnant, la théorie de l'intégration convexe a ajouté que le retournement peut être effectué isométriquement, c'est-à-dire en préservant toutes les longueurs au cours de la déformation !

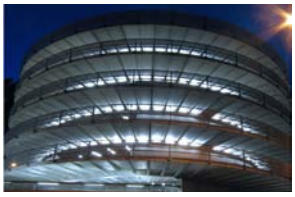
Avec l'invention de l'intégration convexe, la construction des plongements isométriques à la Nash devient subitement intelligible. Elle perd son caractère singulier pour apparaître comme un cas particulier d'une théorie plus vaste. Pourtant, si le procédé de construction s'éclaire, l'objet obtenu *in fine* garde sa part de mystère et continue à défier l'imagination par le caractère paradoxal de ses propriétés. Comment une surface peut-elle présenter une lissité sans faille et cependant réserver un champ d'à-coups à quiconque s'aviserait de la dévaler ? Quel peut être l'aspect d'un plongement isométrique du tore carré plat ?

En 2006, dans l'espoir de répondre à ces questions, nous trois et Saïd Jabrane, un doctorant en mathématiques, avons formé équipe, complétée en 2012 par Damien Rohmer, spécialiste de la synthèse d'images. Notre conviction était que l'on pouvait tirer profit du caractère algorithmique de l'intégration convexe – une propriété passée jusque-là inaperçue – pour concevoir un programme informatique visualisant un plongement isométrique du tore carré plat. Cette conviction était fondée, mais six ans ont été nécessaires pour visualiser un seul de ces fameux plongements...

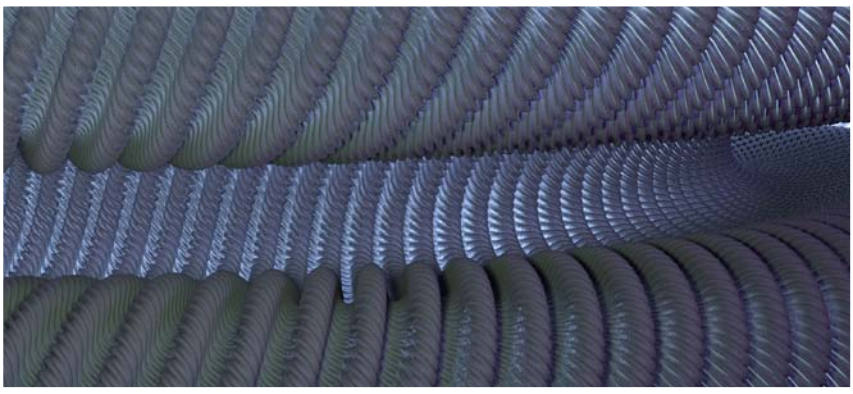
Le programme que nous avons réalisé débute avec une surface-bouée et la déforme progressivement au moyen d'une succession d'ondulations de plus en plus fines. La bouée initiale est choisie suffisamment petite

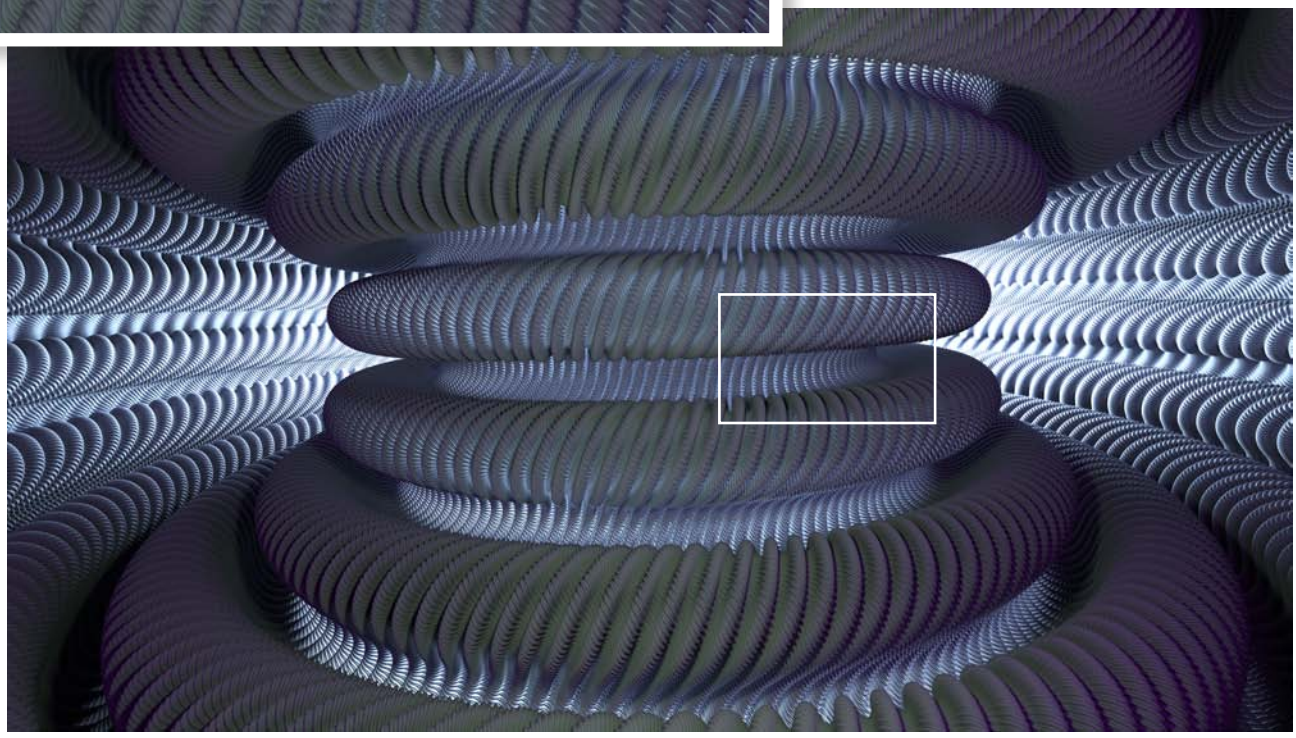
Contournements

La théorie de l'intégration convexe offre en géométrie différentielle une façon d'atteindre un résultat *a priori* inaccessible au moyen d'un grand nombre de petits contournements. Dans l'exemple de la rampe d'accès à un parking à étages, les contournements prennent la forme de boucles. Ils permettent de joindre deux points situés sur une même verticale en suivant une trajectoire de pente très faible.



© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013





5. LE PLONGEMENT ISOMÉTRIQUE du tore carré plat dans l'espace euclidien à trois dimensions est possible, à condition de relâcher un peu les contraintes de régularité. On obtient ainsi une surface, ici vue de l'intérieur, qui a une infinité de corrugations de plus en plus petites, comme l'illustre l'agrandissement.

pour que toutes les longueurs mesurées à sa surface soient trop courtes par rapport à leurs analogues sur le tore carré plat. Par exemple, la longueur des latitudes sur la bouée est plus courte que celle des horizontales correspondantes sur le tore carré plat.

Des corrugations à toutes les échelles

Pour corriger ce défaut, le programme crée des ondulations le long des latitudes qui accroissent leur longueur. Ces ondulations, nommées corrugations, sont les « petits contournements » qui témoignent de l'usage de l'intégration convexe. Elles sont appliquées dans différentes directions afin d'augmenter toutes les longueurs. Au cours du procédé, l'amplitude des corrugations diminue, tandis que leur fréquence augmente *(voir la figure 4)*. Le tout est précisément calculé pour réduire continuellement le défaut isométrique et obtenir à la limite un plongement isométrique. Bien sûr, le programme ne peut effectuer qu'un nombre fini de tâches et, dans la pratique, il suffit de l'arrêter après quatre étapes pour que le résultat visuel soit satisfaisant.

L'image obtenue est surprenante *(voir les figures 1 et 5)* : elle révèle une surface qui ressemble à s'y méprendre à une fractale, c'est-à-dire à un objet infiniment fracturé quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe. Toutefois, cette ressemblance n'est pas totale. En effet, le plongement isométrique est infiniment ondulé plutôt qu'infiniment fracturé. Où que se pose le regard, aucune brisure ou arête n'apparaît ; les fractures ont été remplacées par des corrugations. L'objet obtenu n'est donc pas tout à fait une fractale, ni une surface au sens ordinaire. Situé à la frontière entre les deux, il permet de résoudre le paradoxe posé par les surfaces de Nash-Kuiper en conciliant lissité et rugosité. Nous l'avons qualifié de fractale C^1, ou fractale lisse.

Après le tore carré plat, nous pouvons dorénavant espérer visualiser les plongements isométriques dans l'espace tridimensionnel d'autres surfaces riemanniennes. On pense notamment au « disque de Poincaré », un exemple célèbre de géométrie non euclidienne sur le plan. De telles visualisations feront sans doute apparaître des structures analogues à celle obtenue avec le tore carré plat, c'est-à-dire des fractales C^1.

Les fractales lisses, chaînon manquant entre les fractales et les surfaces ordinaires, vont probablement surgir dans d'autres questions mathématiques. Ces structures joueront-elles également un rôle en physique, en chimie ou dans les sciences du vivant ? Il est fort probable que certaines des structures fractales déjà observées dans le monde physique sont en réalité des fractales C^1... et que l'on en découvrira d'autres. ■

Le plus étrange des oiseaux

Ewan Forduce et Daniel Ksepka



L'ESSENTIEL

- Les manchots ne peuvent voler, mais ils sont d'excellents nageurs et plongeurs. On cherche à savoir comment ils ont développé de telles caractéristiques et comment certains se sont adaptés aux froids extrêmes.
- Des fossiles récemment découverts permettent de reconstituer leur évolution, révélant que certains traits se sont développés sous un climat chaud.
- Bien qu'ils aient survécu à 60 millions d'années de changements climatiques, les manchots risquent de succomber au réchauffement actuel.

Novembre en Antarctique. La débâcle estivale de la banquise a commencé. Bientôt les manchots empereurs iront pêcher. Ils passeront l'été à glisser dans l'océan Austral glacial, plongeant à des profondeurs de plus de 300 mètres à la recherche de poissons, de calmars et de krill pour se gaver avant d'entreprendre leur longue et pénible migration hivernale vers les terres où ils se reproduiront. Pour se reposer ou lorsque vient le temps de regagner leur colonie, ils se lancent hors de l'eau pour revenir sur la glace. Ce bref moment entre la mer et la glace est le seul instant où les manchots ressentent ce qui va de soi pour la plupart des oiseaux : être en suspension dans l'air.

L'étonnante adaptation des manchots à des conditions extrêmes est le fruit d'une lente évolution, qui se déroule depuis plus de 60 millions d'années.

De fait, les manchots empereurs et les autres manchots sont des oiseaux bizarres. Comme tous les oiseaux, ils ont des plumes, des ailes et un bec, et ils pondent des œufs. Mais une série de caractéristiques les distinguent de leurs compagnons à plumes. Au fil de l'évolution, leurs ailes se sont transformées en nageoires. Leur « smoking » les camoufle des prédateurs : lorsqu'ils nagent, leur dos noir vu de dessus se confond avec le fond de la mer, et leur ventre blanc, vu de dessous, se confond avec la surface. Leurs os très denses facilitent le plongeon en fournissant du lest ; leurs pattes, courtes et épaisses, dirigent leur corps sous l'eau et leur confèrent ce dandinement amusant lorsqu'ils marchent sur terre. Grâce à ces caractéristiques et à d'autres, les manchots sont des maîtres du monde marin, et certains de leurs représentants – dont les manchots empereurs – ont conquis l'un des environnements les plus extrêmes de la planète.

Depuis longtemps, les paléontologues s'interrogent sur l'origine de ces oiseaux et sur la façon dont ils se sont répandus dans tout l'hémisphère Sud. Les découvertes de fossiles faites au cours de la dernière décennie nous ont aidés à reconstituer l'évolution des manchots. Il s'avère que nombre de leurs spécificités sont apparues dans des conditions bien plus douces que les grands froids auxquels on associe les manchots. Cette histoire évolutive suggère que les chances des manchots de survivre face au réchauffement climatique actuel sont minces. La biologie et la répartition géographique de ces oiseaux traduisent une interaction complexe de la dérive des continents, du changement climatique et de la sélection naturelle au cours de dizaines de millions d'années – ce qui rend les manchots vulnérables.

Les paléontologues connaissent des manchots fossiles depuis plus de 150 ans, mais les premiers restes découverts n'étaient que de petits fragments fournissant peu d'informations sur les oiseaux dont ils provenaient. Le tout premier fossile de manchot identifié était un os unique découvert dans le calcaire de Nouvelle-Zélande par un Maori. Ce fossile arriva dans les mains du paléontologue anglais Thomas Huxley (1825-1895). Huxley identifia ce reste comme l'astragale (un os du pied) d'un manchot disparu plus grand que le manchot empereur, la plus imposante des espèces actuelles avec une taille de près de un mètre et une masse de 40 kilogrammes. Il surnomma ce manchot fossile *Palaeeudyptes antarcticus*, qui signifie « ancien bon plongeur du Sud ». Dans les décennies suivantes, d'autres restes de manchots géants ont été mis au jour en Nouvelle-Zélande et au-delà. Mais, comme l'astragale identifié par Huxley, ils étaient tous fragmentaires et difficiles à interpréter.

Des fossiles vieux de 62 millions d'années

L'enregistrement fossile des manchots s'améliora à la fin des années 1970 lorsque l'un de nous (Ewan Fordyce) trouva par hasard un os de patte brisé, dépassant d'une falaise de grès près de Waimate au Sud de la Nouvelle-Zélande. En fracturant par petites touches la roche environnante, E. Fordyce découvrit d'autres os d'un grand manchot qui avait vécu il y a 27 millions d'années. Ce squelette partiel fournissait de nouveaux indices sur l'anatomie des anciens manchots, mais il était encore trop dégradé pour révéler leurs origines. Ce n'est que dans les années 1980

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

et 1990 que des fossiles exploitables furent découverts : plusieurs spécimens, retrouvés dans la région de Walpara en Nouvelle-Zélande, ont révélé les tout premiers stades connus à ce jour de l'évolution des manchots. Ces restes, qui datent de 62 à 58 millions d'années, suggèrent que les premiers manchots ressemblaient à des cormorans, avec leur long bec effilé et leurs ailes flexibles. Cependant, un examen plus approfondi révèle qu'ils présentaient des traits typiques des manchots. Par exemple, les os supérieurs de leurs ailes étaient plats et larges comme ceux des manchots actuels ; leur astragale était court et large, et leurs os, dans leur ensemble, étaient plus denses que ceux des oiseaux volants.

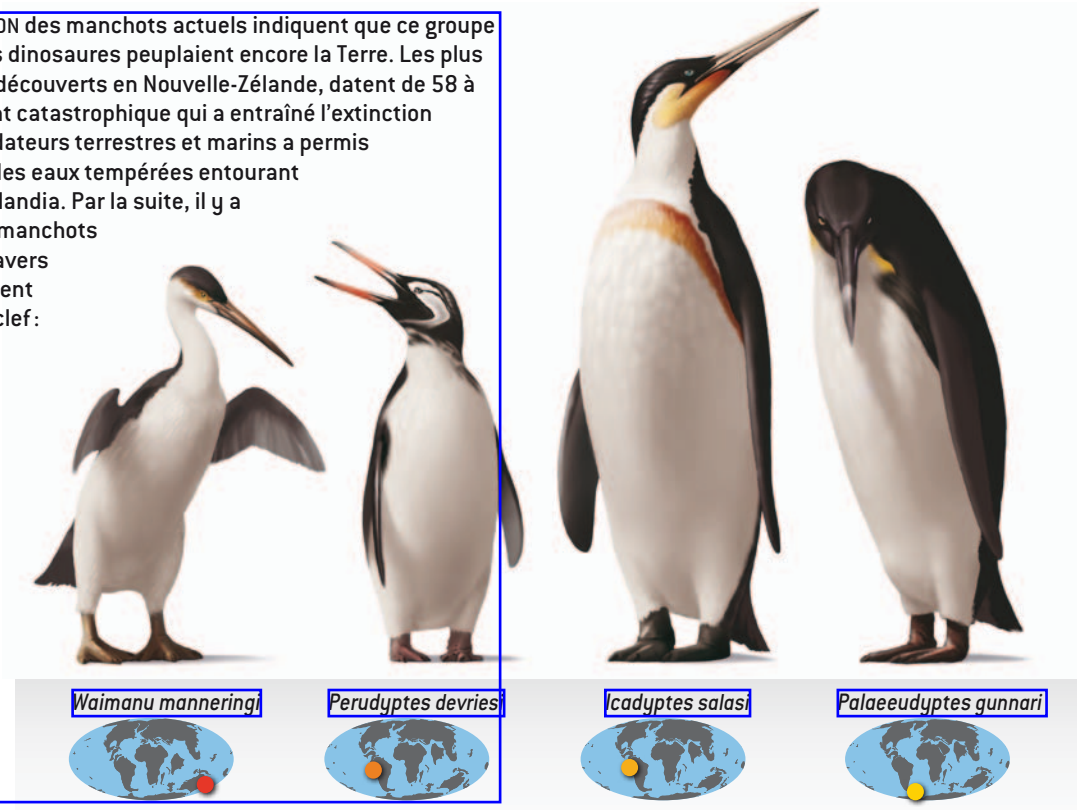
Après avoir analysé ces fossiles de protomanchots, E. Fordyce et ses collègues les classèrent dans deux espèces d'un nouveau genre, *Waimanu* (« oiseau d'eau » en maori). La plus grande de ces deux espèces, *Waimanu manneringi*, avait une taille approchant celle du manchot empereur, soit plus de 0,9 mètre, tandis que l'autre, *Waimanu tuatahi*, mesurait probablement environ 0,75 mètre, soit un peu plus que le manchot à œil jaune actuel. Aucune de ces espèces ne semble avoir été capable de voler – en revanche, toutes deux excellaient dans la propulsion sous l'eau.

Ces deux spécimens sont les manchots les plus anciens et les plus archaïques connus. Ils sont aussi parmi les plus anciens représentants des oiseaux actuels. Ces manchots ont vécu peu après l'événement catastrophique qui a mis fin au Crétacé, il y a 65 millions d'années, et qui a condamné les dinosaures et de nombreux autres animaux.

Selon certains experts, cet événement aurait éliminé presque tous les oiseaux, hormis une poignée de lignées. Un tel scénario impliquerait que la lignée des manchots et d'autres lignées d'oiseaux modernes ont évolué rapidement, dans les quelques millions d'années qui ont suivi l'extinction de masse, à partir d'une unique souche ancestrale. L'étude des fossiles et l'analyse génétique des oiseaux actuels nous font pencher pour une autre explication : de nombreuses lignées d'oiseaux

UNE LONGUE HISTOIRE ÉVOLUTIVE

Les fossiles et les analyses de l'ADN des manchots actuels indiquent que ce groupe d'oiseaux est apparu alors que les dinosaures peuplaient encore la Terre. Les plus vieux manchots fossiles connus, découverts en Nouvelle-Zélande, datent de 58 à 62 millions d'années. L'événement catastrophique qui a entraîné l'extinction des dinosaures et des autres prédateurs terrestres et marins a permis aux manchots de prospérer dans les eaux tempérées entourant un minicontinent submergé, la Zélandia. Par la suite, il y a environ 50 millions d'années, les manchots ont commencé à se répandre à travers tout l'hémisphère Sud, probablement grâce à une innovation évolutive clef : un échangeur de chaleur nommé le plexus artériel huméral, qui permettait à ces oiseaux de maintenir leur température corporelle dans les eaux froides. Au fil de leur dispersion, les manchots ont développé une immense diversité de tailles et de formes – beaucoup plus importante que celle des manchots actuels. Quelques espèces de cette longue histoire évolutive et leurs relations sont représentées sur l'arbre phylogénétique ci-contre.



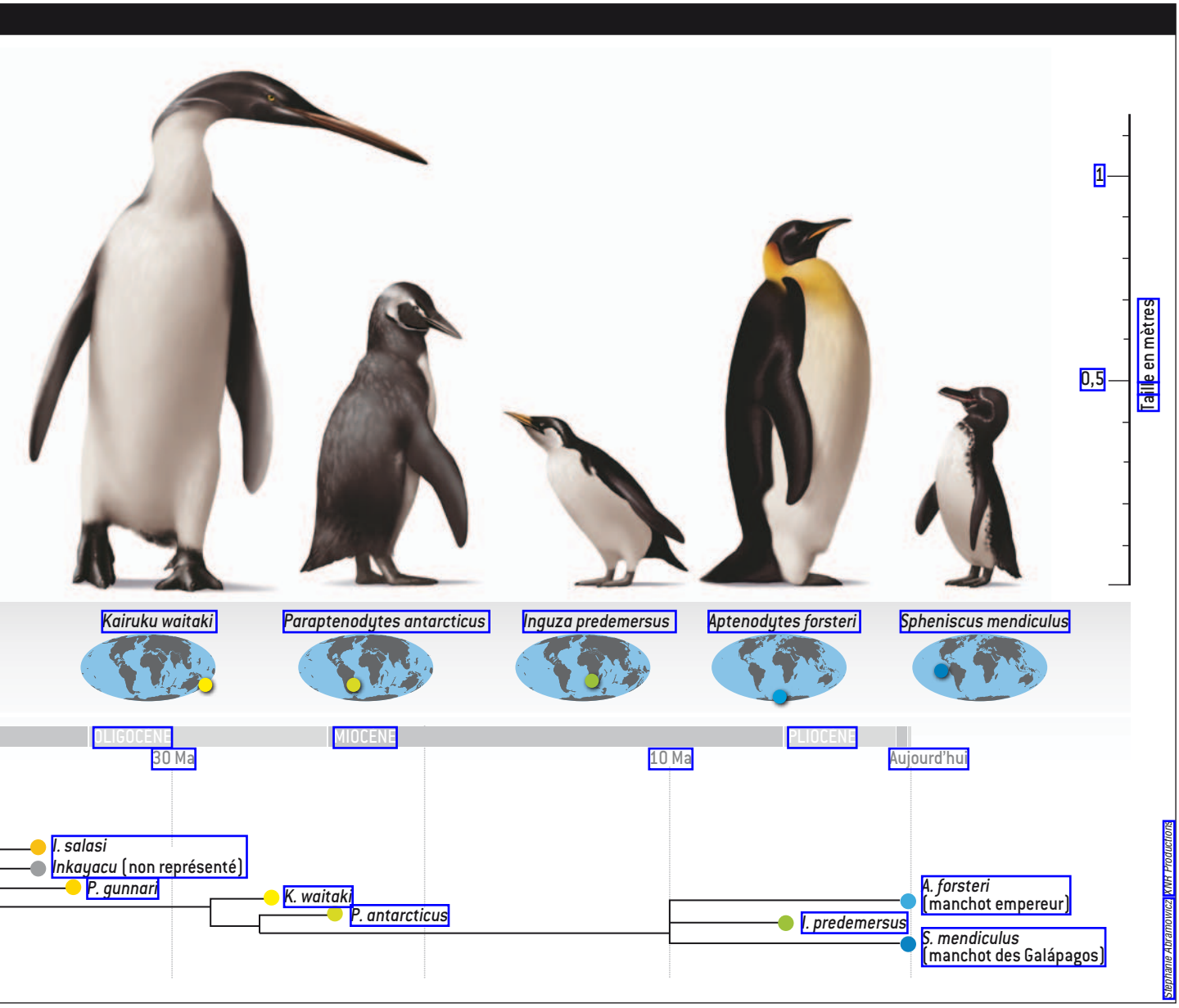
© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

actuels – dont celle des manchots – sont apparues avant ce désastre épique et lui ont survécu.

Zélandia, paradis des oiseaux marins

Le fait que les plus anciennes traces de manchots ont été trouvées en Nouvelle-Zélande n'est probablement pas une coïncidence. De nombreux manchots vivent aujourd'hui près des côtes de ce pays. Jusqu'à ce que les hommes arrivent, il y a moins de 1 000 ans, ces îles constituaient un paradis tempéré pour les oiseaux de mer, en marge du Pacifique Sud et de l'océan Austral. Exempte de mammifères prédateurs terrestres, cette région offrait de l'espace pour la reproduction des colonies et une nourriture abondante dans les mers environnantes.

L'étude géologique de la région suggère qu'elle était aussi favorable au mode de vie des oiseaux de mer à la fin du Crétacé, quand les manchots apparurent – quoique pour des raisons quelque peu différentes. La Nouvelle-Zélande actuelle est en effet la plus vaste région exposée d'un minicontinent submergé nommé Zélandia, qui s'est séparé de l'ancien supercontinent Gondwana il y a environ 85 millions d'années. Ainsi libérée, la Zélandia a dérivé vers le Nord-Est dans le Pacifique, transportant végétaux et animaux – y compris les dinosaures – jusqu'à sa destination actuelle, environ à mi-chemin entre le pôle Sud et les tropiques. À mesure que la Zélandia dérivait, elle se refroidissait et s'enfonçait. Des mers peu profondes recouvrirent la région, un large plateau continental se formant autour des terres émergées. Malgré son isolement des autres masses de terre, la Zélandia ne sortit pas indemne de l'extinction de la fin du Crétacé. Beaucoup de ses organismes marins et terrestres périrent dans la catastrophe. Cependant, ce qui était mauvais pour ces animaux était bon pour les manchots. Les reptiles marins tels que les mosasaures et les plésiosaures ayant été anéantis, les premiers manchots pouvaient traverser



LES AUTEURS



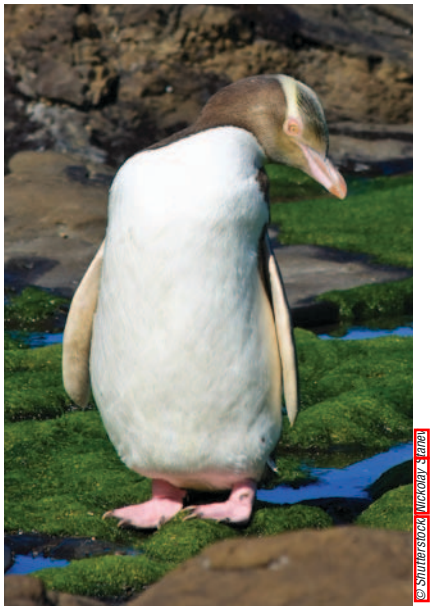


Ewan FORDYCE est paléontologue à l'Université Otago, en Nouvelle-Zélande.

Daniel KSEPKA est paléontologue à l'Université d'État de Caroline du Nord, aux États-Unis.

POUR INFO

Jeudi 14 mars, Yvon Le Maho et le paléontologue Philippe Taquet, président de l'Académie des sciences, reviendront sur l'évolution passée des manchots et sur leur avenir face au changement climatique dans l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* de 14h à 15h. **www.franceculture.com**



© Laurent Kloetzel/Biosphoto

1. UN MANCHOT À ŒIL JAUNE ou manchot antipode *(Megadyptes antipodes)* de Nouvelle-Zélande.

à la nage les eaux entourant la Zélandia sans craindre concurrents ou prédateurs.

Ayant acquis leurs caractéristiques aquatiques en Zélandia, les manchots ont vite étendu leur domaine, se dispersant sur des milliers de kilomètres et dans de nouvelles zones climatiques. Les fossiles de l'espèce péruvienne *Perudyptes devriesi* montrent que les manchots sont arrivés à proximité de l'équateur il y a environ 42 millions d'années. En d'autres termes, ils se sont établis dans l'un des lieux les plus chauds au cours d'une des périodes les plus chaudes de l'histoire de la planète. À cette époque, la température au Pérou était d'environ 29,5 °C, et la température moyenne des océans dépassait la température actuelle de 10,8 à 14,4 °C. À peu près au même moment, des manchots géants tels que *Anthropornis nordenskjoeldi* vivaient sur l'île Seymour, en Antarctique. Il y a 37 millions d'années, les manchots s'étaient répandus sur presque toutes les grandes terres de l'hémisphère Sud.

Une adaptation au froid... en pays chaud

Pourquoi les manchots, après s'être cantonnés à la Zélandia pendant des millions d'années, se sont-ils brusquement répandus dans tout l'hémisphère Sud, il y a environ 50 millions d'années ? Récemment, l'un de nous (Daniel Ksepka) a découvert un indice important, une caractéristique longtemps négligée à la surface des os de nageoires fossiles : l'humérus porte une série de sillons qu'il est facile de négliger parmi toutes les marques associées aux muscles et aux tendons. D. Ksepka fut le premier à remarquer ces sillons en 2006, tandis qu'il étudiait les nageoires de manchots congelés dans le sous-sol du Muséum d'histoire naturelle américain à New York à la recherche de relations entre les marques sur les os fossiles et l'anatomie de la nageoire. Simultanément, Daniel Thomas, spécialiste des manchots, menait des recherches similaires à l'Université d'Otago, visant notamment à comprendre comment a évolué la capacité des manchots à réguler leur température.

En comparant leurs notes, D. Ksepka et D. Thomas ont remarqué que ces sillons se forment en un point où un groupe d'artères et de veines s'appuient sur l'humérus. Ces vaisseaux sanguins constituent un échangeur de chaleur à contre-courant nommé le plexus artériel huméral, qui permet aux manchots de limiter les pertes de chaleur par les nageoires et de maintenir leur température corporelle dans l'eau froide. Chez les manchots actuels, le sang chaud quittant le cœur est refroidi par ce plexus avant d'atteindre l'extrémité de la nageoire, et le sang froid revenant des nageoires est réchauffé avant d'atteindre le cœur.

Cette découverte offre un éclairage quelque peu surprenant sur l'origine de la thermorégulation des manchots. Les espèces actuelles ayant la capacité de supporter un froid extrême, on pourrait penser que le plexus est le fruit de l'adaptation évolutive à un environnement très froid. Mais les fossiles suggèrent tout autre chose. La présence de tels sillons sur des restes de manchots vieux de 49 millions d'années, tels que *Delphinornis*, un manchot de petite taille de l'Antarctique, montre que l'apparition de cette caractéristique remonte au moins à cette époque. Cependant, les premiers manchots *Waimanu* de Zélandia, qui ont vécu il y a 58 millions d'années, ne présentent aucune trace de cette caractéristique. Le plexus doit donc avoir évolué entre-temps, quand la Terre était bien plus chaude qu'elle ne l'est aujourd'hui. À cette époque, l'Antarctique était dépourvu de couches de glace permanentes et offrait plutôt un environnement forestier tempéré ; la Zélandia était encore plus chaude.

Quel avantage évolutif un plexus conservateur de chaleur a-t-il pu procurer aux premiers manchots, dans ce monde aussi chaud qu'une serre ? Si les températures à la surface de la mer étaient élevées, les premiers manchots recherchaient probablement leur nourriture plus en profondeur, dans des régions riches en nutriments et donc propices à la présence de proies en quantité, dont des poissons et des calmars. Cette pêche en eaux plus froides comportait un risque, cependant. La chaleur corporelle étant plus vite perdue dans l'eau que dans l'air, si la température de l'eau est inférieure à sa température corporelle, un animal à sang chaud – tel un plongeur humain – peut être victime d'hypothermie même dans des mers chaudes. Les manchots à sang chaud risquaient de subir le même sort dans ces eaux froides – malgré leurs couches de graisse isolantes et leurs plumes imperméables. En réduisant les pertes de chaleur par les nageoires, le plexus artériel huméral leur aurait permis de maintenir plus longtemps leur chaleur corporelle dans des eaux froides.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Les manchots menacés par le réchauffement climatique



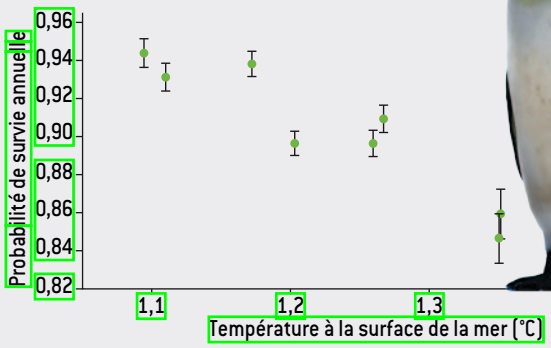
En complément de l'approche paléontologique, la comparaison d'espèces actuelles apparentées, mais vivant dans des milieux contrastés, permet de déterminer grâce à quels processus adaptatifs, notamment comportementaux, les manchots ont colonisé l'ensemble de l'hémisphère austral. Ces adaptations sont très lentes – sur plusieurs dizaines de millions d'années –, d'autant plus que l'âge de première reproduction est élevé, atteignant cinq ans chez certaines espèces.

Prenons le manchot empereur *(A. forsteri)* et le manchot royal *(A. patagonicus)*. En raison de leurs nombreuses similitudes morphologiques, ils ont été classés dans le même genre, *Aptenodytes*. Néanmoins, le manchot empereur est le seul animal à se reproduire en hiver sur la glace de mer au cœur du rude hiver antarctique, à des températures ambiantes qui, pour certaines colonies, descendent à –50 °C. Dans la colonie située près de la base Dumont d'Urville en terre Adélie, la température descend rarement en dessous de –30 °C, mais les rafales de vent atteignent des vitesses comprises entre 100 et 200 kilomètres par heure, ce qui augmente considérablement le pouvoir de refroidissement ambiant. Le manchot royal est rarement soumis à des températures négatives, car il vit dans la zone subantarctique ; les deux tiers de ses populations se reproduisent dans l'archipel de Crozet, où la température moyenne est d'environ 5 °C.

Avec des extrémités (bec et ailerons) plus grandes et une taille réduite (80 centimètres pour 13 à 15 kilogrammes, au lieu de un mètre pour 25 à 40 kilogrammes pour le manchot empereur), la morphologie du manchot royal correspond à un stade intermédiaire dans l'adaptation au froid par rapport au manchot empereur. En effet, plus un animal est grand et volumineux avec des extrémités réduites, moins importante est sa surface corporelle de déperdition thermique par rapport à son volume producteur de chaleur.

Mais la morphologie du manchot empereur ne suffit pas pour lui assurer sa reproduction dans un froid extrême. Son processus adaptatif décisif est en fait comportemental : en se serrant les uns contre les autres pour former des « tortues », les manchots empereurs réduisent de moitié leur vitesse d'amaigrissement, ce qui permet au mâle de jeûner en moyenne 120 jours et ainsi d'assurer la totalité de l'incubation. Cela est rendu possible à la fois par la mobilité (l'œuf est couvé sur les pattes), mais aussi par le fait que le manchot empereur n'a pas de comportement territorial (c'est le seul manchot dans ce cas).

Comme l'indiquent à juste titre E. Fordyce et D. Ksepka, la rapidité du changement climatique constitue une terrible menace pour des oiseaux à l'adaptation aussi poussée à leur milieu. Ainsi, 80 pour cent des populations de manchots Adélie *(Pygoscelis adeliae)* ont disparu de l'Ouest de la péninsule Antarctique, l'une des zones de la planète qui se réchauffent le plus actuellement. En prenant en compte les scénarios de nos collègues climatologues, avec Céline Le Bohec nous avons montré en 2008 que les populations de manchots royaux de Crozet sont gravement menacées *(voir la figure)*. Et en 2009, nos collègues du Centre d'études biologiques de Chizé (CNRS) ont aussi prédit l'extinction de la colonie de manchots empereurs de terre Adélie.



Une augmentation de la température à la surface de la mer de seulement 0,3°C dans la zone à la limite des glaces où les manchots royaux se nourrissent en hiver se traduit par une diminution de près de dix pour cent de leur survie.

Graphe d'après D. Le Bohec et al., PNAS, 2008 ; © Shutterstock, Neale Cousland

Yvon Le Maho
Institut pluridisciplinaire Hubert Curien, CNRS-Université de Strasbourg

Il pourrait aussi avoir aidé les manchots à supporter les longs voyages en haute mer, grâce auxquels ils se sont dispersés, à partir de la Zélandia, vers les autres continents. Cette hypothèse nous semble d'autant plus plausible que les premières vagues de manchots fossiles apparues en dehors de la Zélandia semblent toutes présenter cette caractéristique. Les manchots modernes n'auraient détourné ce mécanisme que bien plus tard pour coloniser les glaces formées quand la planète s'est refroidie.

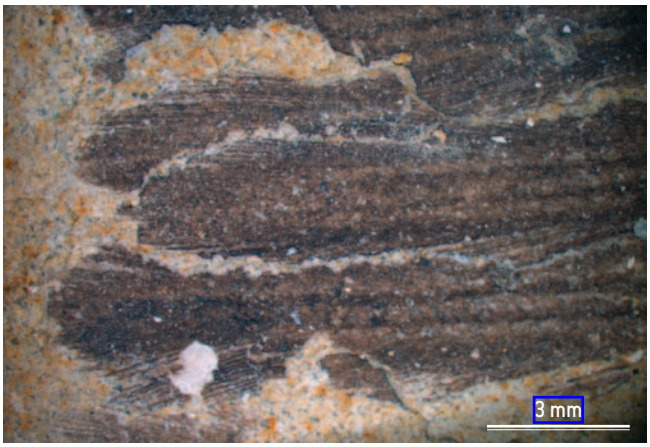
Dix espèces cohabitaient

À partir du moment où ils se sont dispersés dans tous les océans de l'hémisphère Sud, les manchots ont connu une importante diversification. Le manchot de Nouvelle-Zélande *Pachydyptes ponderosus* – le « plongeur corpulent » – était un géant, connu seulement à partir de quelques os épais datant d'environ 35 millions d'années. On estime sa masse à plus de 68 kilogrammes. À l'autre extrémité du spectre, *Eretiscus tonnii* – le « rameur minuscule » – d'Argentine, vieux de 21 millions d'années, avait une taille inférieure à 0,5 mètre. Comme le petit manchot bleu vivant actuellement en Nouvelle-Zélande, les membres de cette espèce sont peut-être arrivés sur la terre ferme dans des sortes de radeaux composés de plusieurs dizaines d'oiseaux – un comportement qui peut réduire les risques de prédation.

Certains manchots usaient d'une arme mortelle. Il y a environ 36 millions d'années, *Icadyptes salasi* – « le plongeur d'Ica », du nom d'une région du Pérou – patrouillait dans les voies maritimes préhistoriques équipé d'un bec allongé et renforcé, monté sur un cou enveloppé de muscles puissants, prêt à empaler tout poisson ou calmar passant à sa portée. D'autres manchots arboraient d'étranges capes, tel le spécimen *Inkayacu paracasensis* – « le roi des eaux » – vieux de 36 millions d'années mis au jour en 2010 au Pérou par Julia Clarke, de l'Université du Texas à Austin. Magnifiquement conservé, il portait encore des plumes et sa peau. Des détails microscopiques ont révélé la présence de pigments brun rougeâtre et gris, bien loin des motifs noirs et blancs des manchots actuels.

Non seulement les anciens manchots se sont diversifiés, mais les variations ont été nombreuses. Outre les 19 espèces actuelles, les paléontologues ont identifié plus de 50 espèces fossiles. De surcroît, dans de nombreuses régions, des preuves solides suggèrent que de multiples espèces cohabitaient dans le passé. Sur l'île Seymour, par exemple, on compte jusqu'à dix espèces dans les mêmes couches fossiles. Ce recouvrement est fascinant, car il suggère que ces espèces étaient capables de se constituer suffisamment de niches écologiques différentes à partir du même espace physique pour coexister. Par comparaison, chez les







Vidéo animée autorisation de Science/AAAS

2. DES PLUMES FOSSILISÉES *(en haut)* et le bec *(en bas)* d'un manchot géant vieux de 36 millions d'années, *Inkayacu paracasensis*, mis au jour en 2010 au Pérou par Julia Clarke, de l'Université du Texas à Austin, aux États-Unis, et ses collègues. Ce spécimen ancien présente plusieurs particularités. D'une taille imposante (environ 1,5 mètre), et d'une masse estimée à environ 55 kilogrammes (soit le double de celle d'un manchot empereur lorsqu'il n'a pas accumulé ses réserves hivernales), il arborait un long bec pointu et renforcé qui lui servait sans doute de harpon. Les pigments des plumes révèlent en outre qu'il était principalement gris et rouge-brun.

manchots actuels, cinq espèces au plus partagent la même aire de reproduction.

Les anciens manchots ont réussi à cohabiter en partie grâce à une gamme de tailles plus étendue que celle des manchots actuels. C'est ce que suggèrent notamment les énigmatiques manchots géants de Nouvelle-Zélande. Nous avons récemment achevé une étude détaillée de quelques spécimens vieux de 27 millions d'années, incluant le squelette partiel découvert par E. Fordyce dans les années 1970. Bien qu'ils ressemblent au *Palaeeudyptes* d'Huxley, ces fossiles constituent un nouveau genre, que nous avons nommé *Kairuku* – « le plongeur qui revient avec de la nourriture » en maori. La bonne conservation de tous les os clefs du squelette nous a permis de reconstituer la taille et les proportions du corps. Mesurant 1,35 mètre et pesant plus de 61 kilogrammes, selon nos estimations, les manchots *Kairuku* devaient être des géants par rapport aux manchots empereurs actuels.

Nous pensons que la taille de ces anciens manchots de Nouvelle-Zélande est une adaptation qui a facilité leur nage sur de longues distances, des colonies (rookeries) des îles de la Zélandia jusqu'au bord de la plate-forme continentale. Leur taille aurait aussi amélioré l'efficacité de leurs plongeons en eaux profondes à la recherche de proies telles que les calmars, car les grands oiseaux nagent plus vite, emmagasinent plus d'oxygène, et conservent mieux leur chaleur corporelle. De même, les grands manchots fossiles de l'île Seymour nageaient et chassaient vraisemblablement loin et en profondeur, tandis que les espèces plus petites recherchaient leur nourriture plus près des terres.

S'adapteront-ils à un réchauffement rapide ?

En tant que « sentinelles » de la diversité aviaire, nous pouvons tirer plusieurs leçons des enregistrements fossiles des manchots pour leur préservation. Au cours des derniers 60 millions d'années, la plupart des extinctions de manchots se sont produites bien avant l'apparition de l'homme. Cependant, *Homo sapiens* n'est pas totalement innocent. Au moins une espèce de manchot parente du manchot à œil jaune – *Megadyptes waitaha* – se serait éteinte, du moins en partie, à cause de sa chasse par l'homme. Si aujourd'hui les manchots sont rarement chassés intentionnellement, ils restent sous la menace de pressions locales et mondiales telles que la surpêche, les rejets de pétrole ou l'introduction de prédateurs. Néanmoins, la menace la plus préoccupante pour les manchots semble être le changement climatique.

Les manchots se sont adaptés à des changements climatiques spectaculaires. Ils ont prospéré tant dans les zones équatoriales torrides de la Terre au cours d'une phase de réchauffement de type « serre », que dans les déserts glacés de l'Antarctique actuel. Mais ne nous méprenons pas. Ces succès évolutifs au cours des 60 derniers millions d'années de changements climatiques ne signifient pas qu'ils s'adapteront aussi bien à tous les effets du réchauffement global actuel. En termes d'adaptation, le temps est un facteur critique. Les paléontologues ont découvert que de nombreuses espèces ont peu à peu déplacé leur habitat au cours de changements climatiques majeurs, tels ceux qui ont accompagné l'avancée et le retrait des glaciers, lors des cycles interglaciaires qui ont marqué les dernières centaines de milliers d'années.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Certaines espèces réagissent lentement, ce qui est très bien quand le climat se réchauffe de quelques degrés en quelques millions d'années. Cependant, si la température grimpe de plusieurs degrés en quelques décennies, comme de nombreux modèles en prédisent la possibilité, des espèces risquent de ne pas avoir le temps de se réimplanter dans des habitats plus appropriés. Ou ces habitats pourraient avoir disparu.

Prenons le manchot des Galápagos. Ce petit oiseau prospère sous le soleil équatorial, mais ses effectifs chutent de façon importante lors des fortes années El Niño. Durant de telles années, les courants de l'océan Pacifique sont perturbés et les eaux froides, riches en nourriture, qui entourent habituellement ces îles, sont remplacées par des eaux plus chaudes, pauvres en nutriments. Comme ces manchots ne s'éloignent jamais de l'archipel, ils n'auront nulle part où aller si le réchauffement rend les îles Galápagos trop chaudes pour qu'ils puissent élever leurs petits ou se nourrir.

Les manchots empereurs, quant à eux, sont confrontés à un autre défi. Ces oiseaux peuvent ne jamais poser le pied sur la terre sèche, car ils se reproduisent sur d'épaisses couches de glace de mer. Si la glace fond trop tôt dans l'année, les colonies qui n'ont pas achevé leur cycle de reproduction risquent d'être détruites. La fidélité de ces manchots à leur colonie amplifie le danger ; année après année, de nombreux individus reviennent exactement au même endroit pour se reproduire. Ce comportement est si profondément enraciné que le simple déplacement vers une autre parcelle de glace pourrait perturber le cycle.

En tant que paléontologues, nous sommes de plus en plus conscients de la fragilité des manchots actuels. Aujourd'hui, les manchots présentent moins de variété dans leur morphologie et ils comptent moins d'espèces qu'il y a des millions d'années. Bien que les biologistes les considèrent comme des oiseaux modernes, les manchots demeurent, sous bien des aspects, les survivants d'une longue dynastie qui a fourni certains des animaux les plus intéressants qui aient jamais peuplé les terres et les mers. Leur disparition serait une tragédie. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Ksepka *et al.*, **New fossil penguins (Aves, Sphenisciformes) from the Oligocene of New Zealand reveal the skeletal plan of stem penguins,** *J. of Vert. Paleo.*, vol. 32, pp. 235-254, 2012.

D. Thomas *et al.*, **Penguin heat-retention structures evolved in a greenhouse Earth,** *Biology Letters*, vol. 7, pp. 461-464, 2011.

J. Clarke *et al.*, **Fossil evidence for evolution of the shape and color of penguin feathers,** *Sciencexpress*, 10.1126/science.1193604, 2010.

SUR LE WEB

La marche des manchots fossiles (blog) : fossilpenguins.wordpress.com.

Photos de manchots : ScientificAmerican.com/nov2012/penguins



HUMAN BRAIN PROJECT : simuler le cerveau humain

Henry Markram



L'Union européenne vient de désigner le *Human Brain Project* comme l'un de ses deux programmes phares de recherche de la décennie à venir. Il s'agit de simuler par ordinateur un cerveau humain complet, projet grâce auquel les neurosciences pourraient progresser à pas de géant.

Il est temps de changer notre manière d'étudier le cerveau. La biologie réductionniste, qui consiste à étudier indépendamment les sous-parties d'un système, nous a déjà permis d'aller assez loin dans l'étude du cerveau. Cependant, elle ne peut pas expliquer à elle seule tous les mécanismes de fonctionnement de cet extraordinaire organe. Pour explorer le cerveau et mieux le comprendre, nous avons besoin d'une nouvelle approche qui associe l'analyse et la synthèse. Le philosophe René Descartes, père du réductionnisme, a lui-même décrit en son temps cette nécessité d'étudier les parties, puis de les rassembler afin de reconstruire le tout.

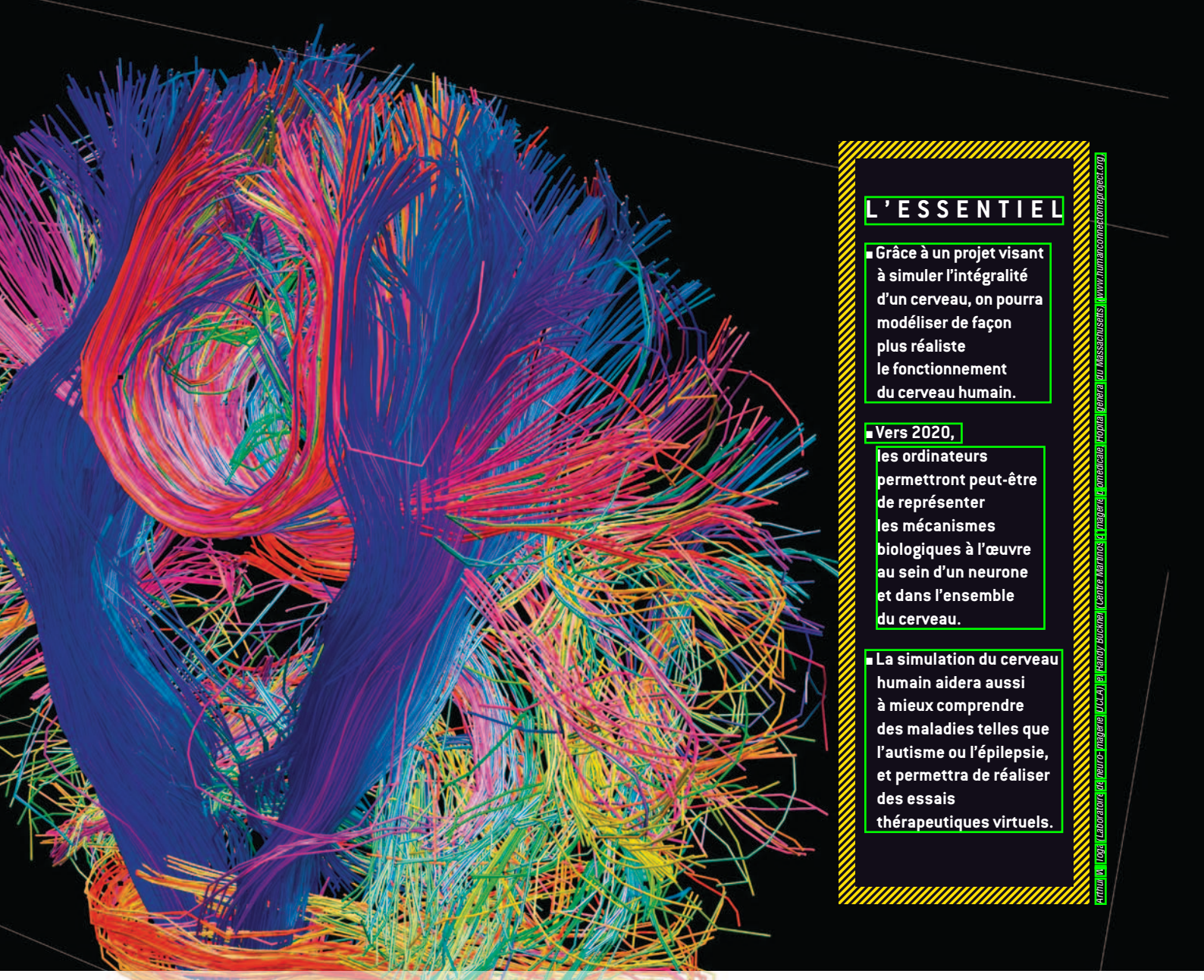
Telle est la démarche adoptée pour le *Human Brain Project* (projet Cerveau humain, ou HBP), dont l'objectif est de réaliser une simulation numérique complète du cerveau humain. On peut comparer la construction de ce fantastique outil scientifique à la mise au point d'un simulateur de vol le plus puissant jamais construit. Mais au lieu de simuler un vol en plein air, le voyage s'effectuera dans le cerveau. Ce « cerveau virtuel » fonctionnera à l'aide de supercalculateurs et incorporera les résultats les plus récents des recherches en neurosciences.

Ce « simulateur » de cerveau constituera un grand équipement au service de toute la communauté scientifique. Comme ils le font avec les très grands télescopes, les chercheurs y réserveront des créneaux de temps d'utilisation afin de mener leurs expériences. Ils s'en serviront, par exemple, pour tester des hypothèses sur le fonctionnement normal ou pathologique du cerveau, pour mettre au point de nouveaux tests de dépistage ou de nouvelles thérapies pour lutter contre la dépression, l'épilepsie ou encore la maladie d'Alzheimer. Les schémas de connexion des dizaines de milliers de milliards de neurones du simulateur constitueront aussi une source d'inspiration pour concevoir des ordinateurs opérant comme des cerveaux, voire des robots intelligents. En bref, le projet Cerveau humain devrait ouvrir de nouveaux horizons dans les neurosciences, la médecine et les technologies de l'information.

Un modèle évolutif

Les scientifiques pourraient effectuer les premières simulations de cerveau humain avant 2020. Pour mettre au point le simulateur, nul besoin que tous les mystères du cerveau soient dissipés dès le début. Au contraire, il fournira une structure contenant ce que nous savons, tout en nous

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013



Arnun V. Toga (Laboratory of Neuro Imaging, UCLA) & Randy Buckner (Centre Martinos, Imagerie Médicale, Hôpital général du Massachusetts) www.humanconnectomeproject.org

L'ESSENTIEL

- Grâce à un projet visant à simuler l'intégralité d'un cerveau, on pourra modéliser de façon plus réaliste le fonctionnement du cerveau humain.
- Vers 2020, les ordinateurs permettront peut-être de représenter les mécanismes biologiques à l'œuvre au sein d'un neurone et dans l'ensemble du cerveau.
- La simulation du cerveau humain aidera aussi à mieux comprendre des maladies telles que l'autisme ou l'épilepsie, et permettra de réaliser des essais thérapeutiques virtuels.

permettant de faire des prévisions sur ce que nous ignorons encore. Il nous aidera à planifier nos expériences futures afin de nous épargner des efforts inutiles. Les nouvelles découvertes y seront intégrées au fur et à mesure et rejoindront celles dont nous disposons déjà. Les lacunes du modèle seront ainsi progressivement comblées à l'aide d'éléments de plus en plus proches de la réalité.

Ce simulateur fera avancer la recherche fondamentale en neurosciences, mais il sera aussi utile dans le domaine médical. Rien qu'en Europe, les maladies cérébrales touchent 180 millions d'individus, c'est-à-dire à peu près une personne sur trois. Et ce chiffre est appelé à augmenter en raison du vieillissement de la population. Pourtant, l'industrie pharmaceutique n'investit pas assez dans de nouveaux traitements des maladies du cerveau. Un modèle global du cerveau aiderait à mieux caractériser les mécanismes biologiques de ces maladies plutôt que de les considérer simplement comme des ensembles de symptômes. Cette vision plus large favoriserait le développement d'une nouvelle génération de traitements, qui cibleraient les anomalies cérébrales à l'origine des troubles observés.

Une autre raison pour laquelle nous avons besoin de ce simulateur est liée à l'informatique, qui va prochainement atteindre ses limites technologiques. Bien des tâches que les animaux exécutent sans efforts, telles que la reconnaissance visuelle ou l'anticipation d'événements, ne sont que péniblement accomplies par les ordinateurs, en dépit des progrès considérables déjà réalisés.

En outre, plus les ordinateurs sont puissants, plus ils sont gourmands en énergie, et viendra le jour où il ne sera plus possible de satisfaire cette demande. La performance des supercalculateurs actuels se mesure en pétaflops – un million de milliards d'opérations par seconde. La prochaine génération, attendue autour de 2020, sera 1 000 fois plus rapide et se mesurera en exaflops (un milliard de milliards d'opérations par seconde). La première machine à cette échelle de puissance consommera de l'ordre de 20 mégawatts, à peu près la quantité d'énergie dépensée par une petite ville en hiver. Pour créer des ordinateurs plus puissants, capables d'effectuer comme les humains certaines tâches simples et utiles, tout en faisant

1. L'ARCHITECTURE FORMÉE par les fibres de la substance blanche du cerveau humain est révélée par la technique d'IRM (imagerie par résonance magnétique) de diffusion.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

preuve d'efficacité énergétique, il nous faut une stratégie radicalement nouvelle.

Pour ce faire, nous avons intérêt à nous inspirer du cerveau humain. Ce dernier assure d'innombrables fonctions en ne consommant qu'une vingtaine de watts à peine – soit la puissance d'une petite ampoule électrique, un million de fois inférieure à celle d'un ordinateur fonctionnant à l'échelle de l'exaflops. Nous devons donc comprendre les multiples niveaux d'organisation du cerveau, des gènes jusqu'aux aires cérébrales et au-delà. C'est ce que nous voulons faire en développant notre simulateur.

Certains considèrent que la modélisation du cerveau humain est un objectif hors d'atteinte. L'une de leurs principales objections consiste à dire qu'il est impossible de reproduire ce réseau de 100 000 milliards de connexions nerveuses, puisqu'il n'a jamais été complètement caractérisé. En cela, ils ont raison et c'est pourquoi nous ne le ferons pas. Nous ne définirons pas *a priori* la topologie des connexions dans notre modèle. Notre approche est de tenter de reproduire l'ensemble des règles qui sont à l'œuvre lors du développement embryonnaire du cerveau. En théorie, ces règles contiennent toute l'information nécessaire pour construire un cerveau numérique. La complexité engendrée par ces règles a de quoi décourager. Nous préférons donc implémenter ces règles dans nos simulations, et les laisser reconstruire un cerveau *in silico* (en référence au silicium des composants électroniques) comme elles le font *in vivo*.

Les règles de développement du système nerveux reposent surtout sur nos gènes. Elles régissent la formation des différents types de cellules du cerveau ainsi que leur répartition et leurs connexions. Nous avons déjà mis en œuvre quelques-unes de ces règles lorsque nous avons jeté les bases du projet *Human Brain*. Tout a débuté il y a presque 20 ans. Nous avons commencé par évaluer les caractéristiques des différents types de neurones. Nous avons collecté de grandes quantités de données sur leurs tailles, leurs formes, le nombre de leurs axones et dendrites, et nous avons reconstruit numériquement des centaines de neurones en trois dimensions. À l'aide d'une technique nommée « patch-clamp », qui consiste à mesurer les courants qui traversent la membrane d'une cellule, nous avons aussi enregistré l'activité électrique des neurones.

En 2005, pour modéliser un seul neurone, il fallait un ordinateur puissant et trois années de travail d'un doctorant. Il était cependant évident que des objectifs plus ambitieux allaient bientôt être atteints et que nous pourrions modéliser des circuits cérébraux complexes, impliquant de nombreux neurones, même si nos connaissances dans ce domaine restaient incomplètes. Nous avions alors lancé le projet *Blue Brain*, prédécesseur du projet *Human Brain*. Nous allions construire des « modèles informatiques unifiés », c'est-à-dire des modèles qui intègrent toutes les données et hypothèses existantes sur un circuit neuronal donné, tout en éliminant les données aberrantes et en repérant où il manque des informations.

Un modèle unifié d'une colonne corticale

Pour tester la démarche, nous avons entrepris de construire un modèle unifié d'une structure cérébrale nommée colonne corticale. Schématiquement, c'est ce que l'on obtiendrait en enfonçant un minuscule emporte-pièce dans le cortex et en en retirant un cylindre de tissus d'environ un demi-millimètre de diamètre et de 1,5 millimètre de longueur. À l'intérieur de cette minicarotte de tissu, on trouverait un réseau extrêmement dense constitué de quelques dizaines de milliers de cellules.

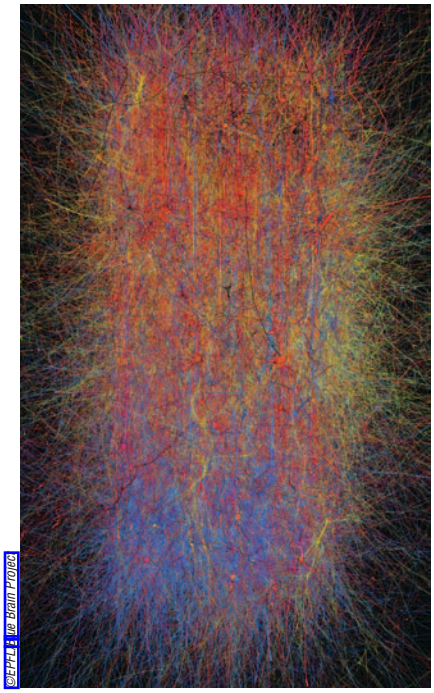
En quelque sorte, une colonne corticale est au cerveau ce qu'un microprocesseur est à un ordinateur portable. Ces structures cérébrales sont tellement efficaces pour traiter les informations transmises par nos sens que, au cours de l'évolution, elles se sont multipliées dans le cerveau, jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'espace libre dans la boîte crânienne. Le cortex a même dû se replier sur lui-même pour gagner de la place – d'où les circonvolutions caractéristiques du cerveau humain.

Une colonne corticale se compose de quelques centaines de types de neurones répartis en six couches distinctes. Les connexions neuronales entre la colonne et le reste du cerveau sont organisées différemment dans chaque couche. À l'aide de notre supercalculateur *Blue Gene* d'IBM, nous avons intégré les informations disponibles sur l'organisation de tous ces types de neurones dans chaque couche, jusqu'à pouvoir décrire une colonne corticale de rat nouveau-né. Nous avons aussi

L'AUTEUR



Henry MARKRAM dirige le projet *Blue Brain* à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse. Il coordonne aussi le projet Cerveau humain *(Human Brain Project)* que vient de sélectionner la Commission européenne.



©EPFL Blue Brain Project

2. SIMULATION D'UNE COLONNE CORTICALE – un groupe de neurones – dans le cadre du projet *Blue Brain* mené à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. On observe ici l'intégralité de cette unité fonctionnelle.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

donné des instructions à l'ordinateur pour permettre aux neurones virtuels de se connecter comme le font les neurones réels. Il nous a fallu trois ans pour bâtir la structure du logiciel qui, à son tour, nous a permis de réaliser le premier modèle unifié de colonne.

À ce moment précis, nous disposions d'un modèle statique : l'équivalent d'une colonne corticale du cerveau d'une personne plongée dans le coma. Or nous voulions savoir si ce modèle pouvait se comporter comme une vraie colonne, même si elle était isolée du reste du cerveau. En 2008, nous avons stimulé notre colonne virtuelle au moyen d'une impulsion électrique. Les neurones ont alors commencé à communiquer. Des salves de potentiels d'action – les signaux électriques transmis d'un neurone à l'autre – se sont propagées dans la colonne, en oscillant entre les différentes couches, exactement comme dans un cerveau vivant. Nous n'avions pas programmé ce comportement dans le modèle : il est apparu spontanément en raison de la façon dont le circuit avait été construit. Et le circuit est resté actif, même après la fin de la stimulation, et il a brièvement développé ses propres dynamiques internes.

À partir de ce stade, nous avons peu à peu intégré à ce modèle de colonne corticale davantage de données recueillies par les laboratoires du monde entier. Le logiciel que nous avons développé est constamment amélioré de sorte que, chaque semaine, nous reconstruisons la colonne, avec davantage de règles et davantage de précision. La prochaine étape consistera à intégrer les données relatives à l'ensemble d'une région cérébrale, puis de tout le cerveau, en commençant par celui d'un rongeur.

Si nous continuions de travailler à l'échelle artisanale du projet *Blue Brain*, il nous faudrait des décennies pour atteindre notre objectif, la simulation d'un cerveau humain complet. Or nous n'avons pas tout ce temps devant nous, d'où l'entreprise beaucoup plus ambitieuse que représente le projet Cerveau humain.

L'un des aspects de ce projet est de faire le lien entre les mutations génétiques et les maladies du cerveau qu'elles engendrent. Les mutations entraînent la modification de protéines fabriquées par les cellules, ce qui a pour conséquence de perturber la forme des neurones, les synapses qui les joignent et l'activité électrique locale, puis globale. En théorie, nous pourrions programmer un certain type de mutation dans le modèle, puis observer les conséquences de cette mutation.

Le processus est itératif. Si le symptôme, ou l'ensemble de symptômes qui en résulte, correspond à ce que l'on constate dans la réalité, cet enchaînement d'événements virtuels est susceptible d'être un mécanisme physiologique de la maladie. Nous comparons alors la simulation avec des données expérimentales variées. En l'absence de concordance, nous retournons au modèle, vérifions l'exactitude des données et précisons les règles biologiques. En cas d'adéquation, nous intégrons davantage de données, précisons les détails et étendons notre modèle à une plus grande partie du cerveau.

S'approcher peu à peu de la réalité biologique

Petit à petit, notre logiciel, surnommé « brain builder » (constructeur de cerveau), devient ainsi plus performant, l'intégration des données plus rapide et plus automatique, et le modèle se rapproche de la réalité biologique. Modéliser le cerveau tout entier, alors que notre connaissance des neurones et des synapses est encore incomplète, ne semble plus être un rêve hors de portée.

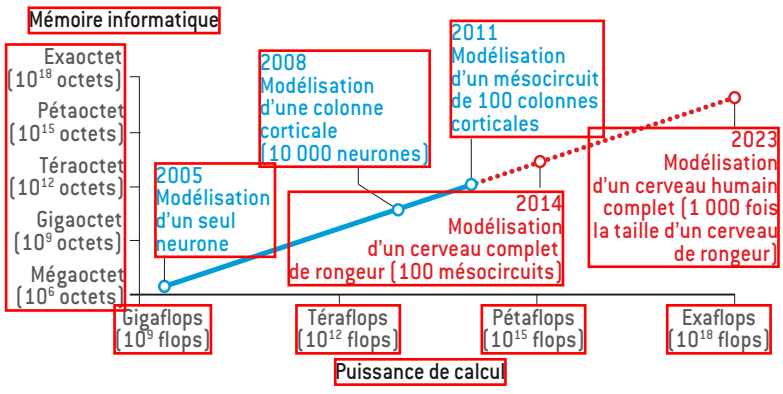
Pour des raisons éthiques, les expériences que les scientifiques peuvent faire sur le cerveau humain sont bien sûr limitées. Heureusement, le cerveau de tous les mammifères est construit sur les mêmes règles, avec des variantes suivant les espèces. La plupart de nos connaissances en matière de génétique du cerveau des mammifères proviennent de la souris. Les singes, eux, nous fournissent de précieuses informations en matière de cognition. Nous pouvons donc commencer par construire le modèle unifié d'un cerveau de rongeur, puis l'utiliser pour développer notre modèle de cerveau humain. Ainsi, les modèles de cerveau de souris, de rat et d'être humain seront développés en parallèle.

S'agissant de la cognition, nous savons par exemple que les très jeunes bébés ont une certaine compréhension des concepts numériques 1, 2 et 3, mais pas des chiffres supérieurs. Quand nous serons enfin en mesure de modéliser le cerveau d'un nouveau-né, ce modèle devra récapituler à la fois ce que le bébé peut et ce qu'il ne peut pas faire.

Une grande partie des données qui nous sont nécessaires existent déjà, mais elles ne sont pas facilement accessibles. L'un des grands défis pour le projet Cerveau humain sera de les rassembler et

PLUS D'ORDINATEUR = PLUS DE CERVEAU

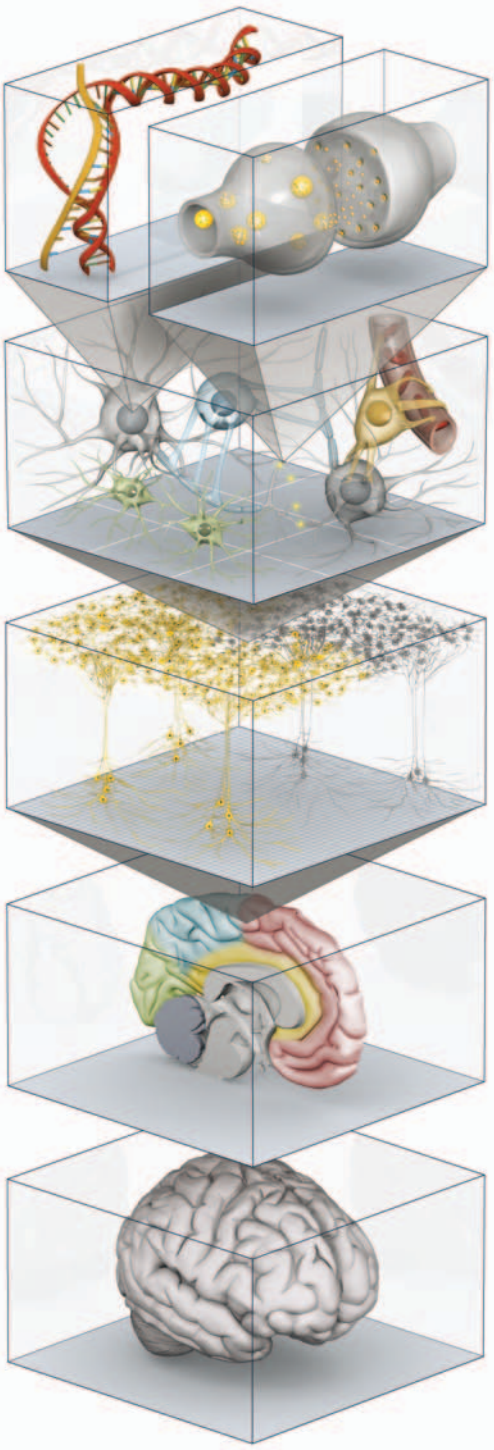
Plus les ordinateurs seront puissants et rapides, avec une capacité de mémoire croissante, plus on pourra améliorer et détailler les simulations des circuits cérébraux pour mener à bien des recherches fondamentales. La reproduction numérique d'un petit cylindre de tissu prélevé dans le cortex d'un rat (une colonne corticale) est devenue réalité en 2008, quand la puissance de calcul se mesurait en téraflops. Maintenant que les supercalculateurs franchissent la barre du pétaflops ou de l'exaflops, le projet *Human Brain* permet d'envisager des simulations d'un cerveau complet de souris et, plus tard, d'un cerveau humain.



2012 Blue Brain Project. Tous droits réservés

DÉCONSTRUIRE LE CERVEAU

Le projet Cerveau humain a pour objectif de réaliser une simulation numérique des quelque 90 milliards de neurones que compte le cerveau et des 100 000 milliards de connexions qui relient ces cellules entre elles. Un modèle virtuel précis du cerveau humain permettrait d'effectuer, par ordinateur, des recherches fondamentales sur les cellules et circuits cérébraux ainsi que des essais thérapeutiques virtuels. Il s'agira de modéliser chaque niveau de fonctionnement du cerveau, des transmissions de signaux chimiques et électriques aux facultés cognitives asociées à la pensée.



Emily Cooper

Niveau moléculaire
La modélisation devra combiner les éléments moléculaires permettant de conférer à la cellule les principales caractéristiques d'un neurone, notamment la capacité de transmettre des signaux électriques et chimiques.

Niveau cellulaire
Le simulateur aura à intégrer les moindres détails des neurones et des cellules gliales, notamment la géométrie précise des dendrites et des axones, parties des neurones qui reçoivent et transmettent les signaux.

Niveau des circuits
La modélisation des connexions entre neurones voisins et entre différentes régions cérébrales fournirait des indices sur l'origine de certaines maladies cérébrales complexes telles que l'autisme ou la schizophrénie.

Niveau des aires cérébrales
Les principales structures – l'amygdale (émotions), l'hippocampe (mémoire), les lobes frontaux (contrôle moteur et cognitif) – peuvent être examinées individuellement ou dans le cadre de leurs interactions.

Niveau de l'organe entier
À terme, on simulera un cerveau complet. En modifiant virtuellement un gène, par exemple, on pourra étudier les effets sur le cerveau d'une mutation, sans avoir à élever et sacrifier des souris. On pourra aussi simuler des conditions expérimentales très variées.

de les organiser. Nous serons alors très dépendants de la neuro-informatique, discipline qui consiste à rationaliser d'immenses bases de données neurobiologiques. Certaines données viendront du domaine médical et seront extrêmement précieuses, car elles nous renseigneront autant sur le fonctionnement normal du cerveau que sur ses dysfonctionnements. Le simulateur que nous voulons créer doit se comporter d'abord comme un cerveau sain, puis éventuellement dysfonctionner comme un cerveau réel.

Centraliser les données

En général, chaque fois qu'un patient subit un examen cérébral de type scanner, le cliché est archivé numériquement. Les hôpitaux du monde entier stockent des millions d'images. Bien que celles-ci soient déjà utilisées pour la recherche, le travail est conduit de façon tellement parcellaire que ces images sont largement sous-exploitées. Si elles étaient rassemblées sur les « nuages » d'Internet et accompagnées du dossier médical des malades, y compris les informations biochimiques et génétiques associées, les médecins pourraient passer au crible de vastes populations de patients pour y rechercher des modèles permettant de définir certains types de pathologies.

Le point fort de cette stratégie résiderait dans la capacité à localiser mathématiquement les différences et les similarités entre tous les types de maladies. C'est l'objectif de l'Initiative de neuro-imagerie de la maladie d'Alzheimer (*Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative*), soutenue par de nombreuses universités et qui a entrepris de collecter toutes les images cérébrales, les données relatives aux analyses de sang ou de liquide céphalo-rachidien provenant d'innombrables patients atteints de démence, ou de sujets témoins en bonne santé.

Enfin, il y a la question informatique. L'ordinateur *Blue Gene* est un mastodonte de la dernière génération, celle du pétaflops, composé de près de 300 000 processeurs logés dans un espace équivalant à 72 réfrigérateurs. Des pétaflops suffisent pour modéliser, jusqu'à l'échelle cellulaire, un cerveau de rat constitué d'environ 200 millions de neurones, mais pas celui d'un être humain qui comprend de l'ordre de 90 milliards de neurones. Nous avons donc besoin d'un supercalculateur

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

à l'échelle de l'exaflops, mais une telle puissance de calcul sera encore insuffisante pour que la modélisation aille jusqu'aux détails moléculaires.

Des superordinateurs adaptés

Dans le monde entier, des équipes de chercheurs rivalisent pour être les premiers à construire de tels ordinateurs. Lorsqu'ils seront disponibles, comme pour les générations précédentes de supercalculateurs, ils seront probablement plutôt adaptés à la simulation des processus physiques, tels ceux étudiés en physique nucléaire ou en mécanique statistique. La simulation biologique a des exigences différentes et, en collaboration avec de grands groupes de fabricants d'ordinateurs et d'autres partenaires industriels, notre consortium adaptera une machine de ce type à la modélisation d'un cerveau. Les informaticiens du projet développeront également le logiciel permettant de construire des modèles unifiés, couvrant les différentes échelles de résolution. On pourra ainsi, selon les besoins, se focaliser sur les molécules ou sur les cellules, ou bien avoir une vue d'ensemble du cerveau.

Lorsque notre simulateur aura été mis au point, les chercheurs pourront lancer des expériences numériques sur ce cerveau artificiel, comme ils le feraient sur un spécimen biologique – avec néanmoins quelques différences essentielles.

Prenons par exemple la façon dont les scientifiques mènent leurs recherches sur les origines d'une maladie en utilisant des souris dont un gène a été neutralisé. Or élever des souris prend du temps, coûte cher, n'est pas toujours possible – la neutralisation de certains gènes entraîne la mort de l'embryon –, et c'est sans compter les

SUR LE WEB

Human Brain Project (Projet Cerveau humain) : www.humanbrainproject.eu

Projet *BrainScales* : http://brainscales.kip.uni-heidelberg.de

Institut Allen : www.alleninstitute.org

Vidéo du fonctionnement d'un réseau de neurones : ScientificAmerican.com/jun2012/brain-project

Un exemple d'application : l'épilepsie

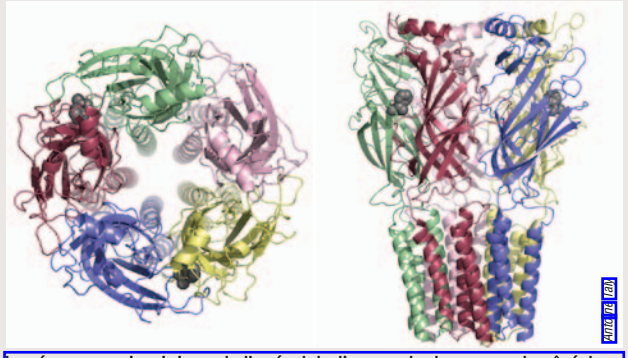
L'épilepsie est une maladie neurologique chronique qui se caractérise par des convulsions ou des pertes de conscience. Elle touche près d'une personne sur 100. Il en existe une dizaine de formes différentes, selon les mutations en jeu, les individus concernés ou les zones du cerveau lésées.

L'épilepsie est encore mal comprise, reste difficile à traiter et presque impossible à guérir. Quelle pourrait être la contribution du *Human Brain Project* ? Prenons l'exemple d'une forme d'épilepsie qui affecte le lobe frontal du cerveau. Elle est due à une mutation des gènes des récepteurs à l'acétylcholine. Cette molécule peut être libérée par un neurone et aller se lier à son récepteur *(voir l'illustration)* sur la membrane d'un neurone voisin. En temps normal, cette liaison engendre un changement de potentiel électrique à la membrane du neurone, qui transmet à son tour le signal à ses voisins.

Au niveau moléculaire, lorsque les gènes des récepteurs sont mutés, ces derniers sont malformés et la fonction est altérée. Au niveau cellulaire, la présence de centaines de récepteurs déficients sur la membrane d'un neurone perturbe la façon dont ce dernier transmet les signaux qu'il reçoit. Il se met à diminuer ou à amplifier ces signaux. La dynamique des réseaux de neurones est perturbée, tout se dérègle. Soudain, et pour des raisons encore mal connues, un grand nombre de neurones se synchronisent et déclenchent une crise, et parfois des convulsions. L'épilepsie illustre ainsi la pertinence d'un simulateur de cerveau organisé comme une poupée russe, avec plusieurs niveaux d'organisation imbriqués accessibles à l'expérimentateur.

Pour construire un tel modèle, il faut faire appel à des centaines de chercheurs. Les généticiens, en collaboration avec les biologistes moléculaires, peuvent identifier les liens entre pathologies, gènes et protéines, ainsi que la façon dont les protéines sont exprimées. Connaître le nombre de récepteurs présents à la membrane d'un neurone est crucial pour prédire son comportement.

Les théoriciens interviennent ensuite. Ils partent de la structure tridimensionnelle des protéines (analysées aux rayons X), et simulent la façon dont elles fluctuent et interagissent avec leurs partenaires moléculaires. Ces simulations permettent de quantifier l'affinité d'un ligand pour son récepteur, ainsi que ses temps caractéristiques d'activation et d'inhibition. Ces grandeurs diffèrent pour le récepteur normal et le muté, et elles donnent une indication sur l'amplitude de la réponse d'un neurone à un signal d'intensité donnée.



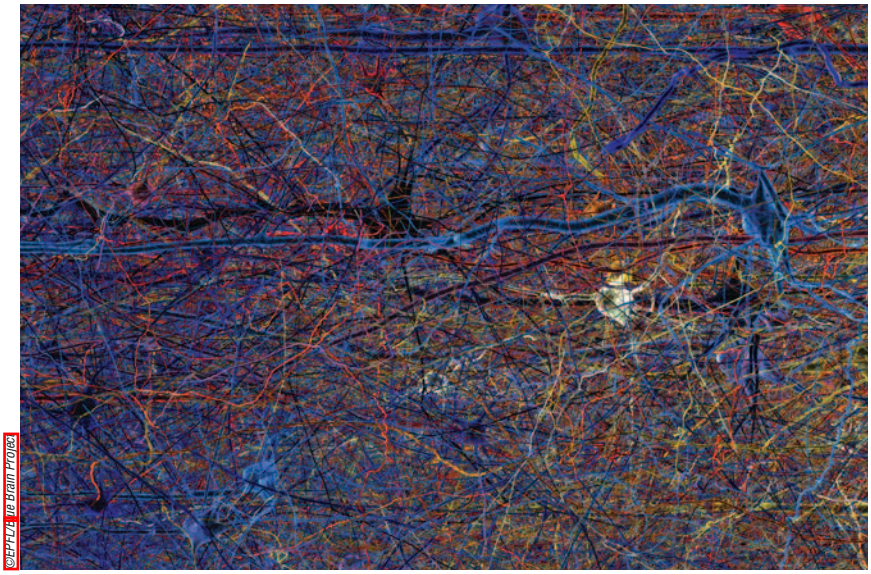
Le récepteur nicotinique de l'acétylcholine, vu de dessus et de côté. Les molécules de nicotine *(groupes de boules grises)* peuvent l'activer.

On peut alors intégrer tous ces paramètres pour simuler des milliers de récepteurs, à la surface de centaines de neurones connectés en réseaux. Un va-et-vient s'établit ensuite entre les prédictions théoriques du simulateur et les mesures expérimentales, réalisées *in vitro* ou *in vivo* par des neurobiologistes. Le modèle est affiné jusqu'à ce qu'il reproduise au mieux les processus physiologiques observés.

Le simulateur HBP permettra aussi d'identifier des cibles thérapeutiques. Après avoir testé des molécules *in vitro* sur des cultures de neurones, on pourra les introduire virtuellement dans le modèle de cerveau et mesurer leur effet à différentes échelles. Cela permettra d'effectuer un tri supplémentaire, fondé sur l'efficacité et l'absence d'effets secondaires neurologiques, et de réduire ainsi les coûts de la recherche préclinique et clinique.

Le projet HBP est bien sûr très ambitieux, mais néanmoins réalisable à plus ou moins long terme. De plus, comme dans la course à la Lune, le plus important n'est pas le but ultime, mais plutôt toutes les découvertes inattendues qui se feront en route !

Antoine Taly
chargé de recherche au CNRS, Institut de biologie physico-chimique de Paris



©EPFL/Blue Brain Project

3. VUE PARTIELLE DE LA SIMULATION d'un réseau d'un millier de cellules pyramidales (un type de neurones) dans le cadre du projet *Blue Brain*. Les cellules apparaissant en bleu sont silencieuses, celles en rouge sont actives.

problèmes éthiques soulevés par l'expérimentation animale.

Avec le cerveau *in silico*, les chercheurs pourront neutraliser un gène virtuel et en constater rapidement les conséquences sur des cerveaux d'âges différents et aux fonctionnements distincts. L'expérience pourra être répétée dans des conditions aussi nombreuses et diverses qu'ils le souhaiteront, en utilisant le même modèle, et avec un degré de précision que l'on ne peut obtenir *in vivo*.

Vers des ordinateurs neuromorphes ?

Ces simulations révéleront peut-être aussi comment l'évolution a produit un cerveau humain si adaptable, qui peut accomplir rapidement, simultanément et à grande échelle de multiples tâches, qui possède une capacité de mémoire gigantesque tout en ne consommant pas plus d'énergie qu'une ampoule électrique. Les enseignements que nous en tirerons pourront être à leur tour réinvestis dans la conception d'ordinateurs dits neuromorphes, imitant le fonctionnement des circuits cérébraux.

Aussi ambitieux le projet Cerveau humain soit-il, une caractéristique essentielle manquera aux premières simulations de cerveau complet que l'on réalisera : elles ne pourront se développer comme le fait un enfant. À partir de la naissance, le cortex se forme suite à la prolifération, à la migration puis à l'élagage des neurones et d'un processus nommé plasticité cérébrale (remodelage des connexions entre neurones), qui dépend beaucoup des expériences vécues. Nos modèles de cerveau correspondront à un âge donné, mais il faudra concevoir un dispositif qui permette au modèle de se transformer en réaction aux stimulus extérieurs.

Un projet phare pour l'Europe

Le 28 janvier 2013, la Commission européenne a désigné deux projets phares parmi six propositions : *Human Brain Project* (HBP) et *Graphene*. Chacun de ces deux projets labellisés « FET-flagship » sera financé à hauteur d'environ un milliard d'euros sur dix ans. HBP, qui débutera fin 2013, rassemble quelque 300 chercheurs, majoritairement européens, issus de 87 institutions. Il sera coordonné par l'École polytechnique fédérale de Lausanne. La France est en charge de trois des axes du projet : théorie des réseaux neuronaux, neurosciences cognitives et aspects éthiques. Un Institut européen des neurosciences théoriques, localisé en région parisienne, sera d'ailleurs créé dans le cadre de HBP.

Une étape décisive : connecter un cerveau virtuel à un corps virtuel

Une étape décisive consistera à connecter le cerveau virtuel à la représentation informatique virtuelle du corps et à le placer dans un environnement virtuel réaliste. Le simulateur pourra recevoir de l'information en provenance de l'environnement, et agir sur lui. Alors seulement, nous serons en mesure de lui enseigner certaines techniques et de vérifier s'il est « intelligent », ou d'identifier les fonctions cérébrales associées aux comportements que l'on qualifie d'intelligents.

Enfin, il ne faut pas oublier que le projet Cerveau humain soulève d'importantes questions éthiques. Il est par exemple légitime de se demander s'il serait éthique de vouloir construire un cerveau virtuel qui comporterait davantage de colonnes corticales qu'un cerveau humain, ou qui combinerait une intelligence identique à celle d'un être humain à une capacité de calcul un million de fois supérieure à celle d'un superordinateur.

L'ambition du *Human Brain Project* est grande, mais pas démesurée. L'un de ses objectifs est de lutter contre le morcellement des recherches sur le cerveau. D'autres projets vont dans le même sens. Par exemple, en 2010, l'Institut Allen de Seattle, aux États-Unis, a lancé l'Atlas Allen du cerveau humain, dont l'objectif est de répertorier tous les gènes s'exprimant dans cet organe. Le principal obstacle à de telles entreprises reste cependant le financement. En ce qui concerne le projet Cerveau humain, il vient de recevoir le feu vert de l'Union européenne. Nous en sommes convaincus, il apportera un éclairage inédit sur notre identité d'êtres humains, capables de contempler aussi bien le clair-obscur d'une toile de Caravage que d'explorer les paradoxes de la physique quantique. ■

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Numéro 56 en kiosque le 07 mars

Numéro anniversaire

Cerveau & Psycho

10 ANS de découvertes

- Émotions
- Imagerie
- Conscience
- Traitements
- Interfaces cerveau-machines
- Développement personnel

M 07656 - 56 - F: 6,95 € - RD

n°56 - Bimestriel mars-avril- 2013

www.cerveauetpsycho.fr

L'information de référence de la psychologie et des neurosciences

D'où vient l'électricité statique ?



© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Meurig Williams

Les phénomènes d'électricité statique nous sont familiers, mais comment les charges s'accumulent-elles ? Des études récentes montrent que des transferts de matière sont parfois à l'œuvre.

L'ESSENTIEL

- La nature des charges électriques qui s'accumulent à la surface des matériaux est encore mal connue.
- Certaines expériences mettent en évidence un transfert d'électrons ou d'ions d'une surface à l'autre lors d'un contact.
- D'autres études suggèrent que dans certains cas, des fragments de matière sont échangés.
- Dans le cas de matériaux identiques, l'asymétrie des frottements pourrait expliquer la présence des charges.

Chacun a fait l'expérience désagréable des décharges électriques par temps sec en hiver en marchant sur de la moquette ou en enlevant un pull-over. Ces petits désagréments du quotidien peuvent prendre plus d'importance dans certains cas. On le constate lors des éruptions volcaniques, où se produisent des éclairs dus au frottement des grains de poussière les uns sur les autres *(voir la figure 1)*. Les décharges électrostatiques préoccupent aussi les ingénieurs de la NASA, car la sécheresse qui règne sur la Lune et sur Mars favorise ces phénomènes : un astronaute qui tend le bras pour ouvrir un sas après avoir marché sur le sol sec peut provoquer une décharge, susceptible d'endommager un composant électronique critique. Il est par ailleurs possible qu'une décharge électrostatique ait été à l'origine de la catastrophe du *Hindenburg* en 1937 ; l'étincelle aurait enflammé l'hydrogène gazeux contenu dans ce dirigeable. Cependant, l'électricité statique n'est pas toujours un inconvénient : on la met à profit dans des appareils répandus tels que les photocopieuses et les imprimantes laser.

Lorsqu'on frotte deux objets l'un contre l'autre et qu'on les sépare, des charges électriques apparaissent à leur surface. On parle de charges triboélectriques, ou encore de charges de contact ou charges statiques. La triboélectricité était déjà connue des Grecs anciens : le philosophe Thalès de Milet découvrit ainsi qu'en frottant de l'ambre sur de la laine, on créait un tel phénomène. D'ailleurs, le terme « triboélectrique » signifie en grec « frotter de l'ambre ».

Le phénomène a cependant été très peu étudié. Quelle est la nature des particules chargées qui s'accumulent à la surface des matériaux ? Par quel mécanisme migrent-elles dans la zone de contact ? Depuis quelques années, des chercheurs de diverses disciplines s'intéressent à ces questions. Cet article présentera les différents phénomènes et scénarios possibles à l'origine de l'effet triboélectrique. Trois hypothèses sont envisagées quant à la nature des charges échangées ; il pourrait s'agir d'échanges d'électrons, d'ions ou

1. LE VOLCAN ISLANDAIS EYJAFJÖLL, lors de son éruption en 2010, a expulsé dans l'atmosphère de grandes quantités de poussière. Le frottement entre grains de poussière conduit à l'accumulation de charges et crée des décharges d'électricité statique, visibles sous forme d'éclairs.

© Arctic-Images/CORBIS

de petites quantités de matière entre les deux éléments frottés. Plusieurs expériences récentes, que nous allons décrire, tentent de répondre à ces questions et de donner une description du phénomène.

L'une des raisons pour lesquelles les progrès se sont fait attendre est le manque de motivation : la plupart des travaux sur la triboélectricité visent le développement de nouvelles techniques, contexte où la compréhension des mécanismes d'échange de charges n'est pas perçue comme indispensable.

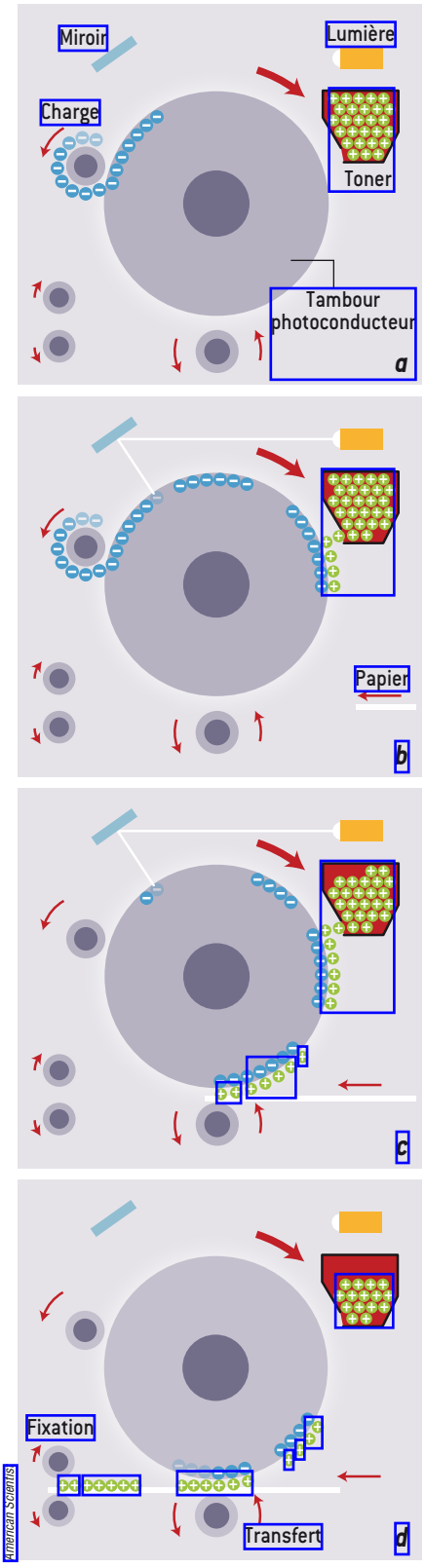
Les photocopieuses et les imprimantes laser figurent parmi les principales applications de la triboélectricité. Ces dispositifs ont été introduits par la Société *Xerox* et développés aussi par *Kodak (voir l'encadré page ci-contre)*. Dans une photocopieuse, le toner (formé de microsphères en plastique contenant l'encre) et la surface d'un cylindre, le « tambour », acquièrent par triboélectricité des charges opposées *(voir la figure 2)*. La lumière réfléchie par les parties blanches de la feuille à copier neutralise certaines zones du tambour photoconducteur. En effet, celui-ci devient un meilleur conducteur électrique quand il est exposé à la lumière et, par conséquent, les zones illuminées se déchargent. Le toner se fixe uniquement sur les parties chargées du tambour, qui dépose les billes d'encre sur le papier. Une unité chauffante fait fondre les billes et fixe l'encre sur la feuille.

Un domaine délaissé

On a d'abord pensé qu'une compréhension des mécanismes fondamentaux de la triboélectricité faciliterait la conception des machines. Mais on a fini par délaisser ces recherches quand on a obtenu des appareils performants, alors qu'on ignorait toujours tout des transferts d'électrons et d'ions à l'œuvre dans les mécanismes triboélectriques.

Les premières études du phénomène se sont inspirées des connaissances acquises sur les métaux. L'échange de charges par contact, dans ce cas, résulte du transfert d'électrons. Au sein d'un métal, une partie des électrons sont libres, ce qui facilite leur transfert. Mais ce modèle s'applique-t-il aux matériaux isolants, dépourvus d'électrons libres ?

On a trouvé des preuves de transfert d'électrons ainsi que d'ions dans des conditions expérimentales particulières, mais ces données sont peu nombreuses et souvent contradictoires. Récemment, de nouvelles



2. LE TAMBOUR D'UN PHOTOCOPIEUR est photoconducteur et chargé négativement *(a)*. Les zones chargées du tambour qui sont éclairées deviennent neutres et ne sont pas imprimées *(b)*. Du toner, de charge positive, est attiré vers les zones négatives du tambour *(c)*, puis transféré sur le papier *(d)*.

recherches ont montré que l'échange de charges peut aussi résulter du transfert physique de minuscules quantités de matériau de surface d'une substance à l'autre. On commence tout juste à comprendre comment cela se déroule au niveau moléculaire. Plusieurs mécanismes semblent à l'œuvre, en fonction de la composition des matériaux et des conditions expérimentales dont les rôles restent à éclaircir.

Un transfert d'électrons libres ou d'ions ?

Considérons le contact entre un métal et un polymère isolant. On avait observé que la densité de charges créée sur le polymère est proportionnelle à l'énergie nécessaire pour arracher des électrons au métal. Ce résultat était présenté comme la preuve d'un mécanisme de transfert d'électrons *(voir la figure 3)*. Cependant, cette relation n'est pas toujours vérifiée, ce qu'on attribuait au grand nombre de variables impliquées et à la possibilité que plusieurs mécanismes simultanés soient en jeu.

Pour les transferts de charge entre deux isolants, les physiciens ont développé des théories inspirées du mécanisme de transfert d'électrons, sans préciser la nature des charges. Ces théories n'ont eu qu'un succès limité dans le calcul de l'énergie nécessaire pour arracher des charges aux isolants. Elles en ont eu davantage pour expliquer que, dans certains cas, l'échange de charges est limité par le champ électrique créé. En d'autres termes, comme l'accumulation de charges crée un champ électrique, elle est limitée par la rigidité diélectrique de l'air ambiant, qui correspond à la valeur maximale du champ électrique que l'air peut supporter avant que ses molécules soient ionisées. Au-delà de cette limite, l'air devient conducteur et une décharge électrique se produit.

L'approche des physiciens s'est révélée insuffisante et c'est dans d'autres domaines, en particulier en chimie, que de nouvelles idées ont émergé. Dans les années 1990, deux décennies après la découverte par la Société *Kodak* que des sels d'ammonium amélioraient la charge électrique de l'encre en poudre des photocopieuses, l'idée des ions mobiles s'est imposée comme une explication possible de l'effet triboélectrique *(voir la figure 4)*. Selon cette conception, un ion mobile est libre de passer d'une surface à une autre parce qu'il a un « contre-ion », de charge opposée, qui est soit beaucoup

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

plus gros et moins mobile, soit attaché à un polymère. Mais le moteur de la séparation des charges ioniques reste à élucider.

Un échange de charges peut aussi se produire quand les polymères ne contiennent pas d'ions mobiles, auquel cas un mécanisme supplémentaire doit intervenir. En 2008, Logan McCarty et George Whitesides, de l'Université Harvard, ont proposé l'hypothèse que dans la mince couche d'eau qui sépare les deux polymères, les molécules d'eau se dissocient et les ions hydroxyde (OH^-) s'adsorbent sur l'une des surfaces.

Reste que des expériences réalisées en 2011 par Bartosz Grzybowski et ses collègues de l'Université Northwestern ont montré que l'échange de charges peut avoir lieu entre deux polymères non ioniques en l'absence totale d'eau. Cela indique donc l'existence d'un mécanisme distinct à la fois de celui proposé avec les ions hydroxyde et de celui par transfert d'ions. L'ensemble des diverses observations suggère que différents mécanismes sont en jeu et se manifestent selon les matériaux ou les conditions du contact.

Des échanges de matière

Dans l'expérience de B. Grzybowski, quel pouvait être le mécanisme en jeu s'il ne s'agissait ni d'électrons ni d'ions ? Un troisième scénario est apparu ces dernières années, grâce aux outils d'analyse électrique, chimique et électrochimique des surfaces. Il correspond à un transfert de matière et de charges entre les surfaces lors de l'application d'une force mécanique importante (contacts impliquant une pression, un frottement ou un cisaillement).

On sait depuis longtemps que le contact d'un polymère avec un autre matériau peut avoir pour effet de transférer une partie du polymère d'une surface à l'autre. En 2011, à l'aide de la microscopie à sonde de Kelvin (une technique d'analyse à haute résolution des propriétés électriques d'une surface), B. Grzybowski et son équipe ont prouvé que quand deux polymères sont pressés l'un contre l'autre, puis séparés, le transfert de matériau peut s'accompagner d'un échange de charges à l'échelle nanométrique. Depuis des siècles, on supposait que les charges acquises par contact sur chaque surface étaient homogènes, l'une des surfaces étant uniformément positive et l'autre uniformément négative. L'équipe de B. Grzybowski a montré que, bien que chaque surface développe une charge nette soit négative, soit positive, elle présente en fait une mosaïque aléatoire de régions de taille nanométrique et diversement chargées, la charge nette étant égale à la somme algébrique des charges de chacune de ces régions *(voir la figure 6)*. Cette découverte signifie que davantage d'éléments chargés sont échangés qu'on ne le supposait auparavant : environ 100 fois plus.

Diverses techniques de spectroscopie et d'analyse chimique des surfaces ont révélé la présence d'espèces oxydées, dont on pense qu'elles sont responsables de la charge. Ce mécanisme de transfert de matériau a représenté une avancée décisive en cela qu'il était le premier à s'écarter des scénarios de transfert d'électrons ou d'ions. En outre, une description du mécanisme permet de comprendre le déroulement du transfert de charges. En pressant deux polymères

L'AUTEUR



Meurig WILLIAMS a travaillé sur la triboélectricité au Centre de recherche Webster de la Société *Xerox* à New York. Il détient 11 brevets américains.

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

Xerox et *Kodak*, un duel de brevets

Les premiers photocopieurs *Xerox* ont été introduits dans les années 1960. Ils reposent sur le procédé nommé électrophotographie, breveté en 1942 par Chester Carlson. Celui-ci proposa son brevet à *Kodak* qui refusa, et le vendit finalement à *Xerox*.

Pour fonctionner, le photocopieur est composé d'un cylindre dont certaines zones ont été chargées électriquement. Le toner, encre sous forme de poudre, est aussi chargé, de signe opposé à celui du cylindre. Ainsi, seules les régions chargées du cylindre attirent l'encre, laquelle est ensuite déposée sur le papier.

Le toner est chargé par le contact avec des « porteurs », des billes de 100 micromètres de diamètre enduites en partie de polymères. Les compositions du toner et du porteur sont choisies pour obtenir le meilleur effet triboélectrique possible.

La conception des premiers photocopieurs *Xerox* était empirique, sans compréhension théorique de la triboélectricité, avec des résultats de qualité médiocre. Au début des années 1970, quand l'auteur s'est intéressé au phénomène, certaines innovations ont permis d'améliorer le rendu des copies. Mais, à la même époque, la Société *Kodak* avait déposé plusieurs brevets dans ce domaine d'activité. Au sein de *Xerox*, une équipe fut constituée (dont faisait partie M. Williams) pour étudier la possibilité que *Kodak* se lance sur ce marché. M. Williams avait en charge l'étude du toner et avait conclu que *Kodak* était prêt à entrer sur le marché des photocopieurs, contre l'avis général de l'équipe.

En 1975, *Kodak* lançait son premier copieur, l'*Ektaprint*, avec une qualité d'impression supérieure. Pourquoi une telle différence ? La technologie adoptée par *Kodak* était très différente de celle utilisée par *Xerox*. Mais le point crucial identifié par l'auteur était la nature des porteurs dans le toner. Le choix de *Kodak* a porté sur des charges positives dans le toner, par opposition à des charges négatives chez *Xerox*. En effet, les chimistes de *Kodak* ajoutaient des sels d'ammonium quaternaire (constitué d'un cation d'azote lié à quatre groupes hydrocarbonés) qui permettaient de mieux engendrer et contrôler les charges positives dans le toner. Le résultat était une qualité d'impression bien supérieure.



© Shutterstock/Maksym Bondarchuk

Rapidement, *Xerox* se rendit compte qu'il fallait utiliser la technologie développée par son concurrent. L'étude précise du système de *Kodak* conduisit *Xerox* à déposer plusieurs brevets directement inspirés de ceux de *Kodak* entre 1980 et 1987.

Cependant, *Kodak* n'a jamais contesté ces brevets, fondés sur ses propres inventions, qui ont permis à *Xerox* de fabriquer les photocopieurs de meilleure qualité et ainsi dominer le marché.

Dès lors que *Xerox* avait mis au point des appareils fournissant une bonne qualité de copies, la motivation pour étudier les mécanismes de la triboélectricité prit fin.

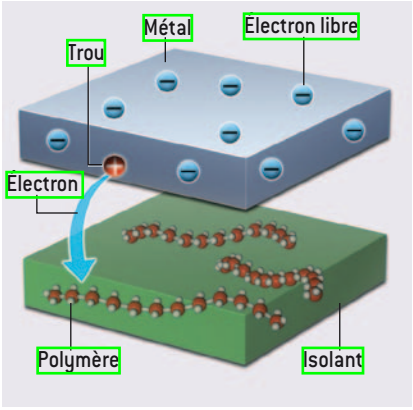
l'un contre l'autre, puis en les séparant, de petits agrégats de matière passent d'une surface à l'autre. Pour que ce processus ait lieu, des liaisons chimiques covalentes doivent se rompre, ce qui formerait des radicaux libres, constitués de fragments de polymères, aux deux sites de la rupture. Les radicaux libres sont des atomes ou des molécules ayant des électrons non appariés, ce qui les rend chimiquement très réactifs, et on pense qu'ils réagissent avec l'oxygène et l'eau ambiants pour former les espèces chargées, par un échange d'électrons lors de réactions d'oxydoréduction.

En 2012, Fernando Galembeck et ses collègues de l'Université de Campinas, au Brésil, ont fait franchir à ce mécanisme de transfert de matériau une étape supplémentaire. Du téflon (ou polytétrafluoroéthylène) et du polyéthylène ont été pressés et tordus l'un contre l'autre. Après séparation, l'équipe a trouvé des domaines ou motifs chargés positivement et négativement, analogues à ceux qu'avait signalés l'équipe de B. Grzybowski. Les fragments de matériau extraits des surfaces au moyen de solvants ont été identifiés comme étant des polymères ionisés. La plupart des résidus de téflon étaient de charge négative, et la plupart des résidus de polyéthylène de charge positive.

Une mosaïque de zones diversement chargées

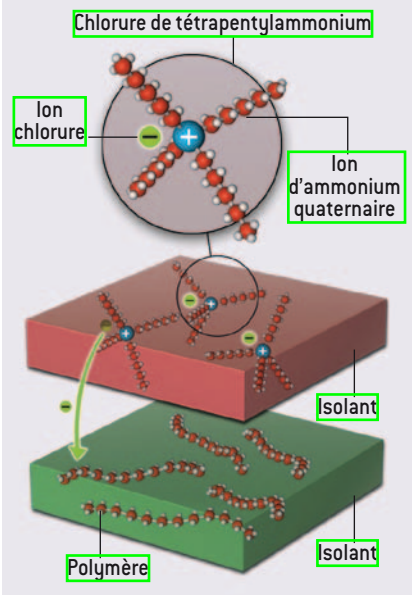
L'équipe de F. Galembeck a proposé le mécanisme suivant : la température élevée aux points de contact, où il y a frottement, plastifie (diminue la rigidité) ou fait fondre la couche superficielle des deux polymères, qui se mélangent *(voir la figure 5)*. Les forces de cisaillement brisent quelques polymères, lesquels deviennent des radicaux libres. Le transfert d'électrons des radicaux de polyéthylène aux radicaux de téflon (plus électronégatifs) transforme ces radicaux libres en polymères ionisés respectivement positifs et négatifs. Or ces polymères ionisés sont des molécules amphiphiles, c'est-à-dire qu'elles ont une partie hydrophile et une autre hydrophobe. Du fait de cette propriété amphiphile et parce que le téflon et le polyéthylène ne sont pas miscibles, les polymères ionisés se disposent en petits réseaux formant en surface une mosaïque de zones chargées positivement ou négativement.

Une comparaison des travaux des équipes de F. Galembeck et de B. Grzybowski illustre le rôle primordial de l'échange des charges, lequel dépend des propriétés du polymère et de la nature des contacts. La contribution de chacun des facteurs que F. Galembeck a identifiés dans le mécanisme de transfert de matériau dépend, entre autres, des propriétés viscoélastiques, topographiques et chimiques des polymères utilisés.



bruno bourgeois

3. L'ÉCHANGE DE CHARGES entre un métal et un matériau isolant correspond à l'extraction d'électrons libres du métal.



bruno bourgeois

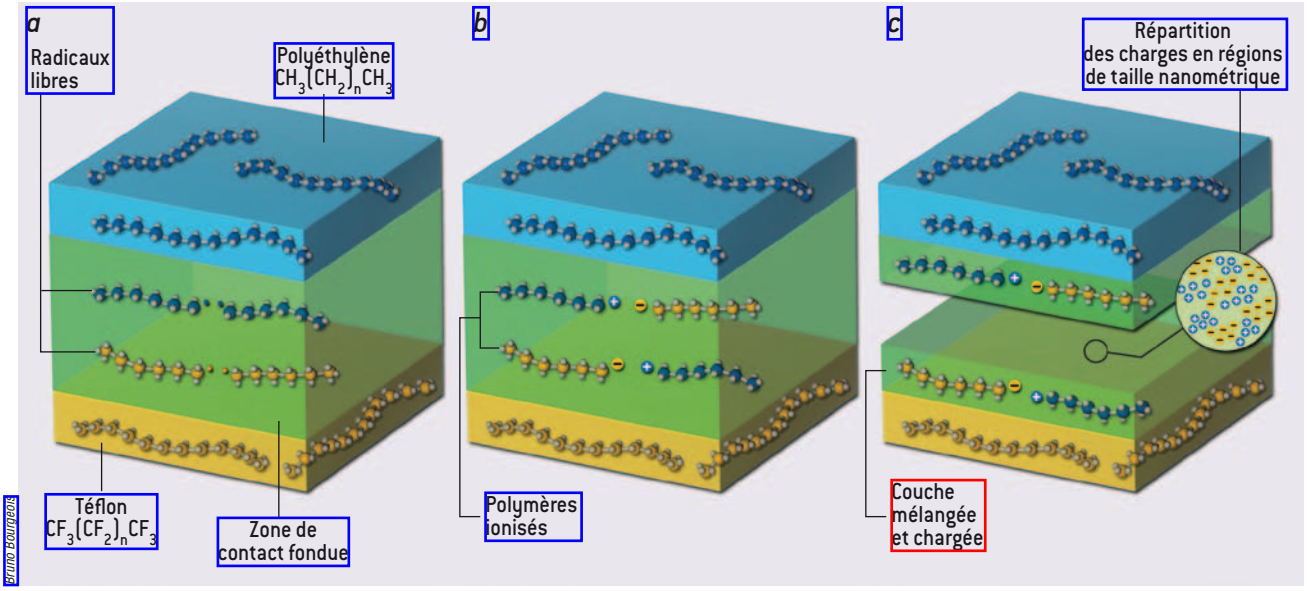
4. L'ÉCHANGE D'IONS intervient entre deux isolants. Ici, l'ion chlorure d'un sel – du chlorure de tétrapentylammonium – est transféré au second matériau. Les ions d'ammonium quaternaire sont trop volumineux pour être échangés.

Des transferts qui dépendent du contact et des matériaux

Par exemple, on peut s'attendre à ce que l'effet de plastification soit moins important ou la quantité de matériau fondu soit plus faible dans les légers contacts que dans les contacts à cisaillement ou frottement intenses, en raison des températures inférieures atteintes. Des propriétés inhérentes aux polymères peuvent aussi intervenir sur la fusion, telle la température de transition vitreuse, stade où les propriétés d'écoulement du matériau sont modifiées sans qu'il y ait changement de la structure moléculaire. Le matériau fond plus s'il est souple et élastique que s'il est rigide.

La nature des molécules est cruciale. Ainsi, la facilité avec laquelle les liaisons se rompent différerait entre le polydiméthylsiloxane (PDMS), un polymère à squelette de silice et oxygène, employé par B. Grzybowski, et les polymères à ossature de carbone utilisés par F. Galembeck. La rupture de chaînes d'un polymère mou tel que le PDMS peut se produire à des températures basses, dans des contacts à faible pression et faible frottement, les chaînes polymériques s'enchevêtrant à l'interface et se brisant au moment de la séparation. Ces enchevêtrements sont accentués dans les polymères à squelette de silice et oxygène par la présence d'oligomères – des fragments de polymère. Ces substances sont en équilibre dynamique : elles sont en permanence modifiées par la rupture et la formation des liaisons silice-oxygène, sans altération du polymère. Dans le mécanisme de transfert de matériau, l'apport d'énergie mécanique au cours du contact des polymères entraîne facilement la rupture de ces chaînes et la création de charges électrostatiques.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013



5. L'ÉCHANGE DE MATÉRIAU est un scénario récemment mis en évidence. Au point de contact de deux matériaux isolants, ceux-ci fondent, les polymères se mélangent et des liaisons covalentes se rompent *(a)*. Des radicaux libres (molécules ayant des électrons non appariés) se forment, puis des réactions d'oxydoréduction conduisent à un échange d'électrons non appariés. Dans le cas du téflon et du polyéthylène, le premier, plus électrophile, attire les électrons et se charge négativement *(b)*. Les polymères ionisés se répartissent alors en régions de taille nanométrique. Après séparation, les surfaces des matériaux sont recouvertes d'une couche non uniforme et globalement chargée *(c)*.

Il reste cependant difficile de définir un mécanisme unique pour la formation des charges dans les contacts entre deux polymères et toutes les pistes continuent d'être explorées. Ainsi, en 2008, Chongyang Liu et Allen Bard, de l'Université du Texas à Austin, et indépendamment Toribio Otero, de l'Université polytechnique de Carthagène en Espagne, ont avancé qu'un mécanisme de transfert d'électrons était en jeu. Ils observaient, après séparation des surfaces, des réactions électrochimiques qui ne peuvent être déclenchées que par des électrons.

Leur interprétation a été contestée en 2011 par Silvia Piperno et ses collègues, de l'Institut Weizmann en Israël, qui expliquaient ces observations en supposant un mécanisme de transfert de matériau contenant des espèces polaires – c'est-à-dire des molécules non chargées mais dont les nuages électroniques sont inégalement répartis. La même année, Nikolaus Knorr, du Laboratoire Sony de science des matériaux de Stuttgart en Allemagne, a observé dans certains contacts entre deux polymères des transferts liés à des molécules polaires.

Le phénomène triboélectrique semble donc reposer sur de multiples mécanismes et les charges en jeu sont de natures variées. Les différents scénarios posent encore de nombreuses questions. Parmi celles-ci, je me suis interrogé sur le lien possible entre l'apparition des charge triboélectriques et la profondeur caractéristique jusqu'à laquelle les charges pénètrent dans le matériau. Je me suis demandé si cette profondeur varie en fonction de la nature des contacts. Malgré la diversité des contacts testés expérimentalement, ce facteur n'avait jamais été étudié en tant que variable principale du phénomène.

LES MÉCANISMES DE TRANSFERT d'électrons, d'ions et de matière peuvent avoir lieu simultanément, pour certains matériaux et des conditions de contact particulières.

Dans les nombreuses études de la charge triboélectrique des polymères, on n'a pas pris en compte le fait que la composition et la morphologie des polymères varient avec la profondeur.

J'ai étudié la profondeur de pénétration de la charge dans une série de polymères où la surface du matériau était de composition (déterminée par spectroscopie photoélectronique par rayons X) différente de celle de la masse du polymère. La charge triboélectrique était déterminée en faisant tomber en cascade de petites billes (de 100 et 250 micromètres de diamètre) de métal nu ou recouvertes de polymère sur des films de polymère inclinés et moulés sur des plaques d'aluminium – une méthode dont la précision et la reproductibilité étaient bien établies. Les contacts par rebonds étaient légers et brefs, chacun d'une durée estimée à 10^{-5} seconde.

Les résultats ont montré que la charge de contact entre deux polymères ne fait intervenir que les premières couches moléculaires, alors qu'entre un métal et un polymère, des couches plus profondes sont en jeu. On peut supposer que dans le premier cas (contact polymère-polymère), l'échange de charges se fait en surface sous la forme d'ions. Dans le second cas (contact métal-polymère), des électrons pénétreraient par effet tunnel dans la masse du matériau. Il en résulterait une relation entre le mécanisme de charge et la profondeur de pénétration de la charge, ce qui est corroboré par le fait qu'on sait que les ions s'adsorbent sur les surfaces des polymères, tandis que les électrons s'y enfouissent.

À la lumière des nouveaux travaux suggérant qu'un transfert de matériau peut être à l'œuvre, j'ai rapporté que les résultats évoqués ci-dessus peuvent tout aussi bien être interprétés selon ce scénario. En effet, le contact entre un film de polymère et une bille de métal dur et rugueux met en jeu une force plus importante qu'avec une

bille revêtue d'un polymère, plus mou et plus lisse. On peut alors supposer qu'une couche plus profonde du film de polymère est impliquée.

Ce qui précède montre que les mécanismes de transfert d'électrons, d'ions et de matériau peuvent avoir lieu simultanément, pour certains matériaux et des conditions de contact particulières. Pour les contacts métal-isolant, le mécanisme de transfert d'électrons a été établi. Dans le cas d'un contact entre deux isolants, la question est de savoir si le transfert de matériau est le seul mécanisme ou le mécanisme prédominant dans tous les contacts.

Il existe d'autres idées pour expliquer les observations. L'une d'elles suppose l'existence d'un seuil de force ou d'énergie appliquées, au-dessous duquel trop peu de matériau est transféré pour entraîner un échange de charges. Selon une autre conception, on a un continuum de types de contact : les transferts d'électrons, d'ions et de matériau ont tous lieu, mais ce dernier prend d'autant plus l'ascendant que la force ou la pression appliquée augmentent.

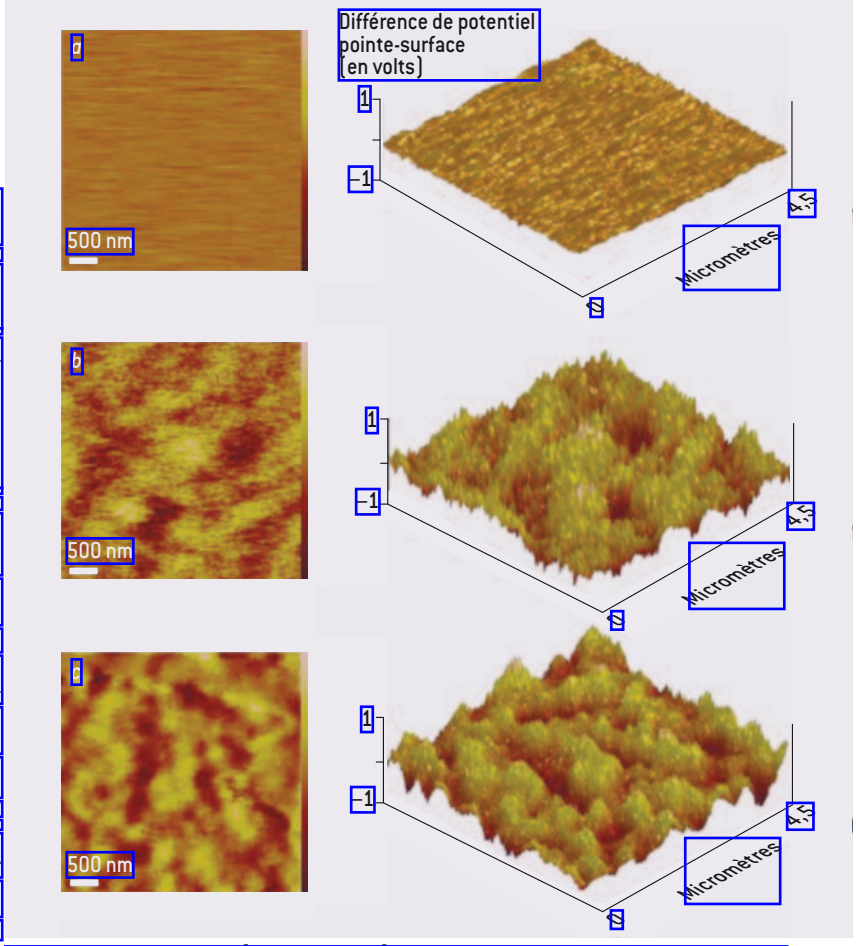
À cet égard, les données quantitatives établies par K.-Y. Law et ses collègues en 1995 pour le transfert d'ions sont intéressantes. Ces chercheurs ont mélangé avec précaution des particules de toner revêtues d'un sel de césium et des particules recouvertes de polymère. Ils ont montré que l'échange de charges est proportionnel à l'intensité de transfert du césium et que cette relation dépend également du temps de brassage.

Cela suggère un mécanisme de transfert d'ions césium plutôt qu'un échange de matériau. Les ions mobiles, par leur nature même, se transfèrent plus facilement que les fragments de polymère, qui nécessitent une rupture de liaison. Cela signifierait-il que les forces mécaniques entre les particules de toner et les autres étaient trop faibles pour qu'il y ait simultanément transfert de fragments de polymère ? Y a-t-il une hiérarchie des mécanismes de charge, de telle sorte que plusieurs mécanismes puissent contribuer à la charge en fonction des conditions expérimentales ? En procédant avec des particules métalliques au lieu des particules revêtues de polymère, l'équipe de K.-Y. Law a observé les mêmes corrélations entre le transfert de charges et le transfert d'ions ; cela indique que le transfert d'ions mobiles, quand il est présent, est privilégié par rapport au transfert d'électrons.

Matériaux identiques, mais charges distinctes

Un phénomène continue d'intriguer les expérimentateurs : la possibilité de charge de contact entre matériaux de composition identique. Cette possibilité est en contradiction avec la vieille et trop simpliste idée de « série triboélectrique », qui classe les matériaux selon leur propension à se charger positivement ou négativement. Un matériau se charge positivement par rapport à tous les matériaux qui le précèdent dans la série, ce qui sous-entend qu'une différence de composition est nécessaire pour qu'il y ait charge de contact.

Pourtant, une telle charge se produit quand des polymères identiques sont soit pressés, soit frottés l'un contre l'autre, symétriquement ou asymétriquement (le frottement asymétrique de films de



6. LE TRANSFERT D'AGRÉGATS NANOMÉTRIQUES, mis en évidence par microscopie à sonde de Kelvin, entre des surfaces de polymères mis en contact, puis séparés. Avant le contact, le matériau est relativement lisse *(a)*. Le contact avec un polymère identique *(b)* ou différent *(c)* produit divers motifs de transfert.

Tous droits réservés © Pour la Science sous licence Association Américaine pour l'Avancement de la Science

Recycler des déchets par séparation triboélectrique

Depuis une vingtaine d'années, le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques devient une question importante. Le recyclage du plastique pose un problème particulier car, après extraction des métaux, il est difficile de séparer les différents types de plastiques, opération pourtant nécessaire pour leur réutilisation.

La séparation électrostatique est une solution envisagée. Ses développements récents donnent des résultats encourageants. Dans un séparateur triboélectrostatique classique, les mélanges de plastiques sous forme de granules, de taille inférieure à cinq millimètres, sont chargés par effet triboélectrique. Ils sont placés soit dans des dispositifs produisant des contacts répétés entre les granules et les parois du dispositif – des goulottes oscillantes, des cylindres rotatifs –, soit dans des lits fluidisés, systèmes de soufflerie permettant un brassage des granules.

Une fois les granules chargés, un champ électrique est appliqué. Il est créé entre deux plaques métalliques écartées verticalement de 10 à 20 centimètres et reliées à un générateur de tension de plusieurs dizaines de kilovolts. Les forces exercées par le champ électrique dirigent les granules chargés vers des compartiments distincts du collecteur de produits.

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique récemment breveté par l'Université de Poitiers et la Société APR2 réalise le tri sélectif des mélanges de matériaux isolants granulaires dans un lit fluidisé en présence d'un champ électrique orienté perpendiculairement à la direction de l'air de fluidisation.

L'originalité de ce dispositif est la simultanéité des deux opérations : d'une part, la charge triboélectrique des granules par collisions dans le lit fluidisé, d'autre part, la séparation électrostatique de ces granules dans le champ électrique intense créé par deux bandes transporteuses métalliques connectées à deux générateurs de haute tension continue, de polarités respectivement positive et négative.

Une fois qu'un granule est suffisamment chargé, il est attiré vers l'électrode de polarité opposée, bande transporteuse qui l'évacuera vers le collecteur de produits. Les granules non chargés ne peuvent pas quitter la zone de charge, ce qui garantit la pureté des produits collectés.

Par ailleurs, chaque granule ne reste dans la zone de charge que le temps minimum nécessaire à l'acquisition d'une charge suffisante pour qu'il soit attiré par l'une des électrodes, ce qui assure aussi l'optimisation du débit des matériaux traités. En fonction des conditions environnantes et de l'état des matériaux granulaires, le temps de charge varie. Le débit peut être adapté en fonction du temps nécessaire à la charge. Le pilote industriel de cette installation est capable de traiter une quantité de 600 kilogrammes de déchets par heure.

Lucien Dascalescu
Institut PPRIME, UPR 3346, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA

polymère correspond à la situation où une petite zone d'un polymère est en contact avec une zone plus étendue de l'autre). Le signe de la charge dépend des matériaux en jeu.

J'ai proposé un mécanisme d'échange de charges entre matériaux identiques en m'appuyant sur l'idée que plus la force appliquée est intense, plus la matière transférée peut être profonde. Avec un frottement asymétrique, les forces appliquées à chaque surface sont inégales, si bien que du matériau issu de différentes profondeurs serait transféré. Comme la composition des polymères varie souvent avec la profondeur, cette asymétrie entraînerait le transfert de matériau de différentes compositions, ce qui donnerait des charges nettes de différents signes dans les surfaces séparées.

Il est aussi possible que, selon les caractéristiques de la force mécanique appliquée, il y ait de petites différences dans les réactions chimiques. Il pourrait alors en résulter, sur les deux surfaces, des compositions en polymères ionisés suffisamment différentes.

Ce scénario se comprend aisément pour un frottement asymétrique. Dans le cas d'une action symétrique, de petites asymétries involontaires suffiraient à obtenir une composition asymétrique. Ce mécanisme s'appliquerait aussi à un contact entre matériaux différents et contribuerait à une meilleure compréhension du mécanisme général de transfert de matériau. Des différences de dureté pourraient aussi conduire à un transfert asymétrique de matériau.

La charge triboélectrique de matériaux de composition identique se produit par exemple avec les particules en suspension, comme dans les tempêtes de sable, les fumées des éruptions volcaniques et la manipulation industrielle de poussières fines. Là encore, ces phénomènes pourraient résulter de contacts asymétriques dus à des différences de taille des particules, les grosses particules se chargeant positivement et les petites négativement. Le scénario exact reste à déterminer.

Une meilleure compréhension

Les expériences de ces dernières années ont permis de progresser dans la compréhension du phénomène triboélectrique. Par ailleurs, il y a un besoin croissant de créer des matériaux qui ne se chargent pas par contact, notamment à cause de la miniaturisation de l'électronique, qui rend les circuits de plus en plus sensibles aux dégâts d'une décharge, même faible. Les nombreuses questions que soulève encore la triboélectricité suggèrent qu'une approche pluridisciplinaire, mettant en œuvre à la fois physique et chimie, pourrait bientôt porter ses fruits. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. W. Williams, **Triboelectric charging of insulating polymers – some new perspectives,** *AIP Advances*, vol. 2, 010701, 2012.

T. A. L. Burgo *et al.*, **Triboelectricity : macroscopic charge patterns formed by self-arraying ions on polymer surfaces,** *Langmuir*, vol. 28(19), pp. 7407-7416, 2012.

H. T. Baytekin *et al.*, **The mosaic of surface charge in contact electrification,** *Science*, vol. 333, pp. 308-312, 2011.

L. Calin et L. Dascalescu, **Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre,** Brevet FR2943561, 2010.

L. S. McCarty et G. M. Whitesides, **Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces,** *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47, pp. 2188-2207, 2008.

Sur El Hierro, une île des Canaries, des dispositifs innovants sont mis en place pour la gestion de la biodiversité, de l'eau et de l'énergie.

El Hierro,



Alain Gioda, Carlos Recio et Luis Santana

Les îles abritent quelque 600 millions de personnes dans le monde. Les doter d'un fonctionnement écologique est donc un enjeu majeur. En outre, elles constituent des systèmes plus fermés que les continents et peuvent servir de laboratoire pour tester diverses initiatives en matière de développement durable. Leur isolement est aussi un inconvénient, notamment parce que leur réseau électrique est parfois impossible à raccorder à celui du continent.

C'est le cas de l'île d'El Hierro, un petit bout de terre aride d'environ 270 kilomètres carrés (soit deux fois et demie la superficie de Paris), dans l'archipel des Canaries. Les habitants de l'île ont longtemps été d'une extrême pauvreté. De nombreux émigrants s'y embarquaient clandestinement pour l'Amérique ou s'installaient sur les îles voisines de Tenerife et Grande Canarie, surtout pendant les sécheresses. Aussi l'île n'abritait-elle que 7 200 habitants au début des années 1990. Toutefois, moins de 20 ans plus tard, la population est montée jusqu'à 11 000 habitants (avant de diminuer un peu avec la crise économique espagnole). Cela correspond à la plus forte progression démographique des Canaries durant cette période. Pourtant, ni tourisme de masse ni boom économique n'en sont la cause. Comment expliquer qu'El Hierro ait soudain attiré de nombreux immigrants ?

Sous l'impulsion de Tomás Padrón, ingénieur électricien et figure politique locale, l'île s'est dotée d'un ensemble unique, à la fois pour la préservation de la biodiversité et pour la production d'énergie : dès cette année, l'électricité y sera essentiellement produite de façon renouvelable et sans émission de dioxyde de carbone, cela sans qu'un raccordement à un réseau continental permette de gérer l'intermittence des énergies renouvelables ; ce sera la seule île au monde dans ce cas. En outre, des dispositifs de captage de l'eau du brouillard y ont été installés. El Hierro est-elle un modèle reproductible à grande échelle sur les îles et sur les continents ?

Depuis 1796, date du premier recensement dans les Canaries, la population d'El Hierro a seulement doublé. Elle augmente au maximum de 20 pour cent en période touristique, soit moins de 2 500 touristes par mois. Ces chiffres sont à comparer à la multiplication par 13 de la population des Canaries depuis 1796 et aux 10,3 millions de touristes accueillis en 2011 par l'archipel. À la Grande Canarie, les aménagements ont été si importants qu'il ne subsiste que un pour cent de la forêt originelle. En outre, le milieu est globalement aride dans l'archipel, de sorte que sa biodiversité est fragile. À El Hierro, l'absence d'explosion démographique a permis une bonne conservation du milieu et des activités traditionnelles.

Une réserve de la biosphère

En conséquence, l'île a été classée réserve de la biosphère par l'Unesco en 2000. Ce statut désigne une zone conciliant la préservation de la biodiversité et les activités humaines. Il est moins contraignant que celui de parc national, notamment pour les activités humaines : ainsi, toute l'île est incluse dans la réserve, mais elle se partage entre des zones dites centrales, où les

© Pour la Science - n° 425-Mars 2013

île écologique modèle ?



activités sont très contrôlées, et des zones tampons et de transition, pour favoriser un développement économique durable.

Sur d'autres îles des Canaries, plus boisées (La Gomera) ou plus montagneuses (Tenerife), des parcs nationaux ont été créés. El Hierro, en revanche, n'est pas dotée d'une richesse faunistique et floristique exceptionnelle, menacée par la pression démographique et qui aurait justifié de tels parcs. Seul un lézard géant *(Gallotia simonyi)* y était rarissime – il l'est moins aujourd'hui, grâce à son élevage local. L'originalité d'El Hierro était alors une bonne intégration de l'homme dans la nature, notamment à travers des activités telles que l'agriculture, l'élevage et la pêche, pratiquées de façon traditionnelle. L'impact du tourisme et de l'industrie sur les paysages était nul à la fin des années 1990, fait unique aux Canaries.

Un autre élément a été déterminant pour que le programme MAB *(Man and Biosphere programme)* de l'Unesco accepte le dossier, déposé à la fin des années 1990 : une gestion durable de la zone montagneuse et, en particulier, la plantation d'arbres « fontaines » recueillant l'eau du brouillard.

Selon l'histoire locale, corroborée par les récits des explorateurs, un tel arbre poussait jadis dans les hautes terres d'El Hierro, à environ 1 000 mètres d'altitude, mais il a été arraché par un ouragan en 1610. Nommé garoé par les indigènes, il était situé au fond d'un vallon, de sorte que le brouillard, poussé par le vent, y déposait ses gouttelettes sur les feuilles. L'eau ruisselait jusqu'à terre, où elle était recueillie dans des puits. L'arbre était vénéré par les premiers habitants de l'île, les Bimbaches, qui le considéraient comme leur ancêtre totémique. Après la conquête de l'île par les Espagnols au XV[e] siècle, il a été dessiné sur les armoiries d'El Hierro.

L'ESSENTIEL

- Dispositifs captant l'eau du brouillard, véhicules électriques, système hydro-éolien destiné à la fois à la production d'électricité et à l'irrigation… L'île d'El Hierro expérimente des mesures écologiques diverses.
- Dès cette année, elle produira son électricité presque entièrement grâce à des sources renouvelables.
- Ce modèle est surtout applicable aux îles. Il sera plus difficile à mettre en œuvre dans les régions industrielles ou densément peuplées.

Des arbres fontaines puisant dans le brouillard

Cet arbre sacré était un *Ocotea foetens*, un laurier endémique des Canaries. Si celui vénéré par les Bimbaches a été arraché, d'autres spécimens poussent encore sur l'île.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

En 1948, lors d'une grande sécheresse, Zósimo Hernández Martín (1920-2004), le chef des gardes forestiers, replanta un de ces lauriers à l'ancien emplacement du garoé, en récupérant une bouture d'un autre arbre. Il y est toujours présent et a retrouvé un rôle symbolique, ayant notamment donné son nom à la radio locale. L'eau du brouillard y est à nouveau recueillie dans les anciens puits creusés avant la colonisation espagnole.

On s'est également aperçu que de nombreux autres arbres de l'île, d'espèces variées, pouvaient faire office d'arbres fontaines, en raison d'une position géographique privilégiée (située notamment face au vent, qui pousse le brouillard sur les feuilles). Depuis les années 1960, des systèmes de bassins et de canalisations ont été aménagés sous plusieurs dizaines de ces arbres pour récupérer l'eau. Dans les années 2000, des dispositifs nommés attrape-brouillards, consitués de filets tendus sur des structures arborescentes en acier inoxydable, ont aussi été installés : ils visent à recueillir l'eau du brouillard dans les endroits sans arbres, telles les crêtes exposées au vent *(voir l'encadré page 56)*.

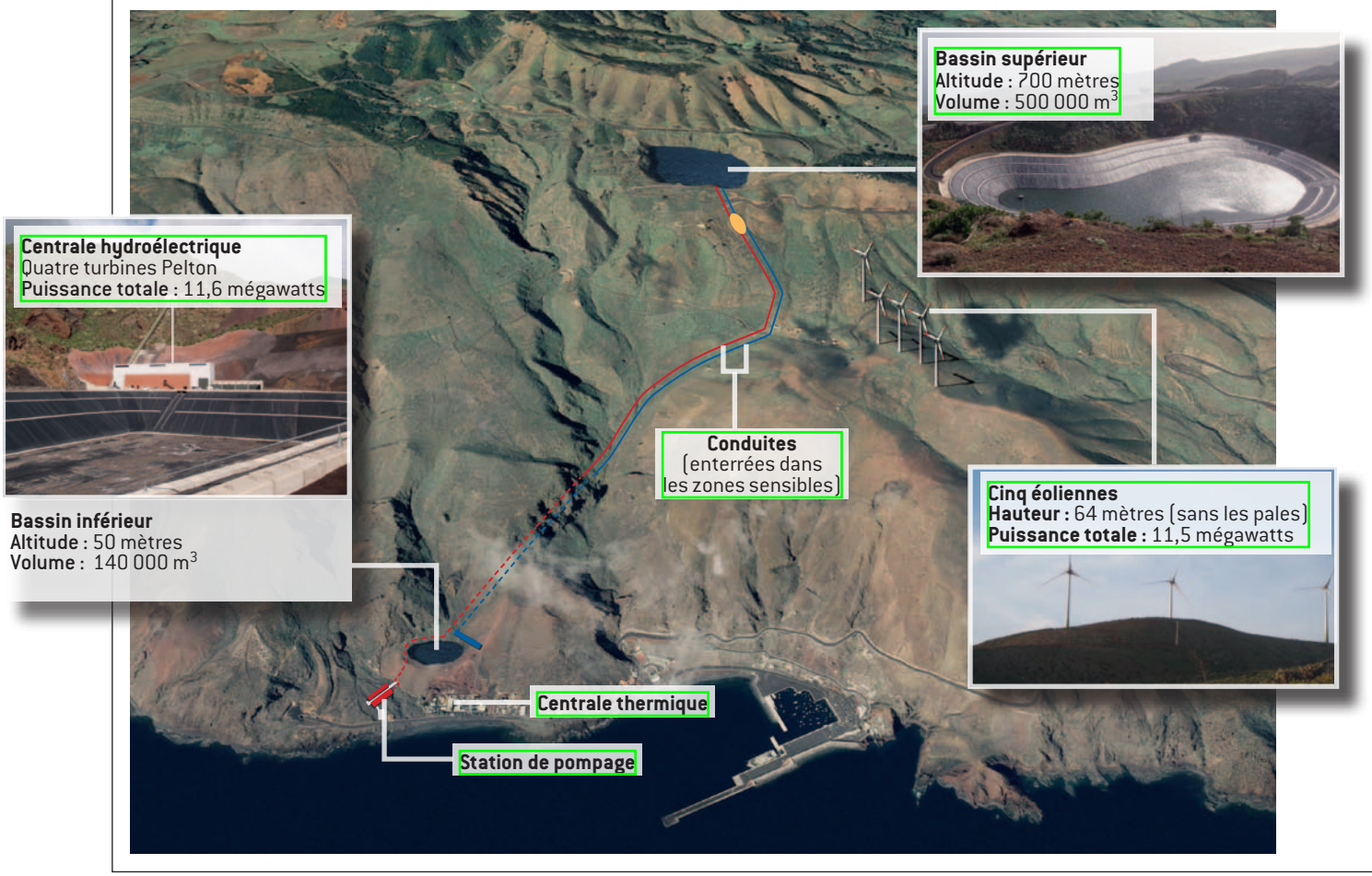
Au total, ces installations ne collectent que quelques mètres cubes d'eau par jour. L'impact est donc pour l'instant symbolique, mais il pourrait augmenter.

De 2006 à 2008, un financement européen nommé *Interreg*, rattaché aux FEDER (Fonds européen de développement régional), a permis d'évaluer le potentiel en eau du brouillard. L'étude utilisait un réseau de stations météorologiques, dont les données étaient transmises par radio, pour extrapoler les quantités recueillies par un attrape-brouillard à l'échelle de l'île. On estime que si toutes les zones brumeuses de l'île (répresentant environ 10 pour cent de sa surface, soit 2 450 hectares) étaient couvertes d'attrape-brouillards, le volume d'eau recueilli serait de 34,3 à 49 millions de mètres cubes par an (moins une petite partie qui s'évapore). L'apport du brouillard pourrait donc être important, même si l'on ne le collectera pas sur dix pour cent de la superficie.

Vers le tout renouvelable

Grâce aux financements associés au statut de réserve et aux fonds FEDER, plusieurs nouveaux projets écologiques ont été développés, tels l'agrotourisme et le recyclage des déchets. En outre, l'île s'est tournée vers des solutions énergétiques durables. Si toute l'électricité est encore d'origine thermique – elle est issue d'une centrale brûlant du diesel, importé par bateau –, cela changera en 2013. Une installation comprenant une Station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP) marine connectée à cinq éoliennes est en effet en cours de mise en service. La STEP comprend deux réservoirs situés à des altitudes différentes et reliés par des conduites ; en période de surproduction (lorsque le vent est fort ou qu'il y a peu

ÉLECTRICITÉ ET IRRIGATION : UNE INSTALLATION UNIQUE AU MONDE



© Pour la Science - n° 425-Mars 2013

de demande), une partie de l'électricité des éoliennes fait tourner des pompes qui envoient l'eau vers le réservoir supérieur ; quand on manque d'électricité (lorsque le vent tombe), l'eau redescend vers le réservoir inférieur en faisant tourner des turbines hydroélectriques.

Les éoliennes devraient fournir l'essentiel de l'électricité de l'île *(voir l'encadré ci-dessous)*, la STEP permettant de gérer l'intermittence du vent. Aujourd'hui, elle est dimensionnée pour fournir toute l'électricité de l'île durant deux jours sans vent, une durée qui sera peut-être allongée à huit jours grâce au creusement d'un second réservoir inférieur. La centrale thermique sera maintenue en veille et redémarrée si le vent tombe pendant plus longtemps. Divers projets sont à l'étude pour parvenir au tout renouvelable (biomasse, centrale solaire, exploitation de l'énergie des vagues...).

Bien que les STEP soient des installations assez classiques, le système d'El Hierro est inédit. Il n'existe qu'une autre STEP marine, au Japon, à Okinawa, et la mer y joue le rôle de réservoir inférieur. En revanche, à El Hierro, il existe bien un bassin inférieur, construit 50 mètres au-dessus du niveau de la mer et d'une capacité de 140 000 mètres cubes. Bien qu'il soit alimenté par l'eau de mer, celle-ci sera dessalée au préalable par un procédé dit d'osmose inverse : en exerçant une pression sur un compartiment d'eau salée, on la force à traverser un filtre qui ne laisse passer que les molécules d'eau ; là encore, l'électricité nécessaire proviendra des éoliennes, ou du turbinage hydraulique si le vent est insuffisant. Ainsi, de l'eau douce circulera dans tout le circuit, ce qui permettra d'utiliser une partie de celle du réservoir supérieur pour l'irrigation et d'éviter la corrosion du système par l'eau de mer.

Par ailleurs, le réservoir supérieur est installé dans un cratère de volcan éteint, dont le fond et les parois ont été rendus étanches par un film en PVC. L'installation n'a pas nécessité de construire un barrage, ce qui évite le risque de rupture de digue.

Éviter l'émission de milliers de tonnes de gaz à effet de serre

La mise en place des nouvelles solutions énergétiques permettra d'économiser la quasi-totalité des 6 000 tonnes de diesel consommées annuellement par la centrale thermique. Outre une économie de plus de deux millions d'euros par an, cela représente un bénéfice écologique substantiel, la centrale émettant de grandes quantités de gaz à effet de serre. Par an, les émissions représentent 18 700 tonnes de dioxyde de carbone (CO_2), 100 tonnes de dioxyde de soufre (SO_2), 400 tonnes d'oxydes d'azote (les NOx), etc.

La question des transports a aussi été examinée, afin de remplacer les 6 400 véhicules recensés sur l'île (hors camions) par des véhicules électriques, notamment grâce à des incitations financières. Ce plan est à ses débuts. Quelque 35 stations seront installées pour recharger les batteries – trois sont déjà opérationnelles. Selon les estimations, huit gigawattheures par an suffiront pour alimenter ces nouveaux véhicules et près de 5 000 tonnes d'émissions de dioxyde de carbone seront

Une installation hydro-éolienne originale est en cours de démarrage à El Hierro. Hors transport, la puissance nécessaire à l'alimentation de l'île est estimée entre 2,5 et 7,5 mégawatts, selon l'heure. Cinq éoliennes, d'une puissance de 2,3 mégawatts chacune, ont été installées à 500 mètres d'altitude sur un versant exposé au vent. La puissance totale installée est donc de 11,5 mégawatts. Le facteur de capacité local (égal à la production réelle d'une éolienne sur un an divisée par sa production théorique maximale) étant d'environ 40 pour cent, les éoliennes fourniront un peu plus de 40 gigawattheures par an. La consommation annuelle de l'île s'établissait à 43 gigawattheures en 2011 et devrait se stabiliser, de sorte que les éoliennes pourront fournir l'essentiel de l'électricité.

Une station de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP) palliera les sautes de vent, grâce à deux bassins situés à des altitudes différentes : en période de surproduction, l'eau est pompée jusqu'au bassin supérieur, et lorsque le vent tombe, elle redescend jusqu'au bassin inférieur en faisant tourner des turbines hydroélectriques. Les conduites reliant les deux bassins sont enterrées quand elles traversent des zones protégées. C'est la seule station marine au monde qui fonctionnera avec de l'eau douce. Celle-ci proviendra d'une usine de dessalement de l'eau de mer et servira aussi à l'irrigation. La centrale thermique, auparavant seule source d'électricité de l'île, restera disponible en ressource d'appoint. L'ensemble de ces installations ne couvre que dix hectares et se situe dans la partie la plus escarpée, aride et déserte de l'île.

Corona de viento, El Hierro, S. L. Gioda

LES AUTEURS


Alain GIODA est chercheur à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et expert pour l'Union internationale de conservation de la nature (UICN).


Carlos RECIO est directeur technique de l'entreprise *Natural Aqua Canarias*, aux Canaries.


Luis SANTANA, météorologue, travaille pour le Département de l'Agriculture *(Agrocabildo)* de Tenerife, aux Canaries.

BIBLIOGRAPHIE

L. Balaguer *et al.*, **Forest restoration in a fog oasis,** *PLOS One*, vol. 6, n° 8, pp. 1-9, 2011.

O. Daniélo, **El Hierro, l'île électrique,** *Systèmes solaires*, n° 201, pp. 88-97, 2011.

J. Navarro Hevia *et al.*, **Hidrología de conservación de aguas,** Universidad de Valladolid, 2009.

A. Gioda *et al.*, **Fountain trees in the Canaries islands,** *Advances in Horticultural Sciences*, vol. 9, pp. 112-118, 1995.

© Pour la Science - n° 425-Mars 2013

Certaines régions sont arides et pourtant baignées par le brouillard. Celui-ci reste au niveau du sol, bloqué par des surpressions atmosphériques en altitude ; les gouttelettes en suspension n'y sont pas assez grosses pour retomber en pluie. En outre, à El Hierro, l'eau pénètre vite en profondeur dans les sols volcaniques et le peu qui reste en surface s'évapore rapidement, en raison du vent intense.

Les régions les plus intéressantes pour la collecte de l'eau du brouillard sont les zones arides brumeuses et exposées au vent, qui présentent un fort dénivelé, permettant de faire circuler l'eau recueillie dans des canalisations suivant la pente. On en trouve sur les côtes des continents, en Afrique, au Moyen-Orient (aux environs de la mer Rouge), et en Amérique, ainsi que sur certaines îles (Cap-Vert, Canaries, Madère…). Dans le Nord désertique du Chili, le brouillard véhiculerait 10,3 milliards de mètres cubes d'eau par an, selon une estimation de l'Université catholique de Santiago. Toutefois, les poussières issues de la pollution minière, où des exploitations sont à ciel ouvert, y limitent fortement la qualité des eaux du brouillard. Sur El Hierro, le volume d'eau disponible serait de 34,3 à 49 millions de mètres cubes par an. L'estimation est fondée sur la quantité d'eau récoltée par un attrape-brouillard, extrapolée à l'échelle de l'île grâce à divers paramètres météorologiques mesurés en plusieurs endroits (vitesse du vent, densité et durée annuelle du brouillard).

Les premiers systèmes de collecte ont été développés par des agronomes portugais sur les îles du Cap-Vert, dans les années 1940. Ils se sont inspirés de collecteurs naturels, tels les agaves, utilisés par les paysans locaux. Le principe est de dresser des filets dans le ciel, grâce à des structures de formes et de tailles variées, pour recueillir les gouttelettes de brouillard en suspension. Dans des conditions favorables, le rendement est de l'ordre de 20 à 30 litres par mètre carré de filet et par jour. Cette ressource est intermittente et peut avoir différents usages, telle une aide à la reforestation. L'eau est parfois stockée dans des réservoirs divers, ou directement canalisée vers les cultures pour l'irrigation. Le système en fonctionnement le plus important est celui d'Atiquipa, au Sud du Pérou, qui irrigue les cultures et les pépinières de 60 familles.





évitées si tous ceux de l'île sont remplacés. Attention toutefois au « coût écologique » de ce remplacement : fabriquer une voiture électrique entraîne l'émission d'environ cinq tonnes de dioxyde de carbone. Le coût écologique du remplacement est ainsi de plus de 30 000 tonnes de dioxyde de carbone, auquel s'ajoute le coût du transport des véhicules jusqu'à l'île ! Il faudra donc plusieurs années pour que le bilan soit positif en termes d'émissions…

Les pratiques écologiques mises en œuvre à El Hierro pourront-elles être généralisées ? Cela semble possible, mais en partie seulement.

Des réserves de la biosphère ont été créées un peu partout. En octobre 2012, on en comptait 610 dans le monde, dont 11 en France. El Hierro fut notamment précédée par la Guadeloupe et Ouessant. Ce statut n'est pas cantonné aux îles et est compatible avec celui de parc national (dans les cas de double statut, la réserve peut être gérée de façon centralisée ou localement). Ainsi, le parc national des Cévennes, créé en 1970, est devenu une réserve de la biosphère en 1985. Comme El Hierro, les Cévennes étaient un espace abandonné et négligé, qui a su concilier conservation de la biodiversité, développement économique et social et maintien des valeurs culturelles. Est-ce possible partout ? Cela reste à déterminer, car il sera plus difficile de transformer des régions densément peuplées ayant un lourd passé industriel, ou qui se sont développées grâce au tourisme de masse.

SUR LE CONTINENT,
il sera plus difficile de faire ce saut dans le développement durable, notamment en raison d'une industrie et d'un tourisme de masse.

Qu'en est-il des solutions énergétiques mises en place à El Hierro ? Des STEP sont en service depuis le début du XX^{e} siècle. Il s'agit d'un système éprouvé et efficace, même si les phases de pompage et de turbinage entraînent des pertes, de l'ordre de 20 pour cent, voire plus. Elles peuvent être construites aussi bien sur les îles que sur le continent, le critère déterminant étant le relief. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) évalue la capacité mondiale des STEP à 150 gigawatts, dont 100 gigawatts sont déjà installés. De nombreux sites restent donc à équiper, en particulier sur les îles montagneuses d'origine volcanique : de grands espaces surplombant la mer pourraient y accueillir des STEP marines.

En France, les principaux sites de montagne sont déjà équipés, sauf dans la vallée de la Durance. En revanche, de nombreuses STEP marines pourraient être construites. Un projet piloté par EDF vise à l'installation d'une STEP marine en Guadeloupe : exploitant un dénivelé de 50 mètres, elle produirait 50 mégawatts et stockerait un gigawattheure. Un autre projet, moins avancé, concerne La Réunion.

Toutefois, les STEP marines d'El Hierro et d'Okinawa, ainsi que celles en cours d'étude, ne sont adaptées qu'aux petites demandes, inférieures au gigawatt. Selon l'ingénieur François Lempérière, ancien président du CFGB (Comité français des grands barrages), des STEP marines de grande puissance (un à deux gigawatts) seraient aussi possibles, en se fondant sur des réservoirs gigantesques et des dénivelés faibles.

Le transport électrique est une bonne solution à El Hierro, car l'île est petite et

© Pour la Science - n° 425-Mars 2013

DU BROUILLARD

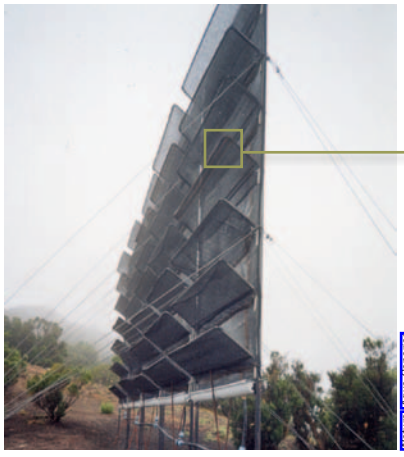




Des plantes variées sont utilisées pour capter l'eau du brouillard depuis des siècles : des lauriers à El Hierro *(à gauche, le laurier replanté à l'emplacement de celui qu'utilisaient les premiers habitants de l'île)*, des agaves sur les îles du Cap-Vert *(au centre)*... Autrefois recueillie dans des puits, l'eau est désormais souvent collectée par des systèmes de canalisation *(à droite)* et de réservoirs.



J. Montarde, VEA-Hid



Nature Aqua Canaria



Les attrape-brouillards sont des filets qui capturent l'eau du brouillard, en suspension dans l'air. La forme de la structure de soutien peut être simple, comme à Atiquipa, au Pérou *(à gauche)*, ou plus élaborée. Celle d'El Hierro *(à droite)* est étudiée pour empêcher le vent de décoller les gouttes qui se sont formées. L'eau ruisselle ensuite sur les filets, puis est collectée par divers systèmes.

montagneuse, de sorte que sa topographie impose des déplacements courts et à faible vitesse. Les voitures électriques, qui sont encore peu autonomes mais dotées d'une bonne accélération au démarrage, y sont bien adaptées. Leur généralisation sera plus difficile sur le continent, où les déplacements peuvent être longs et rapides, notamment sur les autoroutes.

De façon générale, l'utilisation concomitante de plusieurs énergies renouvelables devrait permettre de pallier en partie leur intermittence. Il faudra aussi développer des moyens de stockage. Une solution envisagée pour stocker l'électricité est la technique du *Vehicule-to-Grid* (littéralement du véhicule au réseau), ou V2G : l'électricité est stockée dans les batteries des voitures à l'arrêt lorsque la production est excédentaire et disponible pour le réseau en cas de demande. En juin 2012, ENDESA, la compagnie qui fournit El Hierro en électricité, a déjà inauguré une station-service électrique réversible de ce type à Malaga, en Andalousie, et va en ouvrir une seconde à La Graciosa, une autre île des Canaries, en 2014 ou 2015. Cela devrait aussi venir à El Hierro. En revanche, en France, les constructeurs de voitures freinent l'adoption de ce type de dispositif, craignant notamment une usure accélérée des batteries.

El Hierro est passée en 50 ans du stade rural au stade postindustriel avec des inconvénients mineurs, d'où une bonne acceptation du nouveau modèle par la population. Sur le continent, il sera plus difficile de faire ce saut dans le développement durable, notamment en raison d'une industrie et d'un tourisme de masse exigeant une forte offre énergétique.

Un modèle surtout applicable aux îles

Si certaines solutions pourront être développées à plus grande échelle, le modèle mis en œuvre à El Hierro est donc pour l'instant surtout applicable aux îles. Un projet légèrement antérieur est celui de l'île danoise de Samsø (114 kilomètres carrés et 4 400 habitants), où toute l'électricité est d'origine éolienne et solaire et où l'essentiel du chauffage est assuré par la biomasse (bois). Les habitants commencent à s'y doter de véhicules électriques. Notons que si cette île produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme, elle est connectée avec le réseau électrique du continent, afin de gérer l'intermittence de la production. El Hierro sera donc la seule à la gérer de façon autonome, par l'intermédiaire de sa STEP. Quelques autres îles sont en train d'adopter un fonctionnement plus écologique.

L'exemple d'El Hierro montre qu'il est possible d'enclencher une transition énergétique et écologique sans nuire au développement, même en temps de crise économique aiguë. Le chômage n'y est pas plus élevé qu'ailleurs aux Canaries – soit de l'ordre de 30 pour cent, un chiffre qui a triplé depuis le début de la crise économique espagnole en 2008 –, malgré une éruption volcanique et des séismes qui ont interrompu le tourisme et la pêche depuis fin 2011. Au contraire, les nombreux travaux créent des emplois et l'imbrication inédite de techniques vertes engendrera un savoir-faire précieux.

À l'occasion du sommet de la Terre en 2012 à Rio, le WWF (Fonds mondial pour la nature) a mis en garde contre de nombreux problèmes : « bombe » démographique et énergétique, réchauffement climatique, gâchis de l'eau, perte accélérée de la biodiversité… Sur tous ces points, El Hierro propose des solutions. ■

Les secrets des météorites primitives

Alan Rubin

L'analyse microscopique des chondrites, les plus vieilles roches du Système solaire, laisse entrevoir ce qu'était la nébuleuse solaire peu avant la formation des planètes.



L'ESSENTIEL

- Les météorites chondritiques sont constituées du même matériau qui a formé les planètes et les astéroïdes.
- Il existe plusieurs classes de chondrites, différant par leur structure et leur composition.
- Leur analyse renseigne sur leur région d'origine dans la nébuleuse solaire et sur la répartition des poussières dans le Système solaire en formation.
- Ce nuage de poussières ressemblait à celui qui entoure les étoiles de type T Tauri.

1. GEMMES CACHÉES : sur cette micrographie en lumière polarisée d'une mince tranche de chondrite, les « joyaux » sont des chondres, de minuscules billes de cristaux de silicate.

DR/Dreamstime

Les astronomes étudient des objets si éloignés – étoiles, galaxies, quasars – qu'ils ne les observent que sous forme d'images sur des écrans d'ordinateur ou d'ondes lumineuses projetées par des spectrographes. Mes collègues et moi, qui travaillons sur les planètes et les astéroïdes, avons beaucoup de chance. Nous avons parfois l'occasion de toucher des fragments de ces corps célestes et de les manipuler pour leur faire révéler leurs secrets les plus intimes. Lors de mes études d'astronomie, j'ai passé de nombreuses nuits glaciales à observer au télescope des amas d'étoiles et des nébuleuses, et je peux aujourd'hui témoigner qu'il est plus gratifiant émotionnellement de tenir dans ses mains un éclat d'astéroïde : c'est un lien tangible avec quelque chose qui, autrement, resterait lointain et abstrait.

Les fragments d'astéroïdes qui me fascinent le plus sont les chondrites, lesquelles représentent plus de 80 pour cent des météorites qui tombent sur Terre. Les autres sont issus d'objets plus massifs, sièges de réactions physico-chimiques ayant modifié la composition des roches au fil des temps géologiques. Au contraire, les chondrites, qui doivent leur nom aux chondres qu'elles contiennent presque toutes (de minuscules perles de matériau fondu, souvent plus petites qu'un grain de riz) se sont formées durant les premiers stades du Système solaire. Quand on examine au microscope des lames minces de chondrites, elles se révèlent d'une grande beauté, qui n'est pas sans rappeler des tableaux de Vassily Kandinsky ou d'autres peintres abstraits.

Les plus anciennes roches

Les chondrites sont les plus anciennes roches que les scientifiques aient touchées. La datation par isotopes radioactifs montre qu'elles ont plus de 4,5 milliards d'années, c'est-à-dire qu'elles datent d'avant la période de formation des planètes, quand le Système solaire n'était encore qu'une nébuleuse, un disque de gaz et de poussières turbulent et en rotation. Leur âge et leur composition indiquent qu'elles sont constituées des matériaux primordiaux à partir desquels les planètes, les lunes, les astéroïdes et les comètes se sont assemblés. La plupart des chercheurs pensent que les chondres se sont formés au cours d'événements violents, quand des agrégats de poussières riches en silicates ont fondu et formé des gouttelettes. Ces dernières se sont rapidement solidifiées et agglomérées avec des poussières, des métaux et autres matériaux, formant des chondrites qui ont poursuivi leur croissance et sont devenues des astéroïdes. Les collisions violentes entre astéroïdes ont entraîné une fragmentation, certains débris finissant par tomber sur Terre sous forme de météorites. Ces dernières sont des témoins de la naissance du Système solaire, et constituent nos liens les plus directs avec les conditions dans lesquelles la planète s'est formée.

Mais comme les paléontologues le savent bien, trouver des fossiles n'est que la première étape de la reconstitution historique. Les découvertes doivent être replacées dans un contexte. Et il a été difficile de retrouver le lieu de naissance des différentes chondrites et l'environnement qui a été leur berceau, parce que nous avions peu de données sur les structures détaillées de ces roches. Il y a quelques années, j'ai fait une analyse systématique de toutes les propriétés physiques des chondrites, comblant beaucoup de lacunes. En exploitant ces données, j'ai dressé une carte approximative de la structure de la nébuleuse dont ont émergé ces chondrites.

La répartition de poussières sur la carte, bien que grossière, ressemble à celle de certains des systèmes stellaires T Tauri. Ces objets ont une luminosité qui varie de façon erratique et sont enveloppés d'atmosphères étendues, si bien qu'on pense qu'il s'agit d'étoiles jeunes. Beaucoup sont entourés de disques de poussières. La concordance de la carte de poussières de la nébuleuse solaire avec la structure de certains systèmes T Tauri conforte l'idée que ces derniers sont les précurseurs de systèmes solaires similaires au nôtre. Les chondrites donnent donc non seulement accès à notre propre passé lointain, mais aussi à d'autres systèmes stellaires jeunes de la Voie lactée. Ainsi, en élucidant la physique de ces systèmes, les scientifiques comprendront mieux les processus qui ont conduit à la formation des astéroïdes et planètes du Système solaire.

Une classification en douze groupes

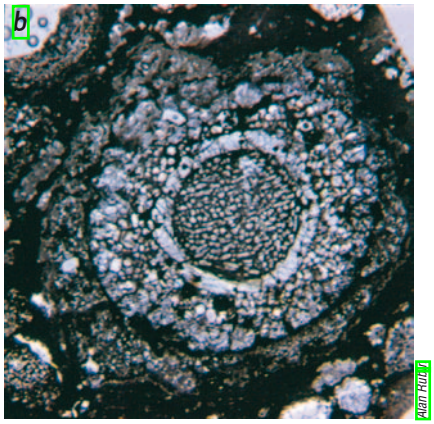
Afin d'explorer le Système solaire primordial *via* l'analyse des chondrites, les planétologues doivent d'abord répertorier les propriétés de ces roches. Les chercheurs ont classé les chondrites en douze groupes principaux répartis en quatre classes ; ils se distinguent par des caractéristiques telles que leur composition chimique, les proportions des différents isotopes (éléments dont les noyaux ont le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons), le nombre, la taille et le type de leurs chondres, et enfin la quantité de matrice fine, qui sert de ciment aux différents composants des chondrites. Les caractéristiques distinctes de chaque groupe laissent penser que les chondrites retrouvées sur Terre doivent provenir d'astéroïdes différents.

L'AUTEUR



Alan RUBIN est géochimiste à l'Université de Californie à Los Angeles. Il est spécialiste des météorites chondritiques.





2. DANS LES CHONDRITES CARBONÉES *(a)*, les chondres ont tendance à être gros et complexes. Vu au microscope, un chondre *(b)* contient un noyau de silicate (bille centrale de quelques centaines de micromètres de diamètre revêtue d'une mince coque), entouré d'une coquille secondaire *(la bande large)* et d'une couche externe nommée enveloppe ignée *(la zone noire irrégulière)*.

Les chercheurs ont imaginé de nombreux modèles pour expliquer la formation initiale des différents groupes de chondrites. Ces modèles font intervenir des facteurs tels que la turbulence du gaz de la nébuleuse, les champs magnétiques et les différentes vitesses avec lesquelles les particules se sont agencées dans le plan nébulaire médian. Mais en définitive, est restée la conclusion vague que les divers types de chondrites s'étaient formés dans des « conditions différentes ».

Espérant me faire une meilleure idée de ce qu'étaient ces conditions, j'ai commencé en 2009 à compiler les études antérieures pour construire un tableau recensant les propriétés essentielles des principaux groupes de chondrites. J'avais l'intention de rechercher des corrélations entre les propriétés, susceptibles d'éclairer l'histoire de chaque groupe. Mais à la fin de ce travail de synthèse, mon tableau était à moitié vide ; peu de chercheurs, semblait-il, avaient jugé intéressant de récolter ce type de données.

Il ne me restait plus... qu'à le faire moi-même. J'ai ainsi examiné au microscope 91 lames minces de 53 météorites appartenant aux différents groupes chondritiques. De nombreux minéraux deviennent transparents lorsque leur épaisseur est égale ou inférieure à 30 micromètres ; il est alors possible d'étudier leurs propriétés optiques. Les lames minces ont révélé des chondres de tailles, de formes, de structures et de couleurs fort variées. Certes, l'analyse de milliers de chondres peut être fastidieuse, mais en m'astreignant à cet exercice de « microscopie astronomique », je suis parvenu à remplir mon tableau en quelques mois. Sans résoudre totalement l'énigme des « conditions différentes », mes résultats précisaient les idées que l'on avait sur l'origine, dans la nébuleuse solaire, des différents groupes de chondrites.

Intéressons-nous tout d'abord à une classe rare de chondrites, les chondrites à enstatite, qui représentent environ deux pour cent de toutes les météorites chondritiques recueillies sur Terre. Ces roches doivent leur nom à leur principal constituant minéral, l'enstatite ($MgSiO_3$). Il existe deux formes de chondrites à enstatite, EH (H pour *high*) et EL (L pour *low*), selon qu'elles contiennent beaucoup ou peu de fer. Les abondances des isotopes de l'azote, de l'oxygène, du titane, du chrome et du nickel de ces chondrites ressemblent à celles de la Terre et de Mars. Ces chondrites à enstatite se sont probablement formées à l'intérieur de l'orbite de

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

L'histoire géologique des chondrites

Comme le souligne Alan Rubin, les météorites sont des objets fascinants. Ils permettent aux planétologues de toucher au quotidien un monde qui peut paraître éloigné et abstrait. En particulier, les chondrites, morceaux d'astéroïdes formés il y a 4,567 milliards d'années et peu modifiés depuis, sont une fenêtre sur la naissance et les premiers instants du Système solaire. Mais le message qu'elles nous délivrent est parfois complexe à déchiffrer.

En effet, certaines chondrites ont connu des modifications lors de l'histoire géologique des astéroïdes. La décroissance radioactive d'éléments tel l'aluminium 26 a abouti à des températures de quelques dizaines ou centaines de degrés Celsius pendant plusieurs milliers d'années. Cet épisode thermique a pu, par exemple, modifier la composition de la matière carbonée et des minéraux, mais aussi estomper le contour des chondres. De la glace d'eau était initialement présente au sein de certains astéroïdes. Sous l'effet de la température, elle a fondu quelques millions d'années après l'accrétion des astéroïdes. Les fluides aqueux résultants ont alors interagi avec la roche, aboutissant notamment à la production de phases minérales hydratées (par exemple des phyllosilicates ou des carbonates). Ces épisodes d'altérations aqueuse et thermique ont ainsi plus ou moins modifié la composition chimique, la pétrographie et la minéralogie initiales des chondrites : ils brouillent les pistes !

Les chondrites sont au cœur de nombreux débats, concernant notamment l'origine de la matière carbonée et de l'eau qu'elles contiennent, les implications potentielles pour la planète Terre, les liens entre astéroïdes et comètes, et entre le Système solaire et le milieu interstellaire environnant. Il est donc indispensable d'étudier l'histoire géologique des astéroïdes avant de pouvoir interpréter les caractéristiques actuelles des chondrites en termes de propriétés de la nébuleuse solaire.

De nouvelles météorites, telles Tagish Lake, Paris, Sutter's Mill, ont intégré nos collections. Aucune ne satisfait les caractéristiques des groupes jusqu'à maintenant définis et décrits par Alan Rubin. Nous attendons beaucoup de l'étude de ces objets particuliers, mais aussi des futurs échantillons d'astéroïdes rapportés sur Terre par des missions spatiales telles Hayabusa-2, OSIRIS-REx, et des futures météorites collectées lors des campagnes annuelles organisées par la NASA en Antarctique par exemple. Nous espérons y découvrir de nouvelles informations sur la formation du Système solaire et sur les astéroïdes peuplant la ceinture située entre Mars et Jupiter.

Lydie Bonal
Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble, IPAG, Université Joseph Fourier, CNRS

Mars, ce qui est nettement plus proche du Soleil que les distances estimées pour les autres groupes de chondrites.

Une deuxième classe, celle des chondrites « ordinaires », comporte trois groupes distincts, mais proches, étiquetés H, L et LL, qui s'identifient par l'abondance de fer qu'elles contiennent et aussi par la forme chimique sous laquelle le fer est présent. Le qualificatif « ordinaire » se rapporte à la prévalence de ces chondrites : elles constituent 74 pour cent des météorites récupérées sur Terre. Ces trois groupes étant surreprésentés, cela indique que les météorites correspondantes viennent d'une région du Système solaire où les forces gravitationnelles sont favorables à leur propulsion vers la Terre.

Propulsion par Jupiter

John Wasson, de l'Université de Californie à Los Angeles, a proposé que les chondrites ordinaires proviennent d'une région légèrement plus proche du Soleil que le centre de la ceinture d'astéroïdes, située entre les orbites de Mars et de Jupiter. Les astéroïdes, situés à 2,5 fois la distance Terre-Soleil (2,5 unités astronomiques), décrivent trois orbites autour du Soleil en 12 ans ; c'est le temps que met Jupiter, à 5,2 unités astronomiques, pour faire une seule révolution. Le rapport entier de ces périodes conduit à un phénomène de résonance qui peut déstabiliser l'orbite des astéroïdes sous l'influence du champ gravitationnel de la planète. Certaines sont alors dirigées vers la partie interne du Système solaire, où se trouve la Terre.

Les chondrites de Rumuruti (du nom de la localité du Kenya où la seule chute observée s'est produite) forment la troisième classe. Ces chondrites, dites R, sont rares et ressemblent aux chondrites ordinaires par beaucoup de leurs propriétés chimiques. Mais leur matrice est plus abondante, et le rapport de l'oxygène 17 sur l'isotope plus léger, l'oxygène 16, y est supérieur. De hautes températures dans la nébuleuse ont tendance à égaliser les concentrations des différents isotopes. Ainsi, plus un objet se forme loin du Soleil, plus sa composition a des chances de conserver les différences d'abondance isotopiques de l'oxygène. Le déséquilibre mesuré suggère que les chondrites R se seraient formées plus loin du Soleil que les chondrites ordinaires.

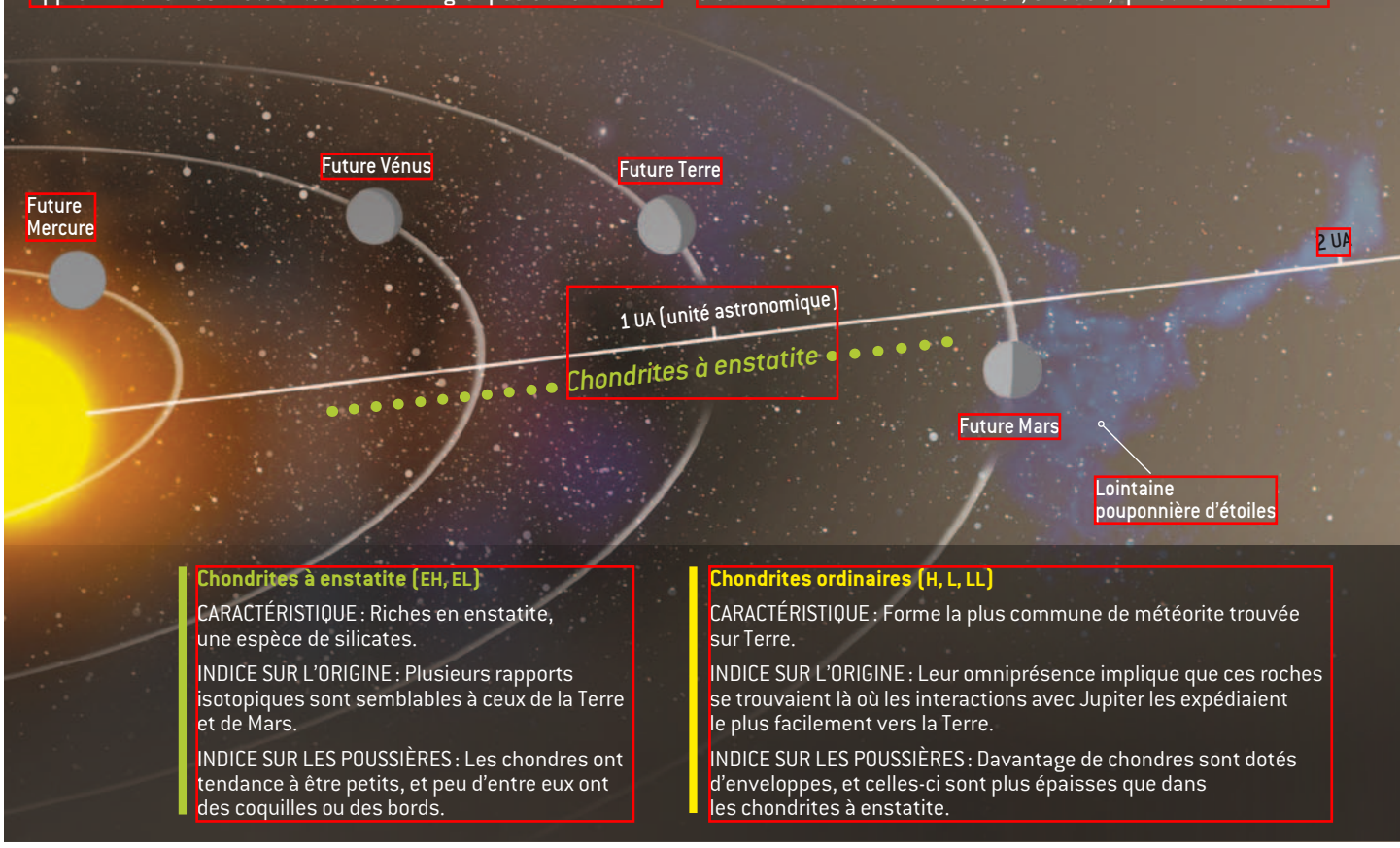
Le disque de poussières reconstitué à partir de l'étude des chondrites est très similaire à celui des disques protoplanétaires autour des étoiles T Tauri.

Des températures élevées ont aussi pour effet de casser les liaisons moléculaires des composés organiques, qui se trouvent en plus grande concentration dans la quatrième classe, celle des « chondrites carbonées », que dans les autres classes de chondrites. Les chondrites carbonées étaient presque certainement en orbite à des distances encore plus grandes du Soleil que les chondrites R. Les chondrites carbonées elles-mêmes se subdivisent en six groupes principaux, à chacun desquels on peut attribuer une position plus spécifique dans la nébuleuse

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

LE SYSTÈME SOLAIRE AVANT LES PLANÈTES

L'auteur a examiné de nombreuses caractéristiques chimiques et structurales de quatre classes de chondrites *(ci-dessous)*, qui se divisent en 12 groupes principaux (repérés par leurs initiales). Il a ainsi précisé les modèles indiquant la provenance approximative des météorites de ces 12 groupes et déduit les quantités relatives de poussières dans le voisinage à l'époque de leur formation *(sur la carte, les pointillés indiquent une plage probable de zones possibles)*. Ses résultats indiquent que le maximum de poussières *(voile le plus dense)* est associé aux chondrites carbonées CR, CV et CK, qui étaient en orbite



Chondrites à enstatite (EH, EL)

CARACTÉRISTIQUE : Riches en enstatite, une espèce de silicates.

INDICE SUR L'ORIGINE : Plusieurs rapports isotopiques sont semblables à ceux de la Terre et de Mars.

INDICE SUR LES POUSSIÈRES : Les chondres ont tendance à être petits, et peu d'entre eux ont des coquilles ou des bords.

Chondrites ordinaires (H, L, LL)

CARACTÉRISTIQUE : Forme la plus commune de météorite trouvée sur Terre.

INDICE SUR L'ORIGINE : Leur omniprésence implique que ces roches se trouvaient là où les interactions avec Jupiter les expédiaient le plus facilement vers la Terre.

INDICE SUR LES POUSSIÈRES : Davantage de chondres sont dotés d'enveloppes, et celles-ci sont plus épaisses que dans les chondrites à enstatite.

à partir de leurs propriétés chimiques, isotopiques et structurales.

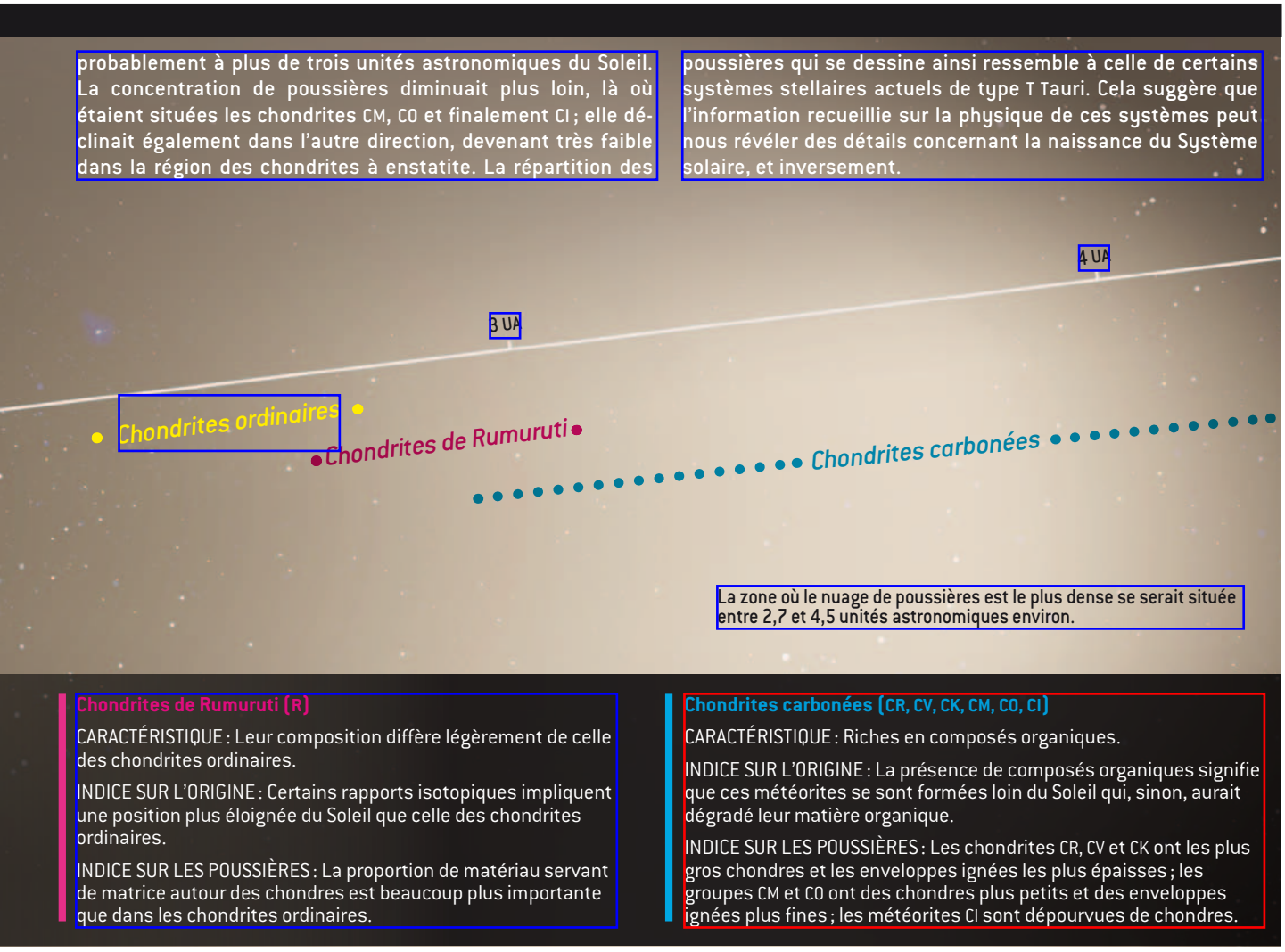
Outre leur composition chimique, les structures internes des chondrites livrent des renseignements sur la quantité de poussières présente au voisinage immédiat de leur lieu de formation. Les poussières ont joué un rôle crucial à toutes les étapes de l'évolution du Système solaire. Quand le nuage de matière initial qui a produit le Soleil et les planètes s'est effondré sur lui-même, la densité de poussières a augmenté. Le rayonnement infrarouge a été efficacement piégé, ce qui a fait croître la température au centre du nuage. Cela a donné naissance à la proto-étoile. Plus tard, les poussières (et, à plus grande distance du centre, la glace) se sont fixées dans les environs du plan médian de la nébuleuse et se sont agrégées en corps plus gros et poreux nommés planétésimaux, dont la taille allait de quelques mètres à des dizaines de kilomètres. Certains de ces planétésimaux ont fondu avec la chaleur dégagée par les éléments radioactifs présents dans la roche. Les planétésimaux fondus sont dits « différenciés » car leur composition chimique est modifiée par rapport à celle des corps « primitifs » comme les chondrites. Les planètes se sont finalement formées à partir d'un ensemble disparate de planétésimaux fondus et non fondus ; les comètes et les astéroïdes parents des chondrites, de composition plus uniforme, proviennent uniquement de planétésimaux non fondus.

Une structure en couches

Les chondrites permettent d'estimer l'abondance de poussières à l'endroit où un groupe donné de chondrites s'est formé. En effet, dans les chondrites, les chondres sont constitués de coquilles (plus souvent qualifiées d'anneaux, car les chondrites sont étudiées en lames minces) chargées de poussières entourant un noyau de silicate. Les chondres de certaines météorites carbonées, par exemple, comportent souvent un noyau, ou chondre « primaire », pris dans une coquille sphérique secondaire de matériau fondu – ou igné – de composition similaire au chondre primaire. La coquille secondaire est souvent elle-même entourée d'une coquille tertiaire, l'enveloppe ignée, qui est composée de grains de minéraux plus fins que ceux du noyau central *(voir la figure 2)*.

De nombreux spécialistes des météorites ont suggéré que les coquilles secondaires ont été créées quand un chondre, solidifié après l'événement de fusion initial, a acquis une coquille poreuse de poussières dont la couche externe, (mais pas le chondre interne) a subi une fusion dans un second temps. Par la suite, des phénomènes

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013



moins intenses ou plus brefs ont produit l'enveloppe ignée. En d'autres termes, les groupes de chondrites qui contiennent de nombreux chondres à coquilles gigognes semblent s'être formés dans des environnements poussiéreux.

Des épisodes multiples de fusion, entrecoupés de périodes au cours desquelles les chondres se sont enveloppés de poussières, auraient produit des chondres plus gros, dotés d'une coquille secondaire et d'une enveloppe ignée, toutes deux épaisses. Les chondres pris dans les poussières se sont par ailleurs refroidis plus lentement que les autres, parce que leur chaleur s'évacue moins facilement. Ce lent refroidissement aurait à son tour facilité l'évaporation des éléments volatils, tels que le sodium et le soufre. Cependant, ils auraient été piégés par les poussières voisines et, à terme, incorporés dans les chondrites. Néanmoins, une fraction notable aurait été perdue. Les teneurs en sodium et en soufre des groupes de chondrites présentant de gros chondres chargés de poussières devraient donc être inférieures à celles des groupes de chondrites dont les chondres se sont formés dans des environnements pauvres en poussières. Et c'est bien ce que j'ai observé.

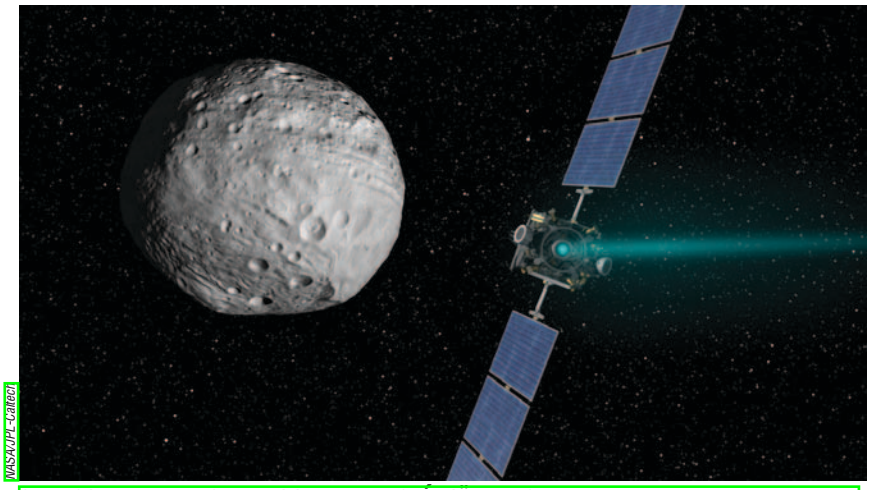
En combinant ces informations et d'autres avec les orbites présumées des astéroïdes dont ces chondrites sont issues, j'ai dressé une carte grossière des abondances en poussières dans le Système solaire jeune *(voir l'encadré ci-dessus)*.

Une carte des poussières

Les chondrites à enstatite, qui se sont sans doute formées entre le Soleil et l'orbite actuelle de Mars, se trouvaient dans une région vraisemblablement pauvre en poussières ; elles contiennent, par exemple, peu de chondres à coquilles ou à enveloppes ignées, et parmi les chondres ayant des enveloppes, ces dernières sont minces.

Les chondrites ordinaires et les chondrites R, plus éloignées du Soleil, présentent davantage de preuves de formation dans un environnement riche en poussières ; par exemple, la proportion de chondres à enveloppes ignées est plus élevée et les enveloppes sont plus épaisses que dans les groupes à enstatite.

La concentration de poussières semble avoir été maximale dans la région occupée par les corps parents des chondrites carbonées, qui contiennent les plus gros chondres et le plus grand nombre de chondres enfermés dans des coquilles secondaires et des enveloppes ignées (les groupes notés CR, CV et CK). Cette concentration diminue ensuite à proximité de la région de deux groupes de chondrites carbonées (CM et CO) encore plus distantes du Soleil. Les chondres de



NASA/JPL-Caltech

3. LA SONDE *DAWN* S'APPROCHE DE L'ASTÉROÏDE VESTA, sur cette vue d'artiste, pour en étudier la composition et la structure. Une autre mission, *Hayabusa* de l'Agence spatiale japonaise, a récolté des poussières sur l'astéroïde Itokawa et les a rapportées sur Terre pour qu'elles soient analysées. Ces missions spatiales permettront d'obtenir des informations supplémentaires sur la formation de ces astéroïdes et sur la jeunesse du Système solaire.

ce sont les signes de fusion répétée. Le processus a dû aussi être à l'œuvre dans toute la nébuleuse solaire, sinon il n'aurait pas abouti à la présence de chondres dans presque tous les groupes de chondrites. Malheureusement, on n'a trouvé aucun mécanisme convaincant de chauffage qui rende compte de toutes les propriétés des chondres. La fusion multiple de tant de chondres exclut tous les processus ponctuels, tels que les ondes de choc dues à des supernovae ou les sursauts de rayons gamma provenant de l'espace lointain. La source de chaleur devait être capable, d'une part, de fondre des chondres entiers (dont certains de plusieurs millimètres de diamètre) et, d'autre part, de ne fondre que les minces manteaux de poussières entourant d'autres chondres tout en laissant l'intérieur intact.

ces groupes sont beaucoup plus petits et présentent beaucoup moins souvent des coquilles secondaires et des enveloppes ignées. La quantité de poussières diminue encore plus au voisinage du groupe de chondrites carbonées le plus lointain (CI), qui ne contiennent pratiquement pas de chondres. Il s'agit cependant de vraies chondrites, car le principal critère pour appartenir à cette classe de roches est d'avoir une composition chimique en éléments non volatils (autres que hydrogène, carbone, azote, soufre...) semblable à celle du Soleil.

La répartition des poussières, reconstituée à partir de l'étude des chondrites, se révèle très similaire à celle de plusieurs disques protoplanétaires autour des étoiles T Tauri. Ces astres, semblables au Soleil d'autrefois, sont encore jeunes dans leur évolution ; ils ne sont pas encore entrés dans un cycle stable de combustion de l'hydrogène. De plus, la masse estimée du disque des étoiles T Tauri et celle du Système solaire jeune sont semblables (environ deux pour cent de la masse du Soleil). Ces observations suggèrent que les étoiles T Tauri pourraient refléter ce qu'était le Système solaire dans sa jeunesse.

L'étude des chondrites a permis d'obtenir des informations importantes sur l'évolution de notre Système solaire et ce à quoi il a pu ressembler à ses débuts. Cependant, les chondrites soulèvent encore des questions : en particulier, par quels processus les chondres ont-ils été créés ? La première chose que tout modèle de formation des chondres doit expliquer,

Problèmes de chauffage

Le modèle de formation des chondres actuellement privilégié par les astrophysiciens met en jeu un chauffage par ondes de choc. Ces dernières auraient pu être produites, par exemple, par des nuages de poussières tombant de l'extérieur sur la nébuleuse. La propagation des ondes de choc à travers des régions poussiéreuses de la nébuleuse aurait pu produire assez de chaleur pour faire fondre les chondres.

Mais les modèles qui font intervenir les ondes de choc ont leurs défauts. Tout d'abord, on n'a pas encore observé d'ondes de choc dans des disques protoplanétaires ; leur existence n'est donc pas prouvée. Ensuite, des chocs chaufferaient en même temps des myriades de chondres, mais semblent incapables de limiter la fusion à la partie externe de chondres (pour former des coquilles secondaires et des enveloppes ignées). Enfin, les ondes de choc étant des phénomènes localisés, il semble improbable qu'elles aient produit des chondres dans des régions de la nébuleuse très éloignées. Le principal mécanisme de formation des chondres reste donc à élucider.

Les chondrites et les chondres sont une mine d'informations sur la nature et l'évolution de la nébuleuse solaire, la formation des planètes, certaines étapes de l'évolution du Soleil et les échelles temporelles de tous ces processus. Les planétologues ont encore beaucoup à apprendre, même si le tableau que dessinent ces messagers de l'aube du Système solaire se précise. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. E. Rubin, **Physical properties of chondrules in different chondrite groups : implications for multiple melting events in dusty environments,** *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 74(16), pp. 4807-4828, 2010.

A. E. Rubin, **Les astéroïdes ont eu chaud,** *Dossier Pour la Science*, n° 64, juillet-septembre 2009.

R. H. Jones *et al.*, **Chemical, mineralogical and isotopic properties of chondrules : clues to their origin,** *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 341, pp. 251-285, 2005.

POUR LA SCIENCE

Plus de 25 % de réduction





TROUVEZ LA BONNE FORMULE

...ABONNEZ-VOUS ! 1 an • 12 nos • 56 € au lieu de ~~74,90 €~~

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service Abonnements • Libre réponse 90 382 • 75 281 Paris cedex 06

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

❑ **1 an • 12 numéros • 56 €** au lieu de ~~74,90 €~~

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

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

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



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

Je préfère m'abonner à *Pour la Science* (12 nos/an) + *Dossier Pour la Science* (4 nos/an)

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

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

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

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



J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

CP: ❑❑❑❑❑ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

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

❑ Par carte bancaire

Numéro de carte ❑❑❑❑ ❑❑❑❑ ❑❑❑❑ ❑❑❑❑

Date d'expiration ❑❑/❑❑ Signature obligatoire

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

❑❑❑❑❑

Kristina Curry Rogers et Michael D'Emic

Les sauropodes, ces dinosaures géants au long cou et aux pieds éléphantesques, passaient pour inadaptés. Ils ont pourtant vécu et se sont diversifiés partout sur la planète pendant plus de 150 millions d'années. Un succès évolutif titanesque...

LE TRIOMPHE DES

L'ESSENTIEL

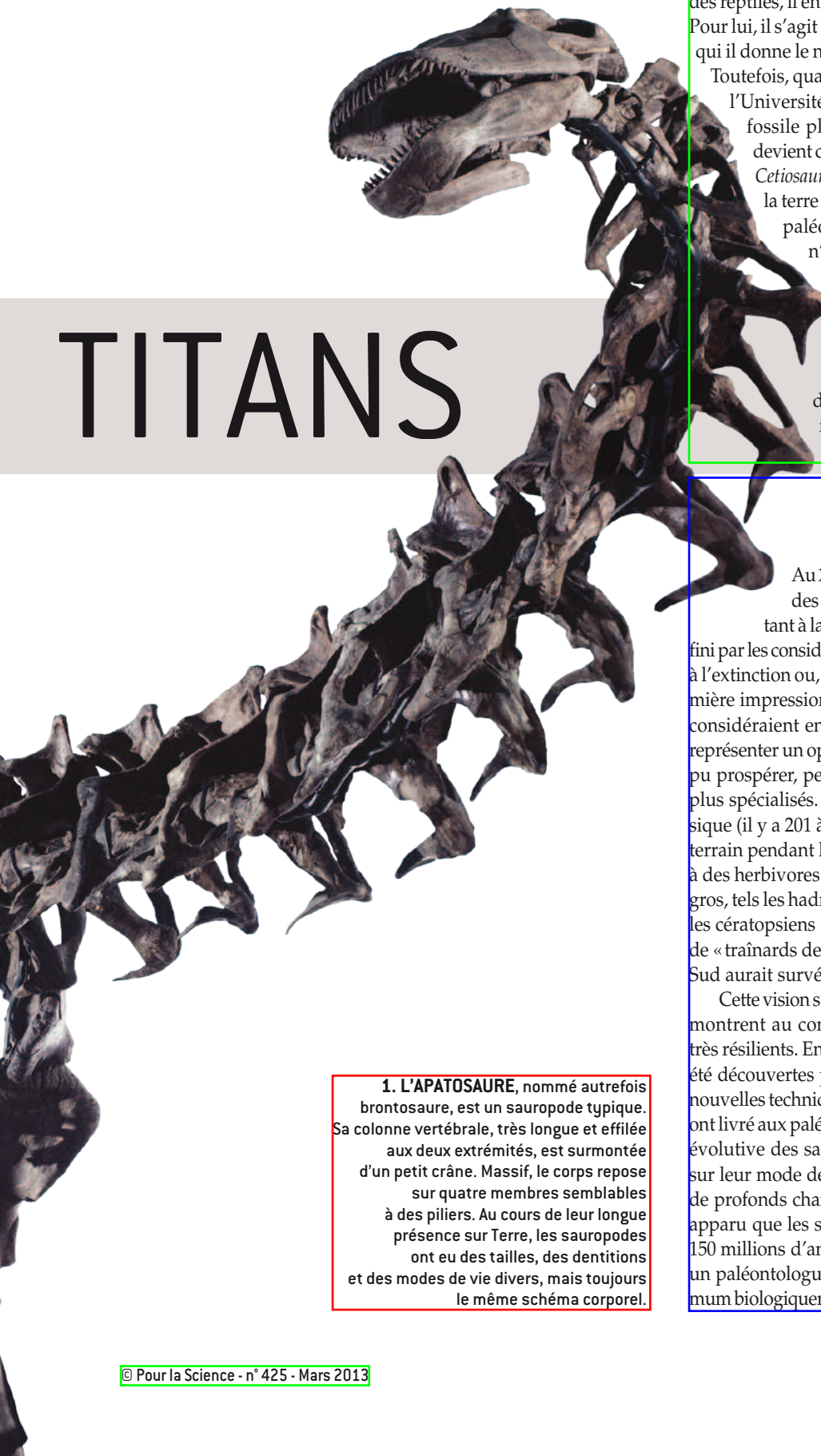
- Long cou, poids énorme, petits cerveaux : les sauropodes étaient considérés comme des animaux mal adaptés, condamnés à vivre à moitié immergés dans l'eau...
- Les découvertes des 20 dernières années rendent cette vision obsolète. Elles révèlent que ce groupe de dinosaures a prospéré partout pendant 150 millions d'années.
- Le succès des sauropodes semble tenir à un mélange unique de caractères reptiliens, aviens et mammaliens, que les paléontologues révèlent peu à peu.



Carnegie Museum of Natural History

TITANS

Il y a 170 ans, des ossements de géants à long cou sont découverts en Angleterre. D'emblée, ces sauropodes, comme on les nommera plus tard, troublent les naturalistes. En 1842, quand le grand anatomiste anglais Richard Owen définit enfin les dinosaures comme un groupe distinct des reptiles, il en exclut les fossiles de géants d'Angleterre. Pour lui, il s'agit de quelque type de crocodile aquatique, à qui il donne le nom de *Cetiosaurus*, soit « lézard-baleine ». Toutefois, quand, en 1871, le géologue John Phillips, de l'Université d'Oxford, annonce la découverte d'un fossile plus complet du même type d'animal, il devient clair que loin d'être un crocodile aquatique, *Cetiosaurus* passe au moins une partie de sa vie sur la terre ferme. Pendant des dizaines d'années, les paléontologues sont restés perplexes, car ils n'arrivaient pas à comprendre comment des animaux aussi massifs ont pu supporter leur propre poids. Il semblait tout simplement impossible qu'ils aient pu exister... Nous allons voir que non seulement ils ont persisté pendant toute l'ère des dinosaures, mais qu'ils représentent en fait l'un des plus grands succès évolutifs jamais constatés.



1. L'APATOSAURE, nommé autrefois brontosaure, est un sauropode typique. Sa colonne vertébrale, très longue et effilée aux deux extrémités, est surmontée d'un petit crâne. Massif, le corps repose sur quatre membres semblables à des piliers. Au cours de leur longue présence sur Terre, les sauropodes ont eu des tailles, des dentitions et des modes de vie divers, mais toujours le même schéma corporel.

Et pourtant, ils ont existé...

Au XIX^{e} siècle, on voyait les sauropodes comme des animaux sans habitat possible, inadaptés tant à la vie marine qu'à la vie terrestre. On a donc fini par les considérer comme d'archaïques herbivores voués à l'extinction ou, du moins, à la marginalisation. Cette première impression perdurera : en 1991, les paléontologues considéraient encore que les sauropodes étaient loin de représenter un optimum d'adaptation, de sorte qu'ils n'ont pu prospérer, pensaient-ils, qu'en l'absence d'herbivores plus spécialisés. Selon cette logique, ces géants du Jurassique (il y a 201 à 145 millions d'années) auraient cédé du terrain pendant le Crétacé (de 145 à 65 millions d'années) à des herbivores plus adaptés, car dotés de cerveaux plus gros, tels les hadrosaures (dinosaures à becs de canard) ou les cératopsiens (dinosaures à cornes). Seule une poignée de « traînards de l'évolution » relégués dans l'hémisphère Sud aurait survécu jusqu'à la fin de l'ère des dinosaures.

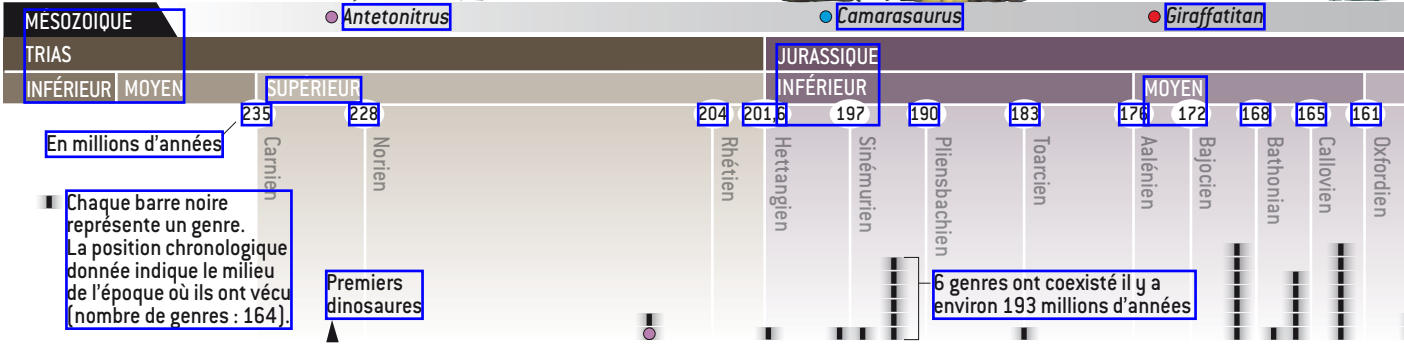
Cette vision s'est révélée fausse : les découvertes récentes montrent au contraire que ces animaux massifs étaient très résilients. En dix ans, plus de 60 nouvelles espèces ont été découvertes partout dans le monde. Avec l'appui des nouvelles techniques d'analyse (telle la tomographie), elles ont livré aux paléontologues les grandes lignes de l'histoire évolutive des sauropodes, ainsi que des renseignements sur leur mode de vie et la façon dont ils se sont adaptés à de profonds changements environnementaux. Il est ainsi apparu que les sauropodes ont persisté pendant quelque 150 millions d'années, alors que – chose stupéfiante pour un paléontologue – leur taille atteignait souvent le maximum biologiquement possible pour des vertébrés terrestres.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

UN SUCCÈS ÉVOLUTIF… AUSSI GRAND QU'EUX

On a longtemps considéré que les sauropodes avaient décliné rapidement à la fin du Jurassique, soit il y a environ 145 millions d'années, face à la concurrence de nouvelles espèces herbivores mieux adaptées. Les découvertes des 20 dernières années montrent en fait que, loin de disparaître, les sauropodes ont encore prospéré pendant 80 millions d'années supplémentaires, c'est-à-dire pendant tout le Crétacé et jusqu'à la grande extinction qui a marqué la fin de l'ère des dinosaures. Les sauropodes se sont maintenus, même lorsqu'ils sont entrés en compétition avec les dinosaures à bec de canard et les dinosaures à cornes pour une nouvelle source de nourriture apparue au Crétacé : les plantes à fleurs.



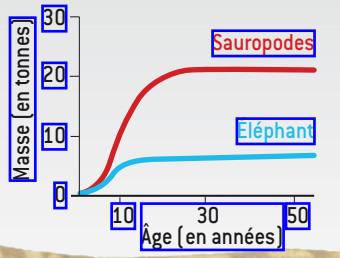


Paul Wenin, Jan Christiansen

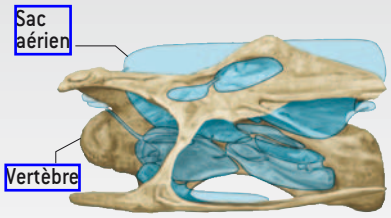
© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Comment ils ont survécu aussi longtemps
Les sauropodes ont vécu dans de nombreux milieux et sous des conditions diverses grâce à de nombreuses adaptations. Ils ont ainsi pu atteindre des tailles jamais égalées depuis par d'autres animaux terrestres.

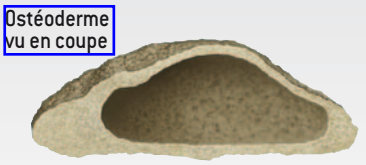
Contrairement à la plupart des reptiles, un sauropode grandissait extrêmement vite, atteignant sans doute sa taille adulte en quelques dizaines d'années seulement.

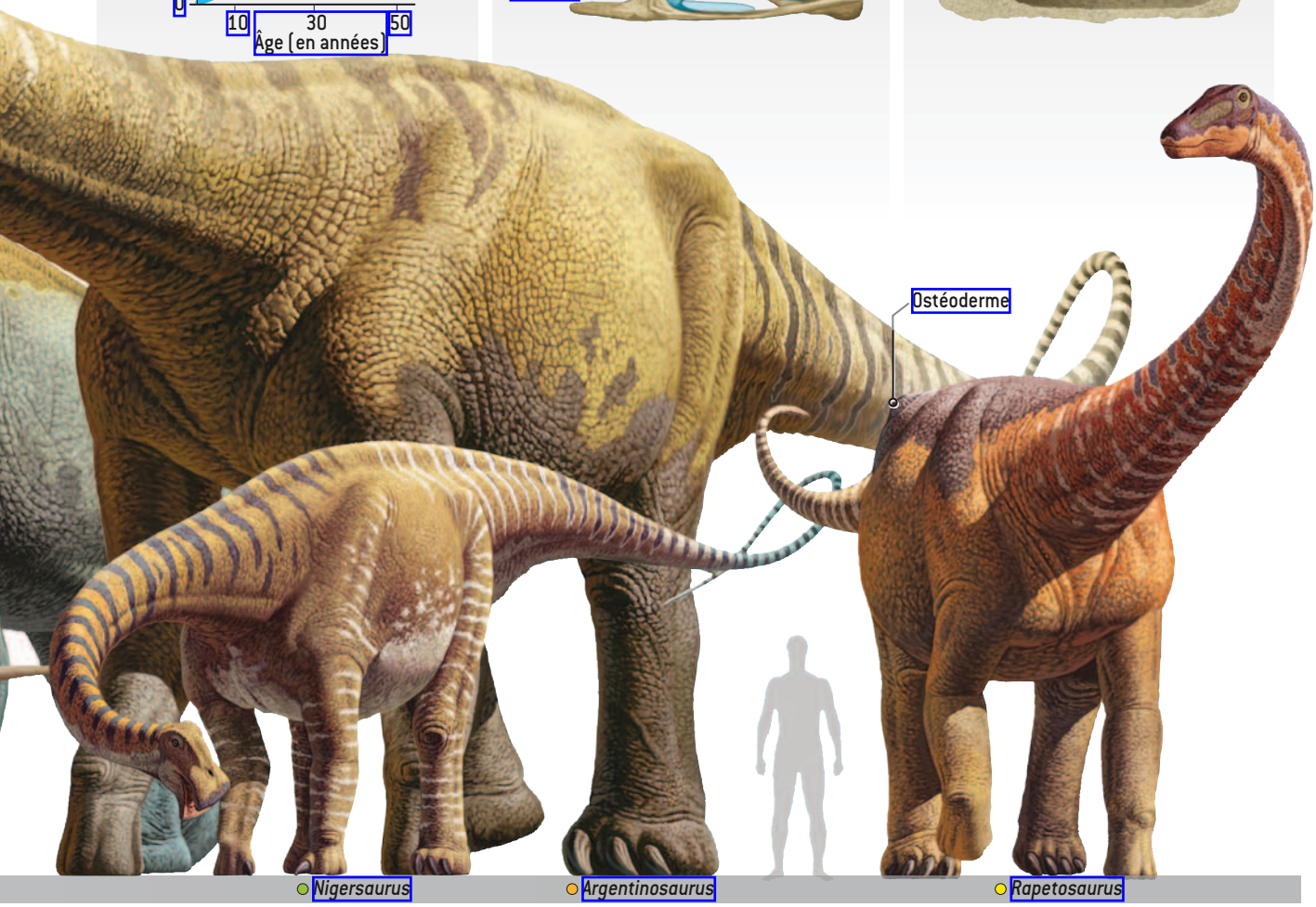


Des vertèbres creuses allégeaient la colonne vertébrale ; elles ont peut-être accueilli des sacs aériens comparables à ceux des oiseaux, pour absorber plus d'oxygène à chaque inspiration.

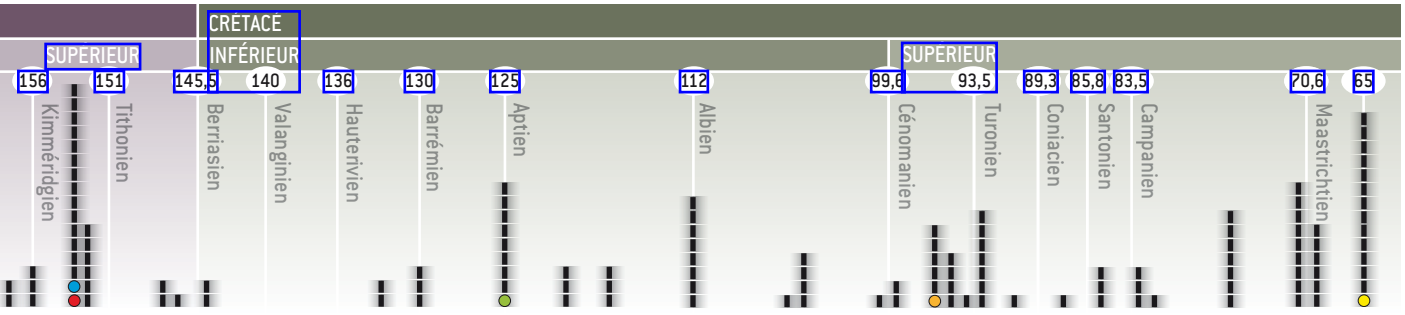


Plaques osseuses enchâssées dans la peau, les ostéodermes auraient servi de réserves de calcium et d'autres minéraux. Les ostéodermes des sauropodes se creusaient en effet avec l'âge, probablement afin de fournir du calcium au sang.





Nigersaurus *Argentinosaurus* *Rapetosaurus*



© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

LES AUTEURS





Kristina CURRY ROGERS, paléontologue et spécialiste des sauropodes, travaille au *Macalester College* à Minneapolis, aux États-Unis.

Michael D'EMIC, paléontologue et spécialiste des vertébrés terrestres du Crétacé, travaille à l'Université de Géorgie du Sud, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

J. A. Whitlock, **Inferences of Diplodocoid (Sauropoda : Dinosauria) feeding behavior from snout shape and microwear analyses**, *PLoS ONE*, vol. 6(4), e18304, 2011.

K. Curry Rogers *et al.*, **Sauropod dinosaur osteoderms from the late Cretaceous of Madagascar**, *Nature Communications*, vol. 2, 564, publié en ligne le 29 novembre 2011.

J.-P. Billon-Bruyat *et al.*, **Les sauropodes, géants agiles**, *Pour la Science*, n° 374, 2008.

K. Curry Rogers et J. Wilson, **The Sauropods : Evolution and Paleobiology**, University of California Press, 2005.

Comme tout un chacun, c'est dans un musée que nous avons été confrontés pour la première fois à ces géants. Dans de tels endroits, ils dominent tous les autres dinosaures. La plupart des sauropodes connus, tels le Diplodocus, le *Camarasaurus (voir la figure 4)* ou l'*Apatosaurus* ont commencé leur carrière muséale dans les années 1880. Au tournant du XX^{e} siècle, tous les muséums dignes de ce nom se devaient d'en exhiber les squelettes. Le Diplodocus du Muséum de Paris, par exemple, est une réplique dévoilée en 1908 du dinosaure trouvé dans le Wyoming par le milliardaire américain Andrew Carnegie (il est présenté avec la queue traînant au sol, selon la vision erronée de l'époque). Il n'est donc pas étonnant que les muséums du monde entier possèdent de riches collections d'ossements fossiles de sauropodes jurassiques, qui souvent attendent encore dans des plâtres que l'on vienne les étudier…

Toutefois, ces sauropodes célèbres ne représentent qu'une partie minime de la diversité de leur groupe. La longue histoire des sauropodes commence en même temps que celle des autres dinosaures, il y a 210 millions d'années, à la fin du Trias (–252 à –201 millions d'années). Une extinction massive qui reste mal expliquée, mais qui coïncide avec l'éclatement du supercontinent qu'était la Pangée, entraîne à cette époque la disparition de la plupart des thérapsides (reptiles mammaliens). La plupart des niches écologiques sont alors libérées. Les plus anciens dinosaures connus, qui vont les occuper, ont été découverts dans des sédiments formés il y a quelque 230 millions d'années dans l'hémisphère Sud. Ce sont ces animaux bipèdes et de petite taille qui ont ensuite évolué vers les théropodes (dont fait partie le tyrannosaure) et les sauropodes.

Les plus anciens indices fossiles de sauropodes proviennent de formes telles que *Isanosaurus* (Thaïlande), *Gongxianosaurus* (Chine) et *Vulcanodon* (Zimbabwe). Ces anciennes espèces portent les marques distinctives des sauropodes, c'est-à-dire que ce sont déjà des « épines dorsales ambulantes » dotées de cous et de queues longs et fuselés, de crânes minuscules et de pattes en forme de piliers à l'image de celles des éléphants. Les paléontologues ont retrouvé les empreintes de troupeaux de sauropodes tant en Europe *(voir la figure 2)* qu'aux Amériques, où elles datent d'environ 225 millions d'années. Cette architecture corporelle typique persistera pendant toute la durée de l'évolution des sauropodes, et fait d'eux des dinosaures facilement reconnaissables.

Cela ne signifie pas que les sauropodes n'ont pas évolué : l'éclatement progressif de la Pangée en a placé sur tous les continents, où ils se sont adaptés à différents milieux. C'est pourquoi leur diversité a connu des hauts et des bas tout au long de leur histoire, et ce jusqu'à la fin des dinosaures. Nous observons en effet l'existence de groupes de sauropodes importants, tels les titanosaures trapus ou encore les rebbachisauridés à tête plate, jusqu'à la fin du Crétacé. Même juste avant la disparition de la plupart des dinosaures (leurs descendants oiseaux sont restés), les sauropodes étaient encore nombreux et diversifiés.

L'évaluation de la taille des sauropodes

Il est clair, dès lors, que les sauropodes constituent un grand succès évolutif. Comment s'explique-t-il ? Il semble que ce soit grâce à l'association d'un mélange unique de caractères reptiliens et mammaliens qu'ils ont toujours pu s'adapter.

Les sauropodes, comme tous les dinosaures, sont ovipares. Mis au jour par Luis Chiappe, du Muséum d'histoire naturelle de Los Angeles et des collègues à Auca Mahuevo, dans la fameuse province argentine fossilifère de Neuquén, les premiers nids de sauropodes identifiés (ceux de titanosaures) contiennent des milliers d'œufs ; à l'intérieur, les chercheurs ont découvert des embryons, avec parfois de la peau et des membranes d'œufs fossilisés. Les femelles titanosaures ont déposé ces œufs sphériques de 13 à 15 centimètres de diamètre par groupes de 20 à 40 au fond de dépressions qu'elles avaient aménagées au préalable. L'abondance de nids dans les mêmes couches sédimentaires suggère que des troupeaux importants de titanosaures ont nidifié dans la même zone au moins six fois de suite. Rien n'indique toutefois qu'ils aient couvé et pris soin de leurs petits après l'éclosion des œufs.

De fait, la densité des nids suggère que les titanosaures n'élevaient pas leurs petits. Contrairement aux grands vertébrés comme les éléphants ou les baleines, qui s'investissent beaucoup dans les soins à l'unique petit de chaque portée, les sauropodes suivent la même stratégie reproductive que les reptiles : ils produisent de nombreux petits, qu'ils laissent ensuite

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013



2. DES TRACES DE SAUROPODES ont été découvertes à Porrentruy dans le Jura suisse, où le passage d'un troupeau a marqué une plage fossile jurassique (–152 millions d'années). Ci-dessus, des traces tridactyles (en pied de poule) d'un grand théropode, c'est-à-dire d'un dinosaure prédateur, se mêlent à celles du troupeau… Que mangeaient ces herbivores géants se déplaçant aisément en milieu côtier ? Probablement des conifères, des prêles, voire des algues, dans un monde encore dépourvu de plantes à fleurs.

affronter seuls les nombreux aléas de la vie *(voir la figure 3)*.

Pour autant, les chances de survie des petits sauropodes semblent avoir été augmentées par leur vitesse de croissance stupéfiante. Un bébé sauropode mesurait moins de 50 centimètres de long pour un poids de moins de dix kilogrammes ; adulte, il pouvait atteindre 30 mètres de long et 40 tonnes, voire davantage. En comparaison, un éléphant pèse environ 120 kilogrammes à sa naissance et fera, adulte, entre deux et six tonnes. Si, comme le pensaient les chercheurs, les vitesses de croissance des dinosaures avaient été les mêmes que celles des reptiles, un sauropode aurait eu besoin de 60 ans pour atteindre son premier palier de croissance et de plus d'un siècle pour atteindre sa taille adulte. Dès lors, aucune reproduction ne lui serait possible avant l'âge de 60 ans, ce qui aurait gravement diminué les chances de survie de l'espèce.

Une vision plus réaliste de la façon dont se développait le corps des jeunes sauropodes a commencé à émerger dans les années 1960, quand Armand de Ricqlès, du Collège de France à Paris, a étudié l'histologie (la structure tissulaire) des os de sauropodes. Les modes de minéralisation osseuse, la densité et l'architecture des cavités laissées par les vaisseaux sanguins ainsi que le degré de remodelage osseux sont en effet enregistrés dans les os fossiles. Ces caractères montrent que les vitesses de croissance des sauropodes restaient très élevées pendant la plus grande partie de leur vie, et qu'elles étaient en tout cas bien plus élevées que celles des reptiles, et sans doute comparables à celles de certains grands mammifères (éléphants, cachalots…), qui parviennent à maturité au bout de quelques décennies. Il est clair que les sauropodes n'avaient pas besoin de plusieurs siècles pour devenir géants.

Un appétit prodigieux

Tout cela implique que ces animaux devaient avoir un appétit prodigieux. Comment parvenaient-ils à se nourrir assez ? C'est l'une des questions centrales de la biologie des sauropodes. Les recherches sur leur alimentation se sont en général concentrées sur la forme de leurs dents, les marques d'usure de celles-ci, la reconstitution des muscles masticateurs et autres analyses biomécaniques de l'ouverture et de la fermeture de la mâchoire. Ces études ont révélé que les sauropodes broutaient de plusieurs façons : certains sectionnaient des végétaux fibreux avec des dents adaptées, d'autres ne pouvaient consommer que des végétaux mous.

Les auteurs de ces recherches sont assez unanimement parvenus à la conclusion que les sauropodes ne mastiquaient guère. Il s'ensuit que ces non-ruminants avaient besoin d'un puissant système digestif pour transformer la matière végétale en énergie utilisable. Le processus le plus souvent cité fait appel à la présence dans l'estomac des sauropodes de gastrolithes, c'est-à-dire de pierres ingérées afin que les végétaux soient broyés entre elles. De fait, des pierres polies ressemblant à des galets ayant été souvent remarquées dans les strates géologiques à sauropodes, du moins en Amérique du Nord, les chercheurs en sont venus à leur supposer une fonction analogue à celles des gastrolithes de certains vertébrés actuels, certains oiseaux par exemple.

En 2007, cependant, Oliver Wings, du Muséum d'histoire naturelle de Berlin, et Martin Sander, de l'Université de Bonn, en Allemagne, ont évalué cette hypothèse en examinant de près la façon dont les pierres avalées par les oiseaux sont transformées et dégradées au sein de leur gésier. Ils ont conclu que les prétendus gastrolithes de sauropodes n'ont pas l'aspect de surface attendu. En outre, les gastrolithes supposés, que l'on a découverts là où se sont décomposés des sauropodes, sont rares et donc difficiles à interpréter. Nos confrères allemands estiment que les sauropodes, comme les grands herbivores actuels tels que les rhinocéros, extraient de l'énergie

des végétaux qu'ils ingèrent grâce à la fermentation microbienne au sein de tubes digestifs très longs.

Dès lors, une autre caractéristique des sauropodes – leur long cou – exige une explication. Selon une opinion répandue, il leur permettait d'atteindre la cime des arbres hors de portée des autres herbivores, mais de nouvelles recherches ont relativisé cette idée. John Whitlock, de l'Université de Colombie-Britannique, a reconstitué les stratégies alimentaires des diplodocidés, groupe de dinosaures incluant les sauropodes *Apatosaurus* et *Diplodocus* du Jurassique et du Crétacé. Les variations de forme du museau et les marques microscopiques d'usure de leurs dents suggèrent que certains sauropodes s'étaient spécialisés dans un type particulier de végétaux, tandis que d'autres étaient généralistes ; les uns broutaient au ras du sol, d'autres exploitaient les arbres.

D'autres chercheurs sont parvenus à des conclusions similaires à partir de l'analyse des postures possibles du cou des sauropodes, ce qui a mis en lumière que l'alimentation d'un tel dinosaure dépendait de la souplesse de son cou. La diversité de leurs habitudes alimentaires aide à comprendre comment autant de géants végétariens ont pu se partager les mêmes écosystèmes.

Lorsque, au Crétacé, les plantes à fleurs se sont répandues partout sur la planète, le groupe des sauropodes a réagi en se spécialisant. On croyait autrefois que les véritables tapis roulants de dents vite usées et vite remplacées des dinosaures à bec de canard et des dinosaures à cornes les avaient avantagés au point de leur permettre de remplacer les sauropodes au Crétacé. On sait aujourd'hui que ces derniers, loin d'avoir décliné, se sont au contraire diversifiés et ont développé des moyens d'exploiter une plus grande variété de végétaux.

LA PNEUMATISATION DES VERTÈBRES des sauropodes a probablement permis de diminuer fortement la masse de l'animal.

Par exemple, *Nigersaurus*, découvert au Niger dans le milieu des années 1990, avait lui aussi des batteries de dents à croissance rapide. Cette espèce datant d'il y a quelque 115 millions d'années était capable de mettre une nouvelle dent en chaque position tous les mois, soit deux fois plus vite que chez les dinosaures à bec de canard et à cornes. Il disposait ainsi en permanence de dents acérées capables de couper efficacement les fibres végétales. L'orientation des canaux semi-circulaires de l'oreille interne de *Nigersaurus*, c'est-à-dire son organe de l'équilibre, suggère que cet animal maintenait en général son museau incliné vers le bas de 70 degrés par rapport à la position horizontale habituelle chez les autres sauropodes : autrement dit, il s'était spécialisé dans des végétaux poussant près du sol.

À mesure que le Crétacé avançait et que les plantes à fleurs se diversifiaient, de plus en plus de voies évolutives se sont ouvertes aux lignées de sauropodes. L'analyse de coprolithes (excréments fossilisés) de titanosaures a révélé des phytolithes (fragments de tissus végétaux fossilisés) d'au moins cinq types différents d'herbes ainsi que de plantes à fleurs, de conifères et de palmiers.

Rapportée par Vandana Prasad et des collègues de l'Institut Birbal Sahni de Paléobotanique à Lucknow en Inde, cette découverte montre que les herbes actuelles sont apparues au moins 30 millions d'années plus tôt qu'on ne le pensait et confirme que certains sauropodes se nourrissaient de tout ce qui était à leur portée. En tant qu'animaux à croissance rapide, les sauropodes ne pouvaient faire les difficiles, de sorte que, loin d'être exclus des écosystèmes qui ont émergé au Crétacé, ils semblent en avoir tiré au contraire tout le parti possible, en se nourrissant de tout ce qui se poussait, du sol à la cime des arbres.

La très forte consommation d'oxygène des sauropodes a par ailleurs pu aider leur croissance. Chez les oiseaux actuels, des sacs aériens, sortes de poches d'air reliées aux poumons, occupent l'intérieur des vertèbres, ce qui leur donne une grande capacité respiratoire. Alors que chez les mammifères, le flux d'air inspiré est bidirectionnel (il y a mélange entre l'air inspiré et expiré), ce n'est pas le cas chez les oiseaux, ce qui augmente la quantité d'oxygène extraite à chaque respiration. Or les vertèbres des sauropodes ressemblent à celles des oiseaux actuels, qui ont des cavités internes et de nombreuses fosses externes. Cette « pneumatisation », qui concerne surtout les vertèbres du cou et du tronc, peut s'étendre chez certains sauropodes jusqu'à la queue.

Le principal effet de la pneumatisation est de réduire le poids de la colonne vertébrale. On a estimé qu'elle a permis de diminuer notablement la masse corporelle



3. EN 2010, JEFFREY WILSON, DE L'UNIVERSITÉ DU MICHIGAN, et ses collègues ont trouvé en Inde un nid de sauropodes où un serpent de quatre mètres a été fossilisé autour d'un œuf qu'il écrasait, et dont était sorti un minuscule sauropode qui a lui aussi été figé *(ici, une reconstitution de la scène)*. Les sauropodes nouveaux-nés ont sans doute été au menu de plus d'un prédateur. Un sauropode adulte était probablement intouchable, mais un embryon encore dans l'œuf ou un petit devait être très vulnérable. Cela peut expliquer que les lignées de sauropodes sélectionnées par l'évolution avaient une croissance rapide.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

des sauropodes. Le cou de *Sauroposeidon*, par exemple, un immense sauropode nord-américain, aurait été constitué de plus de 75 pour cent d'air... Il est également possible que, comme chez les oiseaux, les vertèbres pneumatisées des sauropodes aient renfermé un système de sacs aériens permettant de ventiler les poumons et augmenter l'efficacité de la respiration, afin d'assurer un métabolisme élevé et stable, nécessaire à une croissance rapide et, plus généralement, à la physiologie d'un animal de masse importante.

Comme c'est le cas pour les animaux géants d'aujourd'hui, tels que les grandes baleines ou les éléphants, la taille des sauropodes les avantageait réellement. Bien avant l'âge adulte, de nombreux sauropodes dépassaient la taille d'un éléphant, animal qui, à part l'homme, n'a pratiquement pas de prédateur. Il semble dès lors que les sauropodes adultes n'avaient pas grand-chose à craindre, même des plus grands prédateurs, tel *Allosaurus*.

Indestructibles... ou presque

Certes, leur grande taille les rendait très vulnérables en cas de pénurie de nourriture et d'eau. Cependant, certains auraient développé des solutions à ce problème aussi. Certaines espèces, par exemple *Stegosaurus*, portent sur leur peau des ostéodermes, d'étranges plaques osseuses dotées de piquants, qui constituent le même genre d'armure osseuse que celles couvrant les crocodiliens, certains lézards ou encore les tatous. Cependant, comme il n'a guère été possible de déterminer les endroits où se situaient les ostéodermes sur le corps de ces dinosaures, il est difficile d'être certain de leur fonction.

La solution de ce problème pourrait être proche : nous avons récemment décrit deux ostéodermes découverts à Madagascar dans un squelette juvénile et un squelette adulte de *Rapetosaurus*, une espèce de titanosaure. D'une longueur de 57 centimètres, d'une épaisseur de plus de 27 centimètres et de volume supérieur à dix litres, le spécimen adulte est l'ostéoderme le plus massif jamais découvert chez un animal vertébré. Des tomodensitométries par rayons X et des carottages indiquent que les ostéodermes de *Rapetosaurus* se sont creusés au cours de la vie de cet animal, et qu'à des tailles très grandes, environ cinq litres d'os interne ont été remplacés, probablement par du tissu mou. Contrairement au revêtement en « pavés » des ostéodermes que l'on trouve chez les animaux actuels, *Rapetosaurus* (et probablement certains autres titanosaures) ne possédait que quelques grandes plaques.

Les caractéristiques des ostéodermes de *Rapetosaurus* nous ont permis d'écarter plusieurs hypothèses concurrentes sur la fonction des ostéodermes chez les titanosaures. De tels éléments creux n'avaient pas une grande efficacité de blindage, car ils pouvaient se briser sous la force des mâchoires d'un prédateur. De même, le faible rapport surface sur volume de ces éléments et leur répartition clairsemée dans la peau devaient les rendre inutiles pour la thermorégulation.

Nous pensons plutôt que les ostéodermes des titanosaures servaient de réserve minérale afin de leur permettre de maintenir les vitesses de croissance et leur capacité de ponte même pendant les temps les plus durs, tout comme ils le font chez certains animaux actuels, telles les femelles de crocodiles. Chez tous les vertébrés vivants, y compris les humains, les minéraux de l'os sont « sacrifiés » afin de maintenir les niveaux de calcium dans le sang. Ce remodelage s'accroît souvent de façon saisonnière, quand les ressources sont rares, au cours de la ponte des œufs, et avec le vieillissement – ce qui chez l'homme conduit à l'ostéoporose.

Les ostéodermes étaient manifestement très irrigués par des vaisseaux sanguins qui conduisaient probablement les cellules effectuant le remodelage nécessaire à la libération de minéraux, à commencer par le calcium. Cette hypothèse a du sens s'agissant d'un énorme sauropode vivant à Madagascar à la fin du Crétacé, époque à laquelle de très fortes sécheresses affectaient l'île, au point que certains carnivores, tel *Majungasaurus*, dévoraient les membres de leur propre espèce. Ce manque d'eau a conduit à l'extinction de très nombreuses espèces, depuis les grenouilles et les oiseaux jusqu'aux sauropodes. Les ostéodermes qu'avaient certains d'entre eux pourraient toutefois leur avoir permis de survivre plus facilement aux variations de l'environnement, notamment à des sécheresses prononcées et fréquentes.

Pendant des dizaines de millions d'années, les sauropodes ont non seulement occupé presque tous les recoins de la Terre, mais ils sont aussi allés aux limites des lois biologiques. Leurs vitesses de croissance et les tailles qu'ils atteignaient sont extraordinaires dans le règne animal, mais ces étonnants attributs n'impliquent en rien qu'ils étaient mal adaptés. Du reste, si les sauropodes ont disparu, ce n'est pas à cause de leur prétendue inadaptation, mais à cause d'une crise biotique majeure, durant laquelle la chute d'une grande météorite sur Terre a joué un rôle essentiel. Que des sauropodes aient vécu et se soient diversifiés sur la planète pendant 150 millions d'années représente un énorme succès évolutif, et leur disparition n'y change rien. ■



4. CE FOSSILE DE *CAMARASAURUS* trouvé au Wyoming (États-Unis) est celui d'une espèce typique du Jurassique supérieur américain. La façon dynamique dont il a été disposé au musée d'Aathal, en Suisse, illustre l'évolution de la représentation des sauropodes : on a cessé de disposer les fossiles de sauropodes dans des positions évoquant l'immobilisme.

HISTOIRE DES SCIENCES

Les coniques selon Dürer

Dans sa quête des secrets de la beauté, l'artiste de la Renaissance Albrecht Dürer s'est intéressé à la géométrie des Grecs anciens. Sa méthode de construction des sections coniques a été source d'inspiration tant dans les arts que dans les sciences.

Daniel SILVER

Peintre et graveur de la Renaissance allemande, Albrecht Dürer (1471-1528) ne s'est jamais considéré comme un mathématicien. Néanmoins, il a utilisé la géométrie pour découvrir les secrets de la beauté. Dürer s'est notamment intéressé aux coniques, ces courbes obtenues lorsque l'on coupe un cône par un plan, et à leur représentation. S'il a commis quelques erreurs d'interprétation, il a contribué à diffuser la géométrie des Grecs anciens et, par d'ingénieuses analyses et méthodes de construction, a influencé nombre de savants de son temps, parmi lesquels l'astronome allemand Johannes Kepler. D'où lui est venu cet intérêt pour la géométrie ? En quoi consistait sa méthode pour tracer les coniques et comment l'a-t-il élaborée ? C'est ce que nous allons voir ici.

On loue Léonard de Vinci et d'autres figures de la Renaissance pour avoir embrassé l'art et la science comme un tout. Mais pour des artistes comme de Vinci et Dürer, il y avait peu de science à embrasser. Dessiner et peindre à partir de la nature nécessitait une compréhension de la physiologie et de l'optique plus fine que celle offerte par l'œuvre la plus fiable de l'époque, de l'Arabe Alhazen, diffusée en Occident au XIII^{e} siècle par le Polonais Witelo. Si Dürer et les artistes de son temps ont entrepris des recherches scientifiques, c'est autant par nécessité que par curiosité.

L'intérêt de Dürer pour les jeunes artistes l'a incité à écrire un manuel ambitieux destiné à donner de bonnes bases mathématiques à tous les artistes débutants. Imprimé à Nüremberg en 1525, trois ans avant la mort de l'artiste, ce manuel intitulé *Instructions pour la mesure, à la règle et au compas, des lignes, plans et corps solides* a été le premier ouvrage de mathématiques consé-quent rédigé en allemand.

Dürer commence son manuel par un clin d'œil à la légende concernant l'inscription qui, à l'entrée de l'Académie de Platon, avertissait « Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre » : « Le très perspicace Euclide a rassemblé les fondations de la géométrie. Celui qui les entend bien n'a guère besoin de ce qui suit, car ces choses s'adressent uniquement aux jeunes et à ceux qui n'ont personne pour fidèlement les instruire. »

Un manuel de géométrie pour jeunes artistes

Réparti en quatre livres, le manuel s'ouvre sur la définition d'une droite et se conclut par une discussion de dispositifs mécaniques complexes conçus pour faciliter le dessin de perspectives précises. Entre les deux, on trouve des descriptions de spirales, conchoïdes et autres courbes « exotiques ». Les constructions des polygones réguliers sont données, de même que des modèles de polyèdres « ouverts » (des patrons pour les fabriquer en papier). Une partie importante est consacrée à la typographie, avec une construction modulaire de l'alphabet gothique. Un artiste qui souhaite dessiner une crosse d'évêque apprend comment le faire avec un compas et une règle…

Si Dürer a écrit son ouvrage dans sa langue maternelle, c'est certes pour le rendre accessible à tous, même à ceux qui ont eu une éducation limitée, mais aussi parce que sa connaissance du latin – utilisé dans les livres savants – était rudimentaire. Fils d'orfèvre, il aurait pu ne jamais aller à l'école si son père, ayant remarqué son intelligence, ne l'avait envoyé apprendre à lire et à écrire dans une école voisine. L'imprimerie n'avait été inventée que 40 ans auparavant. Les livres étaient encore un luxe et l'apprentissage, un long processus oral à partir d'ardoises ou de tablettes d'écriture en cire.

À 13 ans révolus, Dürer dut quitter l'école et apprendre le métier de son père. Un autoportrait dessiné à l'époque témoigne déjà de son talent artistique. Pourquoi ce fils de commerçant a-t-il alors commencé à étudier les travaux d'anciens géomètres grecs tels qu'Euclide et Apollonius ? Une partie de la réponse réside dans l'atmosphère intellectuelle de Nüremberg à cette époque. En 1470, Anton Koberger avait fondé la première imprimerie de la ville. Un an plus tard, il était devenu le parrain de Dürer. Les sciences et les techniques étaient si appréciées à Nüremberg que l'astronome Johannes Müller – aussi nommé Regiomontanus – s'était établi dans la ville et y avait installé un observatoire dans sa maison.

Le reste de la réponse est apporté par la dédicace des *Instructions pour la mesure* : « À mon très cher maître et ami, Monsieur Wilbolden Pirckheymer je souhaite moi, Albrecht Dürer, salut et prospérité. » Descendant de l'une des familles les plus riches et puissantes de Nüremberg, Pirckheimer était un humaniste cultivé et possédait une bibliothèque inestimable. Sa maison était un lieu de réunions pour les esprits brillants de Nüremberg. Malgré leur différence de rang social, Dürer

Sauf mention contraire ci-dessus, les photographies sont reproduites avec l'aimable autorisation de l'auteur

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

et Pirckheimer étaient devenus amis pour la vie. Au cours de ses voyages, Dürer repérait et achetait, au nom de Pirckheimer, des pierres précieuses et autres objets de valeur pour ses collections ; Pirckheimer, quant à lui, ouvrait à Dürer sa bibliothèque, lui donnant accès à des livres rares et à des traductions d'ouvrages en grec et en latin.

L'ouvrage de Dürer traite de « mesure », mais le terme harmonie serait plus proche de ce qu'il recherchait. À 23 ans, Dürer s'était émerveillé devant un dessin d'hommes et de femmes, fondé sur la géométrie, de l'artiste vénitien Jacopo de' Barbari. En dépit du fait que de' Barbari ne voulait pas partager ses méthodes – ou peut-être à cause de cela –, le jeune homme avait acquis la conviction que les mathématiques le conduiraient aux secrets de la beauté. Il avait alors consacré le reste de sa vie à cette quête.

Voyages en Italie

Avide d'en apprendre plus sur la nouvelle science de la perspective, et aussi pour échapper à des épidémies de peste chez lui, il avait fait deux voyages en Italie. À son retour du premier, sa productivité avait monté en flèche. Au cours du second, il avait rencontré des collègues artistes, dont le maître Giovanni Bellini, qui appréciait son travail. Dürer en avait conclu que les artistes allemands pouvaient atteindre le niveau des Italiens s'ils apprenaient les fondations de leur art, notamment la géométrie. Ces connaissances leur éviteraient nombre d'erreurs. Il était revenu avec une édition des *Éléments* d'Euclide, sur laquelle il avait noté : « J'ai acheté ce livre à Venise pour un ducat l'année 1507. »

À son retour, Dürer avait acheté une maison à Nüremberg et s'était plongé dans l'étude des mathématiques. Il avait commencé à travailler sur *Quatre livres des proportions du corps humain*, avant de se rendre compte qu'il demandait trop de prérequis mathématiques aux jeunes lecteurs à qui il destinait l'ouvrage. Un livre introductif était nécessaire – *Instructions pour la mesure*.

Il interrompit ses travaux en 1523, quand il fit l'acquisition de dix livres provenant de la bibliothèque de Bernhard Walther (1430-1504), mathématicien à Nüremberg. Walther avait été un étudiant de Regiomontanus et avait reçu de lui plusieurs ouvrages et documents importants. Toutefois, il avait toujours refusé de les montrer à d'autres. À sa mort, sa bibliothèque était restée la propriété de ses exécuteurs testamentaires jusqu'à sa mise en vente… deux décennies plus tard. Dürer a alors pris deux ans pour étudier les idées contenues dans les livres que Pirckheimer avait sélectionnés pour lui.

Dans les mêmes années, en outre, la santé de Dürer faiblit. En décembre 1520, il

L'AUTEUR



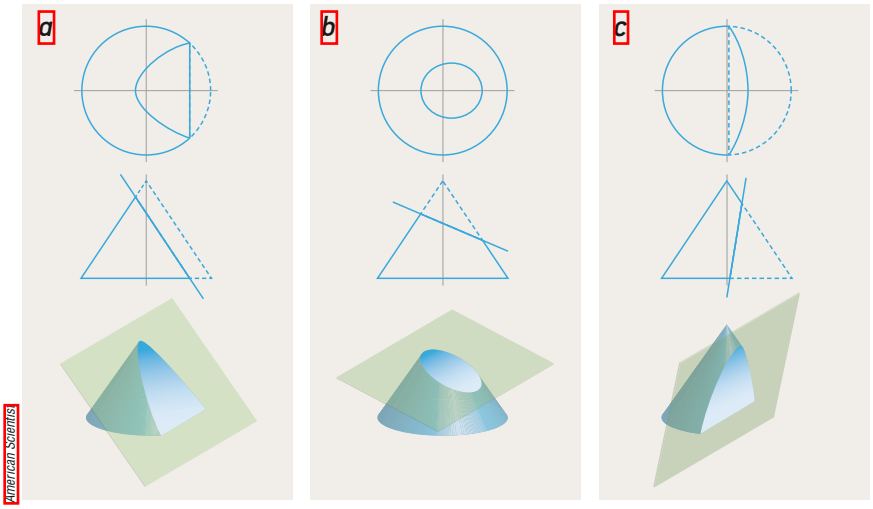
Daniel SILVER est professeur de mathématiques à l'Université de l'Alabama du Sud, aux États-Unis.

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



© Bridgeman Art Library / CORBIS

1. SUR CETTE GRAVURE CÉLÈBRE de Dürer, *Melencolia I* (1514), une erreur rappelle ses réflexions sur les coniques : la base de la cloche, en haut à droite, a une forme ovoïde. Dürer pensait en effet que les ellipses avaient la forme d'un œuf.



American Scientist

avait fait un voyage pénible jusqu'aux marais de Zeeland au Sud-Ouest des Pays-Bas, espérant observer une baleine qui s'était échouée. Hélas, non seulement la baleine avait été emportée par la mer, mais l'endroit n'était pas sain, et Dürer y avait contracté une maladie chronique qui l'emporta après huit années douloureuses – trois ans après la publication de ses *Instructions pour la mesure*.

L'art de couper un cône

Parmi les nombreuses questions géométriques traitées par Dürer dans son manuel, la représentation qu'il propose des sections coniques est intéressante à plus d'un titre. D'une part, les techniques qu'il a mises au point pour les dessiner préfigurent la géométrie descriptive développée à l'aube du XIXe siècle par le mathématicien français Gaspard Monge (1746-1818) – une technique de représentation de l'espace dans le plan au moyen de projections. D'autre part, les courbes obtenues par Dürer ont nourri les réflexions de ses contemporains en astronomie.

« Les Anciens ont montré que l'on peut couper un cône de trois façons et obtenir ainsi trois sections différentes, qui ne sont pas circulaires comme la base du cône » écrit Dürer vers la fin du Livre I, en ajoutant qu'il souhaite enseigner comment les tracer.

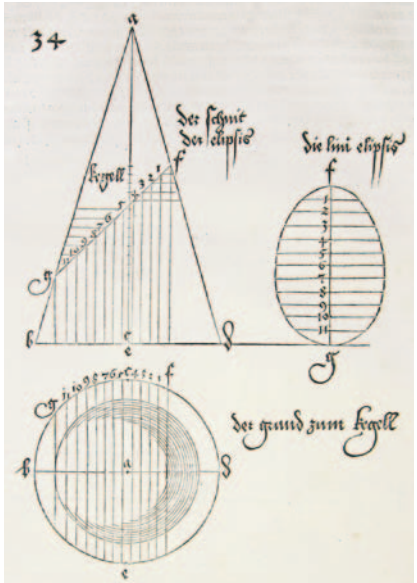
On attribue à Ménechme la découverte des coniques au IVe siècle avant notre ère. Il les aurait trouvées alors qu'il essayait de résoudre le célèbre problème de la « duplication du cube ». Selon la légende, un oracle aurait assuré aux citoyens terrifiés de l'île de Délos, en Grèce, que l'épidémie de peste cesserait s'ils doublaient la taille de l'autel cubique d'Apollon. Si la légende est douteuse, le problème, qui revenait à construire, à la règle et au compas, un cube dont l'arête a pour longueur la racine cubique de 2 (le cube initial ayant pour arête l'unité), était bien connu à l'époque de Ménechme.

Bien plus tard, en 1837, le mathématicien français Pierre Wantzel montrera que la duplication du cube à la règle et au compas est impossible. Ménechme, cependant, a apporté une solution en changeant les règles du jeu. En coupant respectivement un cône rectangle (dont l'angle au sommet est droit) et un cône obtus (plus ouvert) avec un plan perpendiculaire à l'une de leurs génératrices (les droites qui, partant du sommet, constituent le cône), il a produit deux courbes, plus tard nommées parabole et hyperbole. Et par l'intersection d'une parabole et d'une hyperbole particulières, il a formé un segment de droite ayant pour longueur la racine cubique de 2.

Il a aussi construit une troisième courbe, l'ellipse, en coupant cette fois un cône plus pointu par un plan perpendiculaire à une génératrice. Un siècle plus tard, Apollonius de Perge nomma ces trois courbes *parabolê*, *ellipsis* et *huperbolê* (respectivement application simple, manque et excès en grec). Apollonius a généralisé de façon élégante la théorie des coniques. Au lieu d'utiliser trois types de cônes, comme Ménechme, il n'en a considéré qu'un seul, et c'est en le coupant par un plan selon différents angles qu'il a produit les trois coniques.

Pour dessiner les coniques, Dürer introduit une méthode féconde dite de projection parallèle. Cette technique était familière à tous les architectes et charpentiers, mais n'avait jamais été appliquée auparavant pour la résolution d'un problème purement mathématique, explique l'historien de l'art Erwin Panofsky en 1943 dans *La vie et l'œuvre d'Albrecht Dürer*. La méthode de Dürer est simple : il considère un cône coupé vu de dessus et vu de côté, puis en

2. UN PLAN COUPANT UN CÔNE engendre diverses courbes, nommées sections coniques (ou coniques). Des vues de dessus et de côté du cône montrent comment la modification de l'angle du plan sécant avec une génératrice engendre une parabole *(a)*, une ellipse *(b)* ou une hyperbole *(c)*. Le manuel d'*Instructions* de Dürer avait pour objectif de montrer aux artistes comment dessiner ces formes.



3. POUR CONSTRUIRE UNE ELLIPSE, Dürer utilisait une méthode dite de projections parallèles : un cône droit coupé par un plan oblique est observé de côté et de dessus *(à gauche)*. Il est aussi coupé par 11 plans horizontaux dont les projections sur les deux vues donnent la position de 22 points de l'ellipse par rapport à son axe de symétrie *(à droite)*. Malgré un raisonnement correct, l'ellipse de Dürer est ovoïde.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

déduit la projection verticale du plan de section du cône – c'est-à-dire la conique. Son astuce consiste à combiner les deux vues et à reporter à l'aide d'un compas, sur le plan de coupe, les distances mesurées sur les deux vues *(voir les figures 3 à 5)*.

L'erreur de Dürer

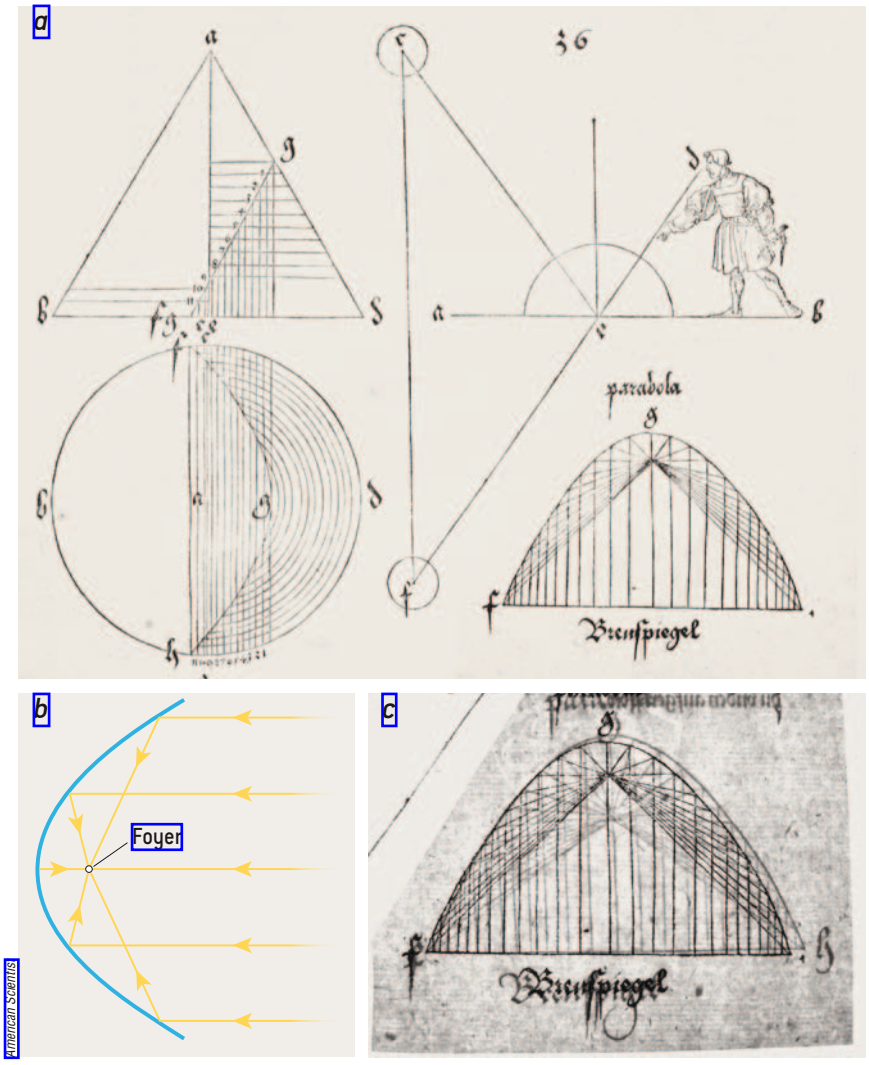
La méthode de Dürer est correcte, mais, concernant l'ellipse, le maître dessinateur a commis une erreur en transférant les mesures. Il croyait à tort que l'ellipse était plus large à la base du cône qu'en son sommet et cette interprétation erronée a influencé sa main. Dürer nomme d'ailleurs cette courbe « ligne en œuf », car elle « ressemble à un œuf bien fait ». On repère ainsi plusieurs ellipses ovoïdes dans ses œuvres, tel l'ovale de la cloche *de Melancolia I (voir la figure 1)*. Dürer ne connaissait pas de terme allemand équivalent au mot grec *ellipsis*. L'appellation qu'il a imaginée attira l'attention sur son erreur, mais la courbe en œuf persista dans les travaux allemands pendant presque un siècle.

À l'aube du XVII[e] siècle, notamment, l'astronome allemand Johannes Kepler a lu la description de l'ellipse faite par Dürer, comme le révèle sa lettre à l'astronome David Fabricius datée du 11 octobre 1606 : « Donc, Fabricius, j'ai déjà ceci : que la trajectoire la plus vraie de cette planète [Mars] est une ellipse, que Dürer appelle aussi un ovale, ou certainement si proche d'une ellipse que la différence est insensible. » En 1600 en effet, Kepler s'était lancé dans la compréhension d'un grand mystère de l'astronomie : la trajectoire de Mars. Défenseur du système héliocentrique de Copernic, il avait d'abord pensé que l'orbite de Mars autour du Soleil était une sorte d'ovale, dont il avait essayé de préciser la forme grâce aux observations des positions de la planète.

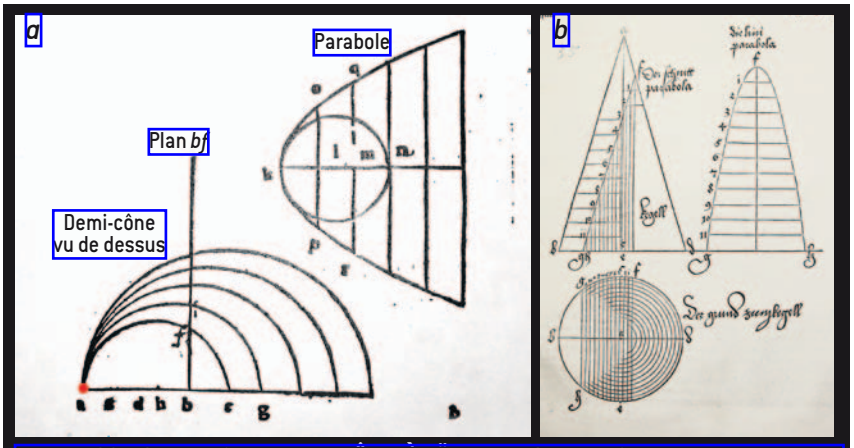
Il n'était pas le premier à croire que l'orbite d'une planète pouvait avoir la forme d'un œuf. Georg von Peuerbach (1423-1461), un professeur de Regiomontanus, évoquait déjà cette idée dans son ouvrage *Theoricae novae planetarum*. Publié à Nüremberg en 1473 et réimprimé 56 fois, le traité de Peuerbach a influencé tant Copernic que Kepler. L'édition de 1553, par Erasmus Reinhold, un élève de Copernic, incluait un commentaire sur l'orbite de Mercure qui a pu inciter Kepler à se pencher sur le manuel de Dürer (qu'il connaissait déjà pour sa méthode de représentation des ombres en perspective) : « L'orbite de Mercure a la forme d'un œuf, l'extrémité large se trouvant vers son apogée et la pointe vers son périgée. »

En 1604, Kepler fut le premier à distinguer l'ovale de l'ellipse : de nouvelles mesures de la position de Mars l'avaient convaincu que son orbite est bien une ellipse, telle que définie par les Anciens grecs, et non un ovoïde. Sa découverte n'empêcha pas, cependant, la représentation d'ellipses en œuf jusqu'au milieu du XVII[e] siècle.

Dürer utilise aussi sa méthode – sans erreur cette fois – pour construire une parabole et une hyperbole, qu'il nomme ligne d'incandescence et ligne en fourche. Dans ce qui peut ressembler à une opération commerciale visant à promouvoir la parabole, sans doute peu connue de ses lecteurs,



4. LA MÉTHODE DE PROJECTION PARALLÈLE DE DÜRER appliquée à la parabole *(a)*. S'inspirant de l'optique grecque, Dürer expliqua qu'un miroir en forme de paraboloïde de révolution pouvait être utilisé comme miroir ardent : tous les rayons parallèles à l'axe seraient réfléchis vers un point, le foyer de la parabole *(b)*. Mais il positionna mal le foyer et dut publier une correction qu'il colla dans chaque copie de son manuel *(c)*.



5. EN 1522, JOHANNES WERNER, PRÊTRE À NÜREMBERG ET ARTISAN, avait lui aussi publié une construction de la parabole *(a)* qui a sans doute influencé celle de Dürer *(b)*. Il considérait un cône oblique vu de dessus (son sommet est à la verticale du point rouge) coupé par un plan vertical *bf*. En coupant le cône par des plans parallèles à la base du cône et régulièrement espacés, il obtenait des cercles sur la vue de dessus, dont l'intersection avec le plan *bf* donnait la position des points correspondants de la parabole par rapport à son axe de symétrie.

Dürer raconte comment cette courbe peut devenir une arme de destruction massive : un miroir ardent tel que celui conçu au III^e^ siècle par Dosithée de Péluse, un correspondant alexandrin d'Archimède. Un tel miroir, en forme de paraboloïde de révolution (surface engendrée par une parabole tournant autour de son axe de symétrie), focalise tous les rayons parallèles à l'axe de symétrie vers un point, nommé foyer de la parabole. Si ce miroir collecte suffisamment de lumière, tout ce qui se trouve au foyer brûle.

En pratique, il est difficile, voire impossible, de fabriquer un miroir ardent, tant sa taille doit être grande pour recueillir assez de lumière. Mais Dürer veut surtout expliquer ce qu'est une parabole et comment la construire : « Si tu veux faire un miroir ardent de la parabole ou ligne d'incandescence ci-dessus décrite, construis le cône, par l'intersection duquel tu vas obtenir la parabole, tel que sa hauteur ne dépasse pas la largeur de sa base ou tel que le cône soit un triangle rectangle. »

Une grande partie de ce que savait Dürer sur les coniques venait de Johannes Werner, un ancien étudiant de Regiomontanus devenu un fabricant d'instruments accompli. Son traité sur les coniques, *Libellus super viginti duobus elementis conicis*, publié en 1522, à l'époque où Dürer étudiait les coniques, énonçait 22 théorèmes sur les coniques utiles pour comprendre les travaux ultérieurs de l'auteur sur le problème de Délos.

Depuis 1508, Werner officiait comme prêtre à l'église de Saint Jean, non loin de la maison de Dürer. Il devait être en outre, tout comme Dürer, un hôte assidu de Pirckheimer, à qui il a dédicacé un de ses ouvrages. Lui aussi avait acquis certains livres et documents rares de Walther, mais, ne connaissant pas le grec, il dépendait probablement de Pirckheimer pour la traduction. Il se peut que Dürer ait été influencé par la construction de la parabole proposée par Werner. Les tranches parallèles de cône utilisées par Dürer dans sa méthode de projection parallèle ne sont pas sans évoquer celles représentées par Werner dans son traité *(voir la figure 5)*.

La formule de Werner

En témoigne une erreur de Dürer qui semble liée à sa lecture de Werner. Dans un appendice de son livre, Werner explique comment localiser le foyer d'une parabole dans le cas où le cône est oblique. Or la formule de Werner ne s'applique pas au cône droit utilisé par Dürer pour construire sa parabole. Dürer a-t-il utilisé de façon incorrecte la formule de Werner ? Ou a-t-il simplement (mal) estimé la position du foyer ? Le fait est que, dans chaque copie de sa publication de 1525, un petit morceau de papier portant le dessin correct a été collé à la main sur le dessin erroné *(voir la figure 4)*.

Par son ouvrage, Dürer a ouvert un passage à double sens entre les mathématiques et l'art. Comme l'observe Panovsky : « Tandis que [son manuel] familiarisait les tonneliers et les ébénistes avec Euclide et Ptolémée, il familiarisait aussi les mathématiciens professionnels avec ce que l'on pourrait appeler "la géométrie d'atelier". » Dürer a utilisé la géométrie pour rechercher la beauté, sans pour autant substituer les mathématiques à l'esthétique. C'était avant tout un outil pour permettre à l'artiste d'éviter les erreurs. Néanmoins, au fil de son manuel, on s'aperçoit que les mathématiques signifiaient beaucoup plus pour lui : connaître les lois géométriques pour représenter la nature lui avait plus encore révélé toute sa beauté. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Vitrac, **Le roman conique et l'apport d'Apollonius,** dans **Les Géomètres de la Grèce antique,** *Les Génies de la Science*, n° 21, pp. 82-89, 2004.

E. Panofsky, **La vie et l'art d'Albrecht Dürer,** Hazan, 2004.

A. M. Lombardi, **Kepler,** Belin, 2003.

A. Dürer et J. Peiffer (trad. et éd.), **Géométrie,** Seuil, 1995.

J. Peiffer, **Dürer, le peintre géomètre,** *Pour la Science*, n° 184, pp. 10-12, 1993.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

puf

POUR LA SCIENCE

Éditions Le Pommier

Depuis seize ans, *Le Monde* soutient les jeunes chercheurs et la recherche.
Lancé en 1997, le Prix *Le Monde* de la recherche universitaire entend valoriser les premiers travaux de jeunes chercheurs francophones susceptibles d'influencer notre environnement scientifique, économique, social et/ou artistique.

Cette année, à l'issue du concours présidé par le philosophe Edgar Morin pour les sciences humaines et sociales et par l'académicien Pierre Léna pour les sciences dites «dures», ce prix offrira la possibilité à cinq docteurs récemment diplômés en sciences humaines et sociales de publier leur thèse aux Presses universitaires de France et à cinq docteurs en sciences dites «dures» de publier un résumé de leurs travaux dans *Pour la Science* et dans un ouvrage publié aux Éditions Le Pommier.
Par ailleurs le quotidien *Le Monde* présentera l'ensemble de ces thèses dans un cahier spécial. Les thèses à fortes composantes interdisciplinaires seront les bienvenues.

16e édition

PRIX Le Monde DE LA RECHERCHE UNIVERSITAIRE

Pour sa seizième édition, le Prix *Le Monde* de la recherche universitaire est ouvert aux :

Doctorats de sciences humaines et sociales (toutes disciplines) soutenus entre le 31 octobre 2011 et le 31 décembre 2012.
Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 1er mai 2013 inclus.

Doctorats de sciences mathématiques, mécaniques, informatiques, physiques, chimiques, sciences de la Terre et de l'univers, sciences du vivant, neurosciences, médecine (doctorats de recherche uniquement), etc., ainsi que dans les technologies correspondantes soutenus entre le 31 octobre 2011 et le 31 décembre 2012.
Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 1er mai 2013 inclus.

RENSEIGNEMENTS COMPLEMENTAIRES ET INSCRIPTIONS
Site internet : www.lemonde.fr/prix-recherche/
Email : prixrecherche@lemonde.fr

Le Monde

FONDATION CREDIT COOPERATIF
FONDATION D'ENTREPRISE

fph Fondation Charles Léopold Mayer pour le Progrès de l'Homme

LOGIQUE & CALCUL

Des cartes bien mélangées

Les mathématiciens comprennent de mieux en mieux le mélange des cartes. Toutefois, malgré des avancées significatives, l'affaire reste délicate.

Jean-Paul DELAHAYE

Quand nous faisons un tour de magie avec des cartes ou plus simplement avant de les distribuer, nous les mélangeons. Ce faisant, notre but est d'arriver à un désordre convenable qui ne favorise aucune distribution et aucun joueur. Mais qu'est-ce que cela signifie vraiment ? Les mathématiques aident-elles à mieux cerner le problème ?

De nombreuses personnes s'étonnent quand on leur dit qu'il y a des progrès en mathématiques. Pour elles, cette science millénaire est à un point de maturité tel que les découvertes et les nouveautés y deviennent rares. Sur un sujet banal comme le mélange d'un paquet de cartes, il n'y a, pensent-elles, certainement plus rien à dire. C'est totalement faux. Non seulement les mathématiques n'ont jamais été aussi actives, mais, même sur des sujets apparemment élémentaires et aussi anciens que le mélange des cartes, de nouvelles connaissances sont élaborées chaque année. Certaines recherches récentes répondent enfin aux questions que tout joueur se pose sur le désordre du paquet.

Deux grands types de méthodes conduisent à des questions et des mathématiques différentes : les mélanges déterministes et les mélanges probabilistes.

Un mélange déterministe est tel que quand nous l'effectuons une première fois, puis une seconde en remettant le paquet dans le même ordre initial, nous obtenons exactement le même résultat. Le hasard n'intervient pas.



Francesco de Comite

Les mélanges probabilistes ne donnent pas le même ordre des cartes à chaque fois, car ils dépendent de facteurs aléatoires et qui échappent à celui effectuant la manipulation, sauf s'il triche.

Commençons par le plus simple des mélanges déterministes, qui est le mélange *Faro Out* (on dit aussi *Pharaon Out*, ou *Perfect Shuffle* en anglais).

– On coupe le paquet en deux parties ayant exactement le même nombre de cartes, le dessus A et le dessous B. On les intercale de façon à alterner parfaitement les cartes du paquet A et du paquet B, et en s'assurant que la carte du dessus du paquet A reste en première position dans le paquet mélangé (la dernière carte reste alors aussi en place).

Exemple : le paquet (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) est séparé en deux, (1, 2, 3, 4) et (5, 6, 7, 8), ce qui, après l'intercalation des deux petits paquets, donne l'ordre (1, 5, 2, 6, 3, 7, 4, 8). Si, au moment de l'insertion, on fait passer la carte numéro 1 de A en position 2, ce qui donne (5, 1, 6, 2, 7, 3, 8, 4), le mélange est nommé *Faro In*. En opérant trois fois de suite le *Faro Out* sur un paquet de huit cartes, on revient à l'ordre initial : (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) → (1, 5, 2, 6, 3, 7, 4, 8) → (1, 3, 5, 7, 2, 4, 6, 8) → (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8).

Les prestidigitateurs connaissent bien ces mélanges et certains savent les faire de manière parfaite plusieurs fois de suite. Un petit film (http://bit.ly/pls425_delahaye_houston) montre le mathématicien Kevin Houston, de l'Université de Leeds, réaliser huit fois de suite un *Faro Out* avec un jeu de

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

52 cartes... ce qui le remet en ordre. Pour le *Faro Out*, le nombre k de fois qu'il faut opérer le mélange pour revenir à l'ordre initial dépend du nombre n de cartes. Il est donné par la liste $(n,k) = (2,1), (4,2), (6,4), (8,3), (10,6), (12,10), (14,12), (16,4), (18,8), (20,18), (22,6), (24,11), (26,20), (28,18), (30,28), (32,5), (34,10), (36,12), (38,36), (40,12), (42,20), (44,14), (46,12), (48,23), (50,21), (52,8)$.

Vous compléterez ce tableau si vous le voulez en sachant que si n est pair, le temps de retour pour le mélange *Faro Out* est le plus petit entier k tel que $2^k - 1$ soit un multiple de $n - 1$.

Quel que soit le nombre de cartes, le *Faro Out* opéré de manière répétitive ramène toujours l'ordre initial et cette propriété est vraie pour tout mélange déterministe. En répétant le même mélange déterministe, quel qu'il soit, vous finissez toujours par retrouver le paquet tel qu'il était avant de commencer. Cette propriété résulte de ce que l'on sait en théorie des groupes depuis le XIX^e siècle.

La méthode générale pour calculer le temps de retour d'un mélange déterministe n'est pas compliquée : on repère la taille des cycles du mélange (avec huit cartes, pour le *Faro Out*, la carte 2 passe en position 3, puis en position 5, puis revient en position 2 : elle décrit un cycle d'ordre 3) et on calcule le plus petit commun multiple des cycles.

Déplacements contrôlés

Cependant, ce résultat n'est qu'un point de départ et une théorie complète des mélanges *Faro Out* et *Faro In* n'a été formulée qu'en 1983 par Persi Diaconis, Ron Graham et William Kantor. Parmi les propriétés des mélanges déterministes *Faro Out* et *Faro In,* celle-ci est très jolie et sert de base à divers tours de magie. En enchaînant les mélanges *Faro Out* et *Faro In* de manière appropriée, on déplacera la carte située au-dessus du paquet pour qu'elle se retrouve en position n. La méthode est la suivante. On décompose en base 2 l'entier $n-1$. Ainsi, pour $n = 7$, $n - 1$, soit 6, s'écrit 110. Pour déplacer la carte du dessus vers la position n, on lit les 1 de la décomposition en base 2 comme des I de *In* et les 0 comme des O de *Out*. Pour 110, la consigne est donc de faire, dans l'ordre, les opérations *Faro In*, *Faro In*, *Faro Out*. Vérification : $(1,2,3,4,5,6,7,8) \xrightarrow[Faro\,In]{} (5,1,6,2,7,3,8,4) \xrightarrow[Faro\,In]{} (7,5,3,1,8,6,4,2) \xrightarrow[Faro\,Out]{} (7,8,5,6,3,4,1,2)$. La carte du dessus est passée en position 7.

Le problème inverse, posé par le Britannique Alex Elmsley (le découvreur de cette méthode pour déplacer la carte du dessus), est resté irrésolu plus de 30 ans. Dans quel ordre faut-il exécuter les *Faro Out* et *Faro In* de façon à déplacer la carte située en position n vers le dessus ? La solution générale n'a été donnée qu'en 2007 par P. Diaconis et R. Graham. Elle est un peu trop compliquée pour être décrite ici... et surtout par Persi Diaconis, Ron Graham et William Kantor, mais ce n'est qu'en 2006 que P. Diaconis et R. Graham ont réussi à trouver, dans le cas général, la séquence de *Faro Out* et de *Faro In* permettant de déplacer la carte en position initiale n pour qu'elle aboutisse sur le dessus du paquet.

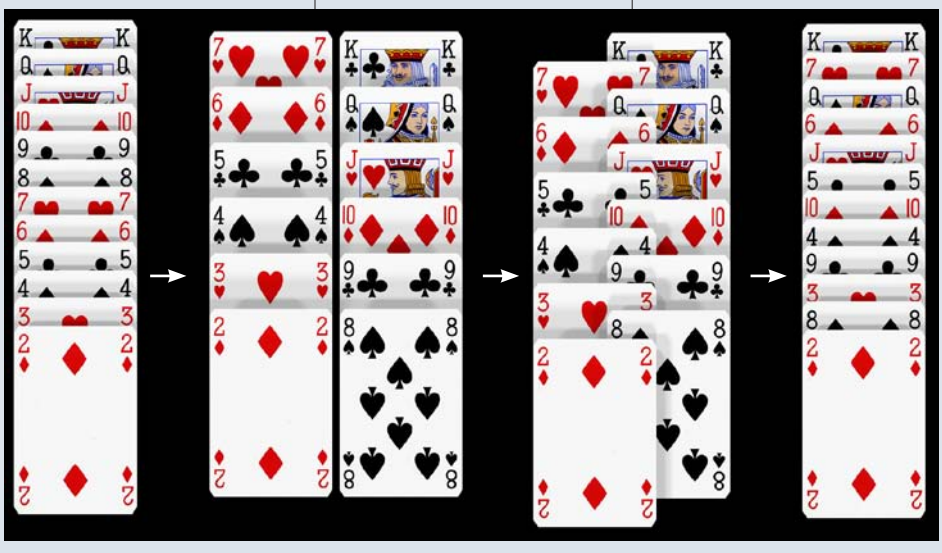
Les mélanges *Faro Out* et *Faro In*

Le mélange de cartes *Faro Out* (ou *Pharaon*) est le mélange déterministe qui consiste à intercaler parfaitement la moitié supérieure du paquet dans la moitié inférieure en s'arrangeant pour que la première carte du paquet reste la première carte après le mélange (si elle passe en second, il s'agit du *Faro In*). Bien que difficile à réaliser, de nombreux prestidigitateurs et quelques mathématiciens réussissent la séparation parfaite en deux paquets ayant le même nombre de cartes, suivie de l'insertion parfaite des deux moitiés.

Comme pour tous les mélanges où aucun hasard n'intervient, en opérant le mélange *Faro Out* plusieurs fois, on finit par reconstituer l'ordre initial du paquet. Pour un jeu de 52 cartes, il faut opérer huit fois de suite.

Ce mélange a été utilisé pour tricher. Une première mention en est faite dans le livre anonyme *Whole Art and Mystery of Modern Gaming* paru à Londres en 1726. Aux États-Unis, il est expliqué dans des livres de tricherie en 1843 à Cincinnati, et en 1860 à New York. L'idée d'utiliser les mélanges *Faro* dans des tours de magie est mentionnée en 1919 dans un ouvrage de C. T. Jordan. Le mathématicien Paul Lévy s'y intéressa dans les années 1940-1950 et démontra que si le nombre de cartes est une puissance de 2, disons 2^k, alors k mélanges *Faro Out* successifs ramènent au paquet initial.

Alex Elmsley, informaticien à Londres, découvrit en 1975 le procédé permettant de faire passer la carte du dessus à la position n. Une théorie complète de ces mélanges a été proposée en 1983



Francesco de Comité

Un casino mauvais joueur !

Battre les cartes est important, comme le montre l'histoire suivante arrivée en avril 2012 au casino *The Golden Nugget* à Atlantic City (ville réputée pour ses jeux sur la côte Est des États-Unis), qui risque de perdre 1,5 million de dollars au minibaccara. Le fournisseur de jeux de cartes du casino, qui ne devait livrer que des jeux bien mélangés, commit l'erreur d'en fournir qui ne l'étaient pas. Le croupier inattentif utilisa, sans s'apercevoir de son erreur, un paquet parfaitement classé. Des joueurs remarquèrent la régularité des cartes qui sortaient et, en l'exploitant, gagnèrent 41 fois de suite (leurs mises allaient bien sûr en croissant). Les surveillants de la salle du jeu, voyant ces gains anormaux, se précipitèrent. Ils soupçonnèrent une subtile arnaque avant de comprendre, un peu tard, qu'il n'y en avait pas.

Le casino refusa de payer les gains des joueurs qui n'avaient pourtant enfreint aucune règle. Les tribunaux sont maintenant chargés de régler l'affaire, les joueurs réclamant leur dû. Le casino se défend en prétextant que le jeu était illégal du fait que les cartes n'étaient pas mélangées, mais il attaque aussi le fournisseur de jeux de cartes qui a commis l'erreur initiale. L'avocat des joueurs avance, lui, l'argument qu'« il n'existe aucune loi de l'État du New Jersey permettant au *Golden Nugget* de déclarer le jeu nul parce qu'un jeu de cartes classé a été utilisé ». (Voir www.dailymail.co.uk/news/article-2191343/Casino-sues-gamblers-won-1-5m-unshuffled-cards.html.)





pour être pratiquée de tête par un magicien qui souhaiterait l'utiliser pour un tour ; elle constitue donc une méthode théorique de prestidigitation !

Venons-en aux véritables mélanges qui, parce qu'ils se fondent sur le hasard, ne sont pas utilisés par les tricheurs ou les prestidigitateurs, mais par les joueurs soucieux d'équité.

Cinq ou six mélanges probabilistes différents sont pratiqués autour des tables de jeu, sans compter les mélanges par machine. La méthode de loin la plus courante est le mélange américain ou mélange en queue-d'aronde. Il consiste à opérer comme pour le mélange pharaon, mais de manière imparfaite... ce qui est plus facile !

Après avoir séparé le paquet en deux parties A et B à peu près égales, on les insère l'une dans l'autre. Cela produit un nouveau paquet contenant dans l'ordre : quelques cartes du début de A, suivies de quelques cartes du début de B, suivies de quelques cartes de A (venant après celles déjà utilisées de A), suivies de quelques cartes de B (venant après celles déjà utilisées de B), etc. Cette méthode de mélange semble très bonne, car les nombreux petits paquets de cartes qui s'intercalent bouleversent totalement et de manière imprévisible l'ordre initial des cartes, et cela même si le mélange n'est effectué qu'une seule fois. Comment aller au-delà de cette impression, peut-être illusoire ?

Henri Poincaré a consacré huit sections de son livre *Calcul des probabilités* de 1912 au problème du mélange des cartes. Il y propose un résultat général concernant les mélanges aléatoires et qui s'applique donc au mélange américain. Poincaré établit qu'à la longue, ces mélanges désordonnent vraiment un jeu. Le nombre de façons dont on peut ordonner n cartes est égal à $n(n-1)(n-2)...1$, produit noté $n!$ (« factorielle n »). Un jeu est bien battu quand aucun ordre particulier de cartes n'est plus probable qu'un autre. Par une méthode qui anticipe ce que l'on nommera « les chaînes de Markov », Poincaré démontre que plus on effectue un mélange probabiliste, plus la probabilité que le paquet de n cartes soit dans un ordre donné s'approche de $1/n!$. Conformément à l'intuition de tout joueur de cartes, un mélange aléatoire effectué avec suffisamment d'application produit exactement ce qu'on attend : un choix équitable entre tous les ordres possibles du paquet de cartes.

Malheureusement, Poincaré n'indique rien sur la vitesse avec laquelle les probabilités des différents ordres s'approchent de $1/n!$; ses travaux ne nous informent donc pas sur le nombre de mélanges à effectuer en pratique avant de pouvoir s'arrêter quand on est à la table de jeu. Les mathématiciens français Émile Borel, Jacques Hadamard et Paul Lévy se sont aussi intéressés aux problèmes du mélange d'un paquet de cartes. Borel, sans en produire de démonstration, formula l'idée que pour bien mélanger un jeu de 52 cartes, sept mélanges américains suffisent.

Un modèle mathématique du mélange américain

La théorie mathématique permettant de prouver rigoureusement cette affirmation ne viendra que progressivement de travaux plus tardifs que nous allons décrire. Le nom de Persi Diaconis, cet extraordinaire mathématicien américain qui commença sa vie comme illusionniste professionnel et la poursuivit comme professeur de statistiques à l'Université de Stanford, reviendra souvent.

Le premier pas vers l'évaluation précise du nombre de mélanges à effectuer est dû aux Américains Edgar Gilbert et Claude Shannon qui décrivent en 1955 un modèle réaliste de ce qui se passe quand on effectue une opération de mélange américain. Ils proposent que le paquet est séparé en deux paquets (généralement inégaux) de p et p' cartes ($p+p'=n$) avec la probabilité $C(n,p)/2^n$, où $C(n,p)$ est le célèbre coefficient du binôme de Newton, égal à $n!/[p!(n-p)!]$. Cette hypothèse sur la probabilité de séparer un paquet en deux correspond à la densité dite binomiale (ou « courbe en cloche ») qui est considérée comme la plus vraisemblable pour un phénomène de cette nature.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Si par exemple vous séparez en deux un paquet de huit cartes, cette loi binomiale indique que vous aurez la séparation 4-4 dans 27,4 % des cas, la séparation 3-5 (ou 5-3) dans 21,9 % de cas, la séparation 2-6 (ou 6-2) dans 10,9 % des cas, la séparation 1-7 (ou 7-1) dans 3,1 % des cas, et la séparation 0-8 (ou 8-0) dans 0,4 % des cas. Le dernier cas est un peu étrange, mais l'exclure ne changerait pas grand-chose.

Pour l'insertion des deux paquets obtenus l'un dans l'autre, le modèle de Gilbert et Shannon est, à nouveau, aussi simple et naturel que possible : lorsqu'on intercale un paquet A de p cartes dans un paquet B de p' cartes, la probabilité pour que la première carte du nouveau paquet soit la carte au-dessus de A est $p/(p+p')$, et elle est de $p'/(p+p')$ que ce soit la carte au-dessus de B. La même idée est reprise quand une ou plusieurs cartes sont déjà déterminées en tête du nouveau paquet, et qu'il reste à insérer deux paquets devenus plus petits.

Des expériences réalisées par P. Diaconis en 1988 ont confirmé que le modèle de Gilbert et Shannon est satisfaisant et constitue donc une bonne modélisation mathématique, un peu idéalisée mais pas trop, de ce qu'on fait quand on effectue le mélange américain. Restait à exploiter ce modèle pour évaluer le nombre de mélanges nécessaires à une mise en désordre convenable du jeu de cartes.

La solution a été publiée en 1992 par Dave Bayer et P. Diaconis (toujours lui !). Elle se fonde sur une élégante idée mathématique. D'abord, on considère une généralisation du mélange américain et de son modèle théorique : au lieu de séparer le paquet initial en deux, on le sépare en a sous-paquets qui sont ensuite insérés simultanément les uns dans les autres. Plus précisément, le nouveau paquet est constitué en prenant les cartes une à une avec des probabilités proportionnelles aux nombres de cartes de chaque paquet. Le modèle mathématique de cette généralisation reprend les mêmes idées que pour le mélange américain avec une séparation en deux. Un tel mélange, qui demanderait en pratique de disposer de a mains, se dénomme a-mélange américain.

Ensuite, et c'est la clef de tout, les chercheurs ont montré qu'effectuer un a-mélange américain suivi d'un b-mélange américain équivaut à réaliser un ab-mélange américain. Ce beau résultat permet d'affirmer que réaliser k fois un mélange américain habituel (c'est-à-dire un 2-mélange américain) revient à effectuer un 2^k-mélange américain. Grâce à cette vision simplifiée de ce qu'est l'opération de mélange américain répétée k fois, il devient possible de connaître la probabilité exacte que k mélanges américains consécutifs produisent un ordre donné, ce qui permet alors de savoir si l'on s'est assez approché du mélange idéal, où chaque ordre possible a une probabilité 1/n !.

Une formule inattendue

La formule mesurant la qualité du mélange obtenu après un a-mélange américain est remarquable et il est même étonnant qu'une formule aussi simple existe pour décrire l'effet d'une manipulation plutôt compliquée. Voici le résultat et la formule :

La probabilité d'obtenir l'ordre Q, par exemple $Q = (3, 8, 5, 2, 4, 6, 7, 1)$, après un a-mélange américain d'un paquet de n cartes est : $C(a+n-\mathrm{sm}(Q), n)/a^n$.

Dans cette formule, C désigne comme précédemment les coefficients du binôme de Newton et $\mathrm{sm}(Q)$ est le nombre de suites montantes dans la décomposition de Q en suites montantes. Pour notre exemple, $\mathrm{sm}(Q)$ vaut 4, car (3, 8, 5, 2, 4, 6, 7, 1) se décompose en quatre suites montantes : (3, 8), (5), (2, 4, 6, 7), (1).

Voyons une application de la belle formule de Bayer et Diaconis. Partant d'un paquet classé (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) et opérant un 2-mélange américain trois fois de suite, ce qui équivaut à un 8-mélange américain (donc $a = 8$), on obtiendra l'ordre (3, 8, 5, 2, 4, 6, 7, 1), avec une probabilité $C(8+8-4, 8)/8^8 = 12\,!/(8\,!\,4\,!\,8^8) = 2{,}95 \times 10^{-5}$.

C'est assez proche du 1/8 ! attendu, égal à $2{,}48 \times 10^{-5}$. L'écart entre la probabilité d'obtenir (3, 8, 5, 2, 4, 6, 7, 1) que donnerait un mélange idéal (1/8 !) et celle que donne le 2-mélange américain effectué trois fois est de $0{,}47 \times 10^{-5}$. Bien sûr, une série de mélanges américains ne sera satisfaisante que si l'écart entre le $1/n$! attendu et la probabilité d'avoir l'ordre Q est petit en moyenne quand Q varie, ou mieux, si on obtient une somme assez petite quand on additionne tous les écarts pour les n ! ordres possibles.

Cette somme mesure si un mélange américain appliqué k fois est acceptable. Pour que le maximum possible de cette distance soit 1 (ce qui est un repère commode), on calcule la distance d'un mélange américain au cas idéal (où tous les ordres sont équiprobables) en calculant la demi-somme de tous les écarts possibles. Le tableau de résultats ci-dessous, calculé par D. Bayer et P. Diaconis, indique, pour un paquet de n cartes et pour une opération de mélange américain réalisée k fois, la distance obtenue avec le mélange idéal : quand la distance est proche de 1, le mélange est mauvais ; plus la distance est petite, meilleur il est.

Lorsque la distance est inférieure à 1/10, le mélange est jugé convenable : en moyenne,

n \ k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	1,000	1,000	0,999	0,775	0,437	0,231	0,114	0,056	0,028	0,014
32	1,000	1,000	1,000	1,929	0,597	0,322	0,164	0,084	0,042	0,021
52	1,000	1,000	1,000	1,000	0,924	0,614	0,334	0,167	0,085	0,043
78	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,893	0,571	0,307	0,153	0,078
104	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,988	0,772	0,454	0,237	0,119
208	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,914	0,603	0,329
312	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	0,883	0,565

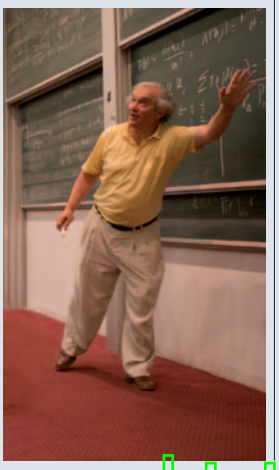
CE TABLEAU INDIQUE, POUR UN PAQUET DE N CARTES et un mélange américain réalisé k fois, la distance séparant le résultat obtenu de celui du mélange idéal, où tous les ordres ont la même probabilité $1/n$! d'apparaître.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

Persi Diaconis, magicien et mathématicien

Persi Diaconis mène des travaux de recherche mathématique aussi bien au sujet des mélanges déterministes qu'au sujet des mélanges aléatoires de cartes. Il s'est aussi intéressé à la physique du pile ou face. Ses résultats ont fait progresser considérablement nos connaissances sur les mélanges de cartes.

Son parcours professionnel est assez singulier. Il est né en 1945. À l'âge de 14 ans, il quitte sa famille pour suivre le prestidigitateur canadien Dai Vernon qui le forme et fait de lui un magicien professionnel. Il pratique le métier durant une dizaine d'années sous le nom de Persi Warren. En 1971, comme il se l'était promis, il reprend ses études... et y réussit assez bien, puisqu'il soutient une thèse à l'Université Harvard en 1974.



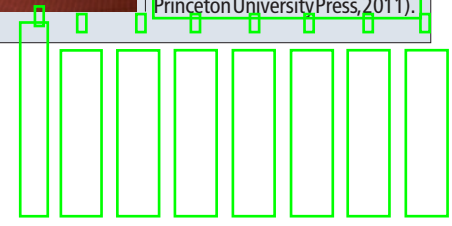
Son ami Martin Gardner expliquait que P. Diaconis jouait au poker pour payer ses études. Il précisait malicieusement que P. Diaconis avait une formidable technique pour le « second deal » et le « bottom deal », qui permettent, quand on distribue les cartes, de donner la deuxième ou la dernière carte du paquet au lieu de la première. P. Diaconis, aujourd'hui professeur de statistiques à l'Université de Stanford, vient de publier avec Ron Graham un livre remarquable sur les idées mathématiques utiles en prestidigitation (*Magical Mathematics : The Mathematical Ideas that Animate Great Magic Tricks*, Princeton University Press, 2011).

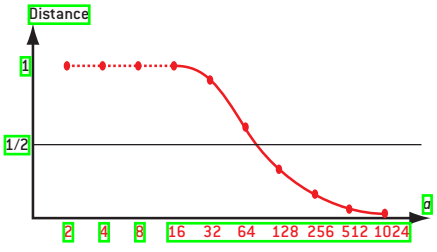
la probabilité de chaque ordre possible est à 10 % près celle que donnerait un mélange idéal obtenu après une infinité d'opérations de mélange. Pour un jeu de 52 cartes, on retrouve ce que pensait Borel : sept ou huit mélanges américains sont satisfaisants. La courbe ci-contre indique ce que donne un a-mélange américain pour un jeu de 52 cartes. Les valeurs de a retenues sont les puissances de 2 qui correspondent à un mélange américain usuel effectué une fois, deux fois, trois fois, etc.

La courbe montre clairement un « seuil de bon mélange » : faire le mélange une fois, deux fois, trois fois, quatre fois, cinq fois est insuffisant. À partir de six fois, le mélange devient acceptable, mais ce n'est qu'au-delà de dix fois (pour $a = 2^{10} = 1024$) que l'on sera vraiment proche de 0.

Des études complémentaires menées depuis l'article de 1992 et la prise en considération de calculs fondés sur des distances plus exigeantes indiquent que si sept mélanges américains sont convenables pour 52 cartes, il faut plutôt en faire une douzaine pour se prémunir contre toute triche ou toute mauvaise surprise. Signalons que la magnifique formule donnée plus haut ne rend pas les calculs faciles pour autant : il y a en effet n ! ordres possibles pour un paquet de n cartes (pour 52, cela donne $8{,}1 \times 10^{67}$) et il faut donc ruser pour calculer la demi-somme de tous les écarts, qui mesure la qualité d'un mélange.

L'industrie du jeu n'a pas été indifférente à ces résultats. Aujourd'hui, par exemple, certaines machines à battre les cartes sont programmées pour effectuer les sept mélanges américains conseillés. Les compétences de P. Diaconis sont d'ailleurs appréciées par les ingénieurs qui conçoivent des machines à battre les cartes.





LA DISTANCE entre le résultat d'un a-mélange américain et celui d'un mélange idéal, pour un jeu de 52 cartes et différentes valeurs de a.

Batteuses de cartes sur le banc d'essai

Une entreprise souhaitant commercialiser une telle machine fondée sur un principe différent du mélange américain s'est ainsi adressée à lui pour qu'il prouve que la machine produisait de bons mélanges. La machine répartissait les cartes sur dix étagères internes en plaçant les cartes une à une aléatoirement sur les étagères et en glissant chaque nouvelle carte au hasard sous ou sur le paquet déjà présent. À la fin de cette distribution sur les dix étagères internes, la machine regroupait les dix paquets constitués en utilisant encore un ordre aléatoire pour les empiler. Le hasard utilisé par cette machine pour chacune de ces opérations était un hasard numérique tiré d'un générateur pseudo-aléatoire.

L'étude du dispositif par l'équipe de P. Diaconis fut une déception pour les industriels. En effet, les conclusions mathématiques sont les suivantes. *a)* La phase finale du mélange des dix paquets posés sur les étagères est inutile et la machine est donc inutilement compliquée. *b)* Une seule application du mélange effectué par la machine est insuffisante et rend possible certaines triches. *c)* En opérant deux fois le mélange effectué par la machine, on arrive à un résultat satisfaisant. La conclusion *(c)* ne convenait pas aux ingénieurs qui, pour accélérer le rythme des jeux, voulaient mettre au point la première machine capable de faire un bon mélange en une seule fois.

Récemment, quatre nouveaux types de questions ont été envisagés.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

(1) Autres mélanges. Toutes sortes de mélanges aléatoires autres que le mélange américain ont été étudiés. On s'est par exemple intéressé au mélange *top-to-random* consistant à répéter l'opération suivante : on prend la carte du dessus du paquet et on la glisse au hasard dans le reste. Pour ce mélange aléatoire, Lerna Pehlivan a montré en 2010 que l'opération devait être répétée environ $4n \log_2(n)$ fois si on voulait atteindre un désordre de niveau convenable.

(2) Cartes répétées. Dans certains jeux, tel le black-jack pratiqué dans les casinos, seule importe la hauteur des cartes, et donc tous les as, ou tous les rois, sont équivalents. Ce qui compte pour un mélange est donc non pas d'obtenir un paquet de n cartes quelconques, mais un paquet de cartes dont les hauteurs sont quelconques. Cela revient à étudier des paquets de cartes avec répétitions (chaque carte étant répétée quatre fois par exemple). Bien sûr, les cartes répétées facilitent les bons mélanges.

Que devient la règle des 7 (ou 12) mélanges américains pour un paquet avec répétitions de 52 cartes ? En 2006, Mark Conger et Divakar Viswanath ont étudié le problème : pour 52 cartes dont seules les hauteurs ont de l'importance, ils concluent qu'en opérant cinq fois le mélange américain, on aura une assurance de bon mélange comparable à celle donnée par sept mélanges dans le cas où hauteurs et couleurs comptent. Pour un niveau d'exigence fort, les 12 mélanges américains nécessaires pour un paquet de 52 cartes quelconques deviennent 9.

(3) Ordre des cartes dans une main. Un autre point longtemps négligé est maintenant assez bien maîtrisé. Quand le jeu est distribué, chaque joueur ramasse ses cartes et, pour la plupart des jeux, l'ordre des cartes d'un joueur n'a pas d'importance. Seul leur ensemble (sans ordre) détermine si la main du joueur est bonne ou mauvaise. D'ailleurs, un joueur est autorisé à reclasser ses cartes dans sa main (sauf pour certains jeux, comme la bataille). Ce qui importe vraiment pour qu'un mélange soit satisfaisant n'est donc pas que le paquet de cartes avant d'être distribué soit dans l'un des $n!$ ordres possibles avec une probabilité équivalente pour chaque ordre, mais qu'une fois les cartes distribuées, les quatre ensembles de 13 cartes (pour le jeu de bridge) soient comme si, au départ, le paquet était bien mélangé. On peut économiser deux mélanges américains grâce à cette remarque. Aussi, le nombre nécessaire d'applications du mélange américain pour que le paquet soit dans un état satisfaisant pour des joueurs de bridge est inférieur à 7, pour l'exigence faible, et inférieur à 12 pour l'exigence forte.

(4) Méthode de distribution. Un dernier point est la distribution d'un paquet mélangé. La méthode habituelle consiste à donner les cartes une à une. Cette opération diminue le risque d'une distribution inéquitable et rend la tricherie plus difficile. La distribution qui consisterait à donner les 13 premières cartes au premier joueur, les 13 suivantes au deuxième, etc., serait pourtant aussi bonne si l'on était certain que le jeu est mélangé de manière idéale. Si s est le nombre de cartes distribuées à chaque joueur, Márton Balázs et Dávid Szabó ont démontré récemment qu'utiliser la distribution cyclique (plutôt que la distribution : s cartes au premier joueur, s cartes au deuxième, etc.) équivaut approximativement à effectuer $\log_2(s)$ mélanges américains.

Quatre mélanges américains au bridge

Dans le cas du jeu de bridge, les sept mélanges américains nécessaires à un désordre convenable pour les 52 cartes se réduisent donc à quatre. Deux mélanges sont économisés du fait de la prise en compte du point (3) (l'ordre des cartes d'une main est sans importance) et un autre au moins du fait du mode de distribution cyclique. Les 12 mélanges nécessaires pour un désordre donnant une assurance parfaite se réduisent de même à 9 ou moins.

Depuis plus d'un siècle que l'on cherche à comprendre comment il faut s'y prendre pour mélanger et distribuer les cartes avant de faire une partie de bridge, de poker ou de belote, on a percé quelques mystères et élaboré de beaux résultats. Mais soyons certains que d'autres pépites sont restées cachées et attendent que l'œil puissant du théoricien les découvre. ■

L'AUTEUR



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

BIBLIOGRAPHIE

M. Balázs et D. Szabó, **Comparing dealing methods with repeating cards**, 2012 (http://arxiv.org/pdf/1208.0695.pdf)

P. Diaconis *et al.*, **Analysis of the casino shelf shuffling machines**, *Technical Report n° 2011-08*, Department of Statistics, Stanford University, août 2011.

S. Assaf *et al.*, **A rule of thumb for riffle shuffle**, *Ann. Appl. Probab.*, vol. 21(3), pp. 843-875, 2011.

A. Lachal, **Quelques mélanges parfaits de cartes**, *Quadrature*, n° 76, pp. 13-25, 2010.

P. Diaconis et R. Graham, **The solutions to Elmsley's problem**, *Math Horizons*, vol. 14(3), février 2007.

B. Mann, **How many times should you shuffle a deck of cards**, dans *Topics in Contemporary Probability and its Applications* (éd. J. L. Snell), pp. 261-289, CRC Press, 1995.

D. Bayer et P. Diaconis, **Trailing the dovetail shuffle to its lair**, *The Annals of Applied Probability*, vol. (2)2, pp. 294-313, 1992.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

ART & SCIENCE

La pomme d'Adam est un citron

Dans un retable flamand du XV^e siècle, les frères van Eyck ont peint une Ève tenant dans sa main un fruit. Une pomme ? Non, une variété de citron nommée… pomme d'Adam.

Loïc MANGIN

Au début du XV^e siècle, Joost Vijdt, notable de la ville de Gand, aujourd'hui en Belgique, commande un retable à Hubert van Eyck (1366-1426) destiné à orner une chapelle privée de l'église Saint-Jean. Le peintre n'aura pas le temps d'achever l'œuvre et sera remplacé après sa mort par son frère Jan van Eyck (1390-1441). Aujourd'hui, certains des 24 panneaux du retable sont en cours de restauration, mais on peut en admirer la plupart dans la chapelle principale de l'édifice religieux, devenu la cathédrale Saint-Bavon en 1559. Précisons qu'un des panneaux, celui dit des *Juges intègres*, n'est qu'une copie, l'original ayant été volé en 1934.

Selon que le polyptique est ouvert ou fermé, on y voit Jésus-Christ, Marie, saint Jean-Baptiste, des anges, l'Annonciation, les portraits des commanditaires (le couple Vijdt), ainsi que l'Adoration de l'agneau de Dieu qui donne son nom à l'ensemble. On distingue aussi sur les panneaux extérieurs Adam et Ève. Beatrix Mecsi, historienne de l'art à l'Université Loránd Eötvös, de Budapest, en Hongrie, et Dirk Huylebrouck, mathématicien au LUCA (Université de Louvain), à Bruxelles, en Belgique, se sont intéressés à cette dernière et plus particulièrement au fruit qu'elle tient dans la main *(voir la figure page ci-contre)*. Quel est-il ?

Ecartons d'emblée l'idée d'un fruit… de l'imagination, les frères van Eyck étant réputés pour leur sens du détail et le réalisme poussé de leurs œuvres. La première idée quant au fruit que tient Ève serait une pomme, l'imaginaire collectif associant souvent les deux. Cependant, la Bible ne parlerait que d'un fruit, et non d'une pomme. Le choix est donc laissé à l'appréciation des artistes. De fait, Lucas Cranach a bien représenté une pomme dans *Adam et Ève dans le jardin d'Éden*. En revanche, dans les fresques de la chapelle Sixtine, Michel-Ange a préféré une figue, conformément à la tradition juive selon laquelle les feuilles de figuier furent les premiers vêtements d'Adam et Ève, une fois le fruit défendu consommé. D'autres encore ont choisi un citron, une grappe de raisin, une cerise, une olive… La grenade a aussi eu ses partisans au prétexte que ce fruit est mentionné dans le livre de l'Exode et dans le Coran. Pourtant, la grenade pousse sur un arbuste, non sur un arbre.

Quoi qu'il en soit, à la Renaissance, le pommier s'est imposé dans la tradition occidentale. L'une des raisons serait l'ambiguïté du mot latin *malum* signifiant, d'une part, le pommier et, d'autre part, le mal.

Aucun de ces fruits ne correspond à celui du retable des van Eyck. Peter Schmidt, chanoine à la cathédrale Saint-Bavon, est l'auteur d'un ouvrage sur l'Adoration de l'agneau. Le théologien y analyse l'idée de son collègue Luc Dequeker selon qui Ève porterait un étrog, un cultivar du cédrat utilisé par les juifs lors de la fête de Soukkot. L'agrume est l'un des quatre constituants, avec une palme de dattier, un rameau de myrte et une branche de saule, du bouquet de quatre espèces confectionné à cette occasion. Or sur un autre panneau,



DIRK HUYLEBROUCK

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

on reconnaît certaines des quatre espèces dans les mains d'un personnage. Pourtant, la morphologie de l'étrog ne correspond pas à ce qui est peint : ce fruit n'a pas la trace circulaire que l'on distingue sur le tableau. P. Schmidt propose donc que le fruit est une sorte de citron aux formes noueuses, mais sans préciser lequel.

Les fruits du genre *Citrus* étaient exotiques dans les Flandres du début du XV^e^ siècle, mais Jan van Eyck a beaucoup voyagé en Europe du Sud, et notamment en Espagne. Il a sans doute vu plusieurs de ces fruits dont il a pu rapporter des spécimens. Et il n'a pu qu'être séduit par ceux nommés… « pommes d'Adam », c'est-à-dire ceux de l'espèce *Citrus lumia,* variété *pomum adami*. De fait, ces fruits sont bien dotés d'une trace circulaire semblable à celle du fruit d'Ève ; cette trace évoque une morsure, celle du premier homme. Selon une équipe de généticiens de l'Université de Catane, en Italie, les « pommes d'Adam » seraient parmi les premiers hybrides connus entre un pomelo, un citron et un lime.

Marco Polo aurait vu la pomme d'Adam en Perse et elle aurait été importée au Proche-Orient par les Arabes, puis en Europe par les Croisés, au milieu du XIII^e^ siècle. Ces fruits existent encore dans certains conservatoires dédiés aux agrumes *(page ci-contre, un fruit semblable à celui d'Ève)*. Le Paradis est perdu, mais le fruit s'est défendu ! ■



BKG Images

D. Huylebrouck et B. Mecsi, **Het Fruitmysterie van het Lam Gods**, *EOS*, Anvers, juin 2011.

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

IDÉES DE PHYSIQUE

La courbe antisecousse

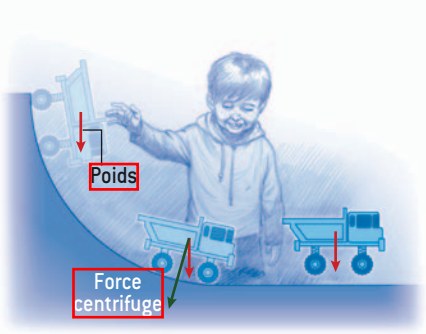
La spirale de Cornu, ou clothoïde, est utilisée en travaux publics dans l'amorce des virages : cette courbe évite aux véhicules des secousses intempestives.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment construire une route ou une voie de chemin de fer qui serpente ? Les amateurs de modélisme réalisent leurs circuits avec des rails rectilignes et en arcs de cercle. Ils ignorent que, lors de la transition entre un rail droit et un rail circulaire, un passager serait fort incommodé par une secousse brutale ! Il existe pourtant une solution : construire les virages en forme de clothoïde, aussi nommée spirale de Cornu. Ce tracé, où la courbure en chaque point est proportionnelle à la distance parcourue jusqu'à ce point, est notamment au service des bretelles d'autoroute et des loopings des montagnes russes.

Éviter les discontinuités de l'accélération

La force subie par un véhicule est proportionnelle à son accélération, c'est-à-dire à la variation de sa vitesse par unité de temps. Cette variation peut porter sur la valeur de sa vitesse, par exemple lors du démarrage ou d'un freinage, mais aussi résulter d'un changement de direction. Afin d'éviter que la force résultante ne soit trop élevée et ne fasse déraper le véhicule, cette variation doit être progressive. C'est pourquoi, en dehors des croisements, les routes et les voies de chemin de fer sont constituées de segments droits reliés par des segments courbes. En choisissant des courbes en arc de cercle, donc d'un rayon de courbure constant, la force centrifuge subie par le véhicule est constante si ce dernier a une vitesse constante en module. Ainsi, le véhicule ne dérape pas s'il entame la courbe à la vitesse appropriée.



1. EN PASSANT D'UN TRAJET circulaire à un trajet rectiligne, le véhicule subit une discontinuité de la force centrifuge, qui s'annule brutalement. Les suspensions, qui se sont comprimées lors de la descente sous l'effet de cette force et du poids, se détendent alors en partie (car il reste le poids), d'où un rebond du véhicule.

L'arc de cercle serait-il donc la courbe idéale ? Ce raisonnement ignore une propriété répandue : l'élasticité. Un objet élastique se déforme proportionnellement à la force qui lui est appliquée. Si cette force s'annule d'un coup, toute l'énergie élastique stockée est instantanément libérée. Pour en comprendre les conséquences sur un véhicule, considérons un modèle simple de montagnes russes : un arc de cercle vertical se prolongeant en son point le plus bas par une ligne horizontale *(voir la figure 1)*.

Lâchons une roue le long de l'arc et imaginons qu'elle roule dessus sans frottement. Elle accélère à mesure qu'elle descend. Dans son référentiel, la roue subit, outre son poids, deux forces radiales : la force centrifuge appliquée à son centre d'inertie et la réaction centripète du rail appliquée sur son bord. Sa vitesse est maximale au bas de l'arc de cercle, et il en est de même de la force centrifuge et de la réaction du rail.

Sous l'effet de ces deux forces, la roue se comprime et va entamer son mouvement sur le segment droit dans un état de déformation maximale. Or à cet endroit, la trajectoire devient subitement rectiligne : la force centrifuge disparaît, la roue se détend et

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

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

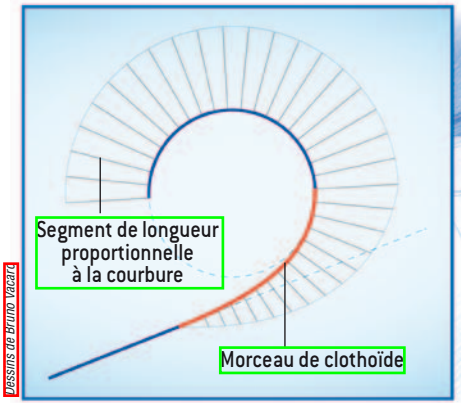
l'énergie élastique stockée se libère. Le calcul montre que cette libération peut provoquer un rebond : alors que la jonction entre les rails est continue et sans arête, la roue est susceptible de décoller ! Ce rebond n'existerait pas si l'on modélisait la roue par un point (une tentation de théoricien…). Quels que soient la nature et le lieu de la déformation (moyeu, amortisseur, etc.), le rebond est dû à la discontinuité de l'accélération et montre qu'il convient de s'intéresser aux variations temporelles de celle-ci.

Une douce spirale

Chacun a pu ressentir une telle secousse, par exemple lorsque le conducteur d'un véhicule freine et ne relâche pas la pédale juste avant l'arrêt. Au cours de la phase de décélération, les passagers du véhicule subissent une force d'inertie orientée vers l'avant. La vitesse décroît progressivement, jusqu'à s'annuler à l'arrêt du véhicule. À cet instant, la décélération et la force d'inertie cessent brusquement et nous avons l'impression d'être projetés sur le dossier du siège. Pour éviter ce désagrément, il ne suffit pas de réduire l'accélération : dans ce cas précis, il faut qu'elle s'annule au même instant que la vitesse. C'est pourquoi le conducteur ajuste la pression qu'il exerce sur la pédale de frein juste avant l'arrêt.

Intéressons-nous maintenant au cas d'un véhicule roulant à vitesse constante (en module). Comment assurer une accélération qui soit continue tout au long du parcours ? En tout point, l'accélération est proportionnelle à la courbure de la trajectoire, c'est-à-dire à l'inverse du rayon de courbure (et dirigée vers le centre de courbure).

Avec une courbure constante, on garantit évidemment la continuité de l'accélération, mais les trajectoires sont alors soit des droites, soit des cercles. La solution la plus simple pour varier les trajectoires est de faire appel à des courbes dont la courbure (et, partant, l'accélération) augmente linéairement avec la distance parcourue. Une telle courbe, qui s'enroule peu à peu sur elle-même, n'est autre que la clothoïde, connue également sous les noms de spirale de Cornu, spirale d'Euler ou encore spirale de Fresnel.



Dessins de Bruno Vacaro



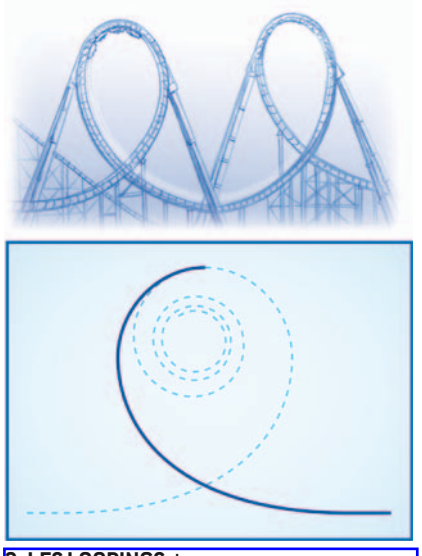
2. EN CHAQUE POINT D'UNE CLOTHOÏDE, ou spirale de Cornu, la courbure (l'inverse du rayon de courbure) est proportionnelle à la distance parcourue jusqu'à ce point. Elle permet de raccorder *(partie rouge)* un trajet rectiligne à un trajet circulaire *(en bleu)* de telle sorte que la courbure varie continûment. On y fait appel pour concevoir les bretelles d'autoroutes.

Les bretelles qui relient une route à une autre ont souvent la forme de clothoïde, notamment dans les échangeurs d'autoroute. Elle est en effet particulièrement adaptée pour joindre un segment droit à un segment en arc de cercle, puisque sa courbure peut varier continûment de zéro, à son début, jusqu'à la valeur du rayon de l'arc de cercle *(voir la figure 2)*.

La combinaison clothoïde-arc de cercle-clothoïde permet même de relier deux segments droits. Par ailleurs, pour qu'un véhicule de vitesse constante suive une route en clothoïde, le conducteur doit tourner son volant à vitesse angulaire constante, une manœuvre plus aisée que d'autres. Enfin, la force centrifuge subie par les passagers augmente de façon continue et leur confort est donc maximal.

Des loopings plus confortables

On retrouve la clothoïde dans les chemins de fer et notamment pour les trains rapides. Dans les virages où la vitesse est élevée, la voie présente un dévers, c'est-à-dire une inclinaison choisie de façon que la résultante du poids et de la force centrifuge soit perpendiculaire au plan de la voie. Les rails ne subissent alors pas de forces latérales de la part du train. Un calcul simple montre que le dévers



3. LES LOOPINGS des montagnes russes sont aujourd'hui souvent formés de deux morceaux symétriques de clothoïde *(en trait plein sur le schéma : l'un des deux morceaux ; en pointillés : la clothoïde symétrique, plus complète)*. Cette forme de trajectoire permet non seulement d'éviter des secousses, mais aussi de diminuer l'accélération ressentie par les passagers dans la partie basse du looping, là où leur vitesse est la plus grande.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur
www.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

R. Müller, **Roller coasters without differential equations – a Newtonian approach to constrained motion**, *European Journal of Physics*, vol. 31(4), pp. 835-848, 2010.

A.-M. Pendrill, **Rollercoaster loop shapes**, *Physics Education*, vol. 40(6), p. 517, 2005.

W. F. D. Theron, **Bouncing due to the "infinite jerk" at the end of a circular track**, *American Journal of Physics*, vol. 63(10), p. 950, 1995.

doit être proportionnel à l'accélération, donc à la courbure. Pour que le dévers évolue de façon continue à partir d'une voie horizontale, il faut donc que l'accélération en fasse de même, d'où l'intérêt des clothoïdes.

Une autre application des clothoïdes porte sur les montagnes russes *(voir la figure 3)*. Les loopings modernes ne sont plus forcément circulaires. En dehors du problème déjà évoqué de la secousse lors de la transition du cercle à la droite, un autre désagrément provient des accélérations subies par le passager. Si l'on souhaite qu'au point le plus haut, la force centrifuge compense le poids (avec la tête en bas, les épaules n'appuieront pas sur le harnais), on s'aperçoit que tout en bas, dans le cas d'un looping circulaire, elle lui serait cinq fois supérieure : l'accélération ressentie par le passager serait alors égale à 6*g*, six fois l'accélération de la pesanteur, valeur difficilement acceptable pour un public familial !

Cette forte accélération a pour origine le fait que la vitesse du wagon, donc la force centrifuge (à courbure constante), diminue à mesure que le véhicule s'élève : la condition à respecter au sommet impose une vitesse d'entrée dans le looping trop élevée. En choisissant un looping au moins partiellement en spirale de Cornu, on entame la montée avec des courbures faibles à vitesse élevée et on l'achève avec des courbures plus fortes, mais une vitesse inférieure. L'accélération ressentie peut ainsi être ramenée à des valeurs plus supportables (autour de 3*g*-4*g*), notamment pour les enfants. ■



© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

SCIENCE & GASTRONOMIE

De l'huile en perles

Des chercheurs brésiliens ont conçu une méthode simple pour encapsuler des pigments ou des composés odorants qui, le plus souvent, ne sont pas solubles dans l'eau.

Hervé THIS



La cuisine moléculaire a popularisé des perles à cœur liquide, analogues à du caviar : perles de jus d'orange, de cognac, de sirop de sucre, etc. La confection de ces objets est facile, quand on accepte que la gélatine ne soit pas le seul agent gélifiant et que les agar-agar, carraghénanes, alginates et autres gommes (xanthane, guar, caroube…) peuvent rendre service. La clé de l'affaire est la gélification instantanée d'un polysaccharide extrait d'algues, l'alginate de sodium, en présence d'ions calcium. Deux méthodes ont été mises au point.

Dans la méthode dite directe, on dissout de l'alginate de sodium dans un liquide goûteux (par exemple du jus de fraises), dont on fait tomber des gouttes dans de l'eau contenant des ions calcium (lactate de sodium, chlorure de sodium…) : les ions calcium lient sur-le-champ les molécules d'alginate, formant une peau gélifiée autour du liquide. Un rinçage immédiat et prolongé s'impose, pour éviter que les ions calcium excédentaires ne migrent vers l'intérieur des perles et ne gélifient toute la goutte.

La méthode dite inverse évite cet écueil. Cette fois, on dissout les ions calcium dans le liquide qui a du goût, et l'on fait tomber les gouttes de ce liquide dans un bain d'eau où l'on a dissous l'alginate de sodium. Là encore, il y a gélification sur la périphérie de la goutte ; mais les molécules d'alginate, plus grosses, diffusent peu vers l'intérieur, ce qui laisse un bon cœur liquide, avec un contraste de consistance bienvenu.

Comment confectionner des billes contenant de la matière grasse ? Fabiana Perrechil et ses collègues de l'Université de Campinas, au Brésil, ont exploré la gélification d'émulsions à double couche de surface, obtenue à l'aide de caséinate de sodium et de carraghénanes kappa.

Les industries alimentaire et pharmaceutique étudient depuis longtemps la question de l'encapsulation des composés hydrophobes, car pigments, vitamines, composés odorants, nutriments, principes actifs, etc., sont souvent solubles dans l'huile et pas dans l'eau. Comment faire des « billes d'huile » ? Les solutions sont nombreuses, mais toutes ne sont pas utilisables dans une cuisine domestique.

Une solution simple consiste à produire une émulsion de l'huile à encapsuler, puis à disperser cette émulsion comme on l'aurait fait d'une solution aqueuse. Toutefois, les émulsions sont peu stables, de sorte que l'ajout d'émulsifiants ou de protéines est souvent nécessaire.

La solution brésilienne utilise des produits popularisés par la cuisine moléculaire : les caséinates de sodium (produits à partir du lait) et les carraghénanes kappa (obtenus à partir d'algues), en vente dans les « bonnes épiceries » et sur Internet.

F. Perrechil et ses collègues ont donné la recette des billes d'huile (*Food Biophysics*, vol. 7, pp. 264-275, 2012). D'abord, on réalise une solution de caséinate de sodium à dix pour cent, en dispersant le caséinate au mixeur. Ensuite, on prépare une solution de carraghénane kappa à trois pour cent en dissolvant le polysaccharide dans de l'eau, puis en chauffant à environ 90 °C, tout en mixant vigoureusement. On prépare alors l'émulsion « huile dans eau » en dispersant l'huile, qui contient les aromates et les parfums, dans la solution de caséinate à l'aide d'un mixeur, afin que la concentration finale en caséinate soit de 0,5 pour cent et la concentration en huile de 30 pour cent.

L'étape suivante consiste à former une émulsion « huile dans eau » en dispersant l'émulsion primaire dans la solution de carraghénane kappa (toujours au mixeur). Enfin, on forme des microbilles en extrudant les émulsions à doubles couches dans une solution de chlorure de potassium. Les billes les plus petites sont obtenues pour des diamètres d'orifice d'injection de 1,2 millimètre, quand ces billes tombent d'assez haut dans le bain de chlorure de potassium. L'ajout de sucre à ce bain stabilise les billes.

La liste d'ingrédients ne plaira guère aux cuisiniers les plus conservateurs, ni aux mangeurs exclusifs de poulet rôti. Elle ne devrait pas rebuter les autres, pour qui la découverte d'un mets nouveau fait plus de bonheur que la découverte d'une étoile ! ■



Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

COSMOLOGIE

La réalité cachée

Brian Greene

Robert Laffont, 2012
(510 pages, 23,50 euros).

Notre Univers est-il unique? Ou en existe-t-il d'autres versions, dans un «ailleurs» qui reste à définir? À quel point ceux-ci peuvent-ils être différents du nôtre? La question des univers parallèles a toujours fasciné le grand public et les auteurs de science-fiction. Pour les physiciens, ce terme peut désigner des notions très différentes: Brian Greene, chercheur américain spécialiste de la théorie des cordes, en compte neuf dans son ouvrage, consacré à une exploration de ces déclinaisons du concept d'univers parallèles.

Par exemple, d'après la mécanique quantique, lorsqu'on mesure l'état d'un système, tout se passe comme si le résultat était à chaque fois tiré au hasard entre plusieurs possibilités, selon une loi de probabilité décrite de façon très précise par le formalisme quantique. L'apparition de ce type de hasard en physique est perturbante et, pour s'en affranchir, l'hypothèse a été émise qu'à chacun de ces tirages au sort, l'Univers se dédoublait en plusieurs copies, qui ne diffèrent que par le résultat de ce tirage au sort. Selon cette vision, tout ce qui peut se réaliser dans l'Univers se réaliserait dans l'un au moins de ces univers parallèles.



C'est un exemple parmi d'autres, et ce sont neuf voyages à travers des notions de ce type que nous propose l'auteur, en mécanique quantique, en théorie des cordes, en cosmologie et, pour finir, une incursion surprenante mais tout aussi passionnante dans les réalités virtuelles.

Brian Greene se justifie de ne pas expliquer autant les bases de la physique que dans ses précédents ouvrages, mais cette précaution est superflue: il prend le temps de revenir sur les concepts fondamentaux, et les nombreuses notes permettent au lecteur plus à l'aise avec les notions présentées d'approfondir le propos. Si les thèmes abordés sont très spéculatifs, la physique sous-jacente ne l'est pas et elle est présentée dans un style remarquable par sa clarté. Les apartés sur l'histoire des sciences et les réflexions sur la nature de la science ou sur le rapport entre les mathématiques et la réalité qui émaillent l'ouvrage en font une lecture aussi enrichissante qu'agréable, et nous montrent la chance que nous avons d'occuper un Univers dans lequel Brian Greene nous fait rêver de façon intelligente!

Richard Taillet
Université de Savoie

HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES

Une vie brève

Michèle Audin

Gallimard, 2013
(190 pages, 17,90 euros).

C'est un ouvrage très personnel, intimiste et tout en nuances que nous livre Michèle Audin, mathématicienne, avec ce récit biographique consacré à son père Maurice Audin, mathématicien algérien et militant communiste arrêté, torturé et assassiné par des parachutistes français en juin 1957 à l'âge de 25 ans. L'auteure avait alors un peu plus de trois ans. Elle se place ici



en dehors du tragique médiatique de l'affaire Audin et raconte sans pathos la vie de cet homme dont elle a peu de souvenirs.

À travers des photos, des lettres qu'il écrivait à sa famille et des témoignages des membres de sa famille, elle retrace son enfance: collégien dans une école d'enfants de troupe en Algérie, puis à l'école des enfants de troupe d'Autun, il supporte mal la discipline militaire et demande à retrouver sa famille à Alger. Là, il achève ses études secondaires et entreprend des études de mathématiques qu'il réussit brillamment à la Faculté des sciences d'Alger. René de Possel guide ses premiers pas en recherche et, rapidement, il achève une thèse qu'il n'aura pas le temps de soutenir. Cette thèse sera soutenue *in absentia* en décembre 1957.

Les dernières années de sa vie sont riches. Nommé assistant à la Faculté des sciences d'Alger, il est aussi un militant actif pour l'indépendance de l'Algérie. Ses idées le rapprochent des rares étudiants musulmans qu'il côtoie. Il se marie et a trois enfants – Michèle est l'aînée.

La brève carrière mathématique de son père, Michèle Audin la reconstitue en retrouvant des notes manuscrites laissées dans des livres qu'il avait consultés et dans les manuscrits de sa thèse, ou grâce à des Notes qu'il a publiées aux Comptes rendus de l'Académie des sciences.

Ce livre profond est l'expression d'une émotion toujours contenue. On peut l'entrevoir lorsque l'auteure donne quelques détails de la vie quotidienne – des extraits de livres de compte des dépenses du ménage –, lorsqu'elle s'interroge sur ce qu'il aimait, sur la musique qu'il écoutait, sur les livres qu'il lisait. Elle ignore des pans entiers de la vie de son père et semble, au fil du livre, rechercher ce qui la relie à lui.

Il faut simplement lire ce livre. Que vous y trouviez un hymne à une vie trop brève ou une invitation à fouiller votre propre passé, l'émotion sera au rendez-vous.

Gérard Tronel
UPMC, Paris

SCIENCE ET SOCIÉTÉ

Ces Français qui ont écrit demain

Natacha Vas-Deyres

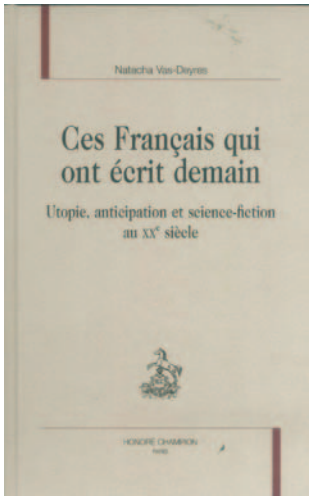
Honoré Champion, 2013
(532 pages, 110 euros).

Avec cet ouvrage, issu de son doctorat de littérature française, N. Vas-Deyres offre à tous ceux qui s'intéressent aux littératures de l'imaginaire une remarquable lecture du XX^{e} siècle sous l'angle de l'utopie, de la dystopie et de l'anticipation littéraire française. La période choisie, 1894-

© Pour la Science - n° 425 - Mars 2013

2004, lui permet de couvrir une large gamme d'œuvres allant des romans de merveilleux scientifiques à ceux de science-fiction en passant par les romans d'hypothèse, et d'aborder de nombreux auteurs, de Jules Verne à Pierre Bordage, de J.-H. Rosny à Serge Lehman *via* Régis Messac, Pierre Boulle ou Michel Jeury.

Son champ d'étude est découpé en trois périodes. Durant la première, jusqu'aux années 1910, l'on traite des transformations bénéfiques du progrès technique sur la société, même si certains auteurs entrevoient déjà les désillusions à venir, qui débuteront avec la Première Guerre mondiale et la montée des totalitarismes. Dans la deuxième, jusqu'aux années 1970, s'expriment les angoisses liées au rapide développement technologique, sous le signe d'un désir d'apocalypse et d'une défiance marquée envers la science et les vertus bienfaitrices du progrès. La dernière période, après l'élan de mai 1968, démarre par une désaffection du public et une crise, dans les années 1980, conduisant à l'émergence d'une nouvelle génération d'écrivains qui repense l'histoire avec des utopies politiques, féministes ou spirituelles. Seule la science-fiction envisage des pistes suffisamment variées pour explorer une histoire moderne confrontée aux désirs de changement. N. Vas-Deyres montre que plusieurs générations d'écrivains français ont travaillé à la réinvention de nos sociétés contemporaines et que l'élaboration du futur nécessite de l'écrire au présent.



Comme le rappelle l'auteure dans son introduction, les recherches universitaires relatives à la science-fiction française sont malheureusement trop rares, peu connues ou pas éditées, renforçant la perception d'une ghettoïsation du genre. Il est à craindre que cette remarquable publication ne change guère la donne quand on constate son prix élevé, qui le mettra hors de portée de la plupart des curieux de science-fiction.

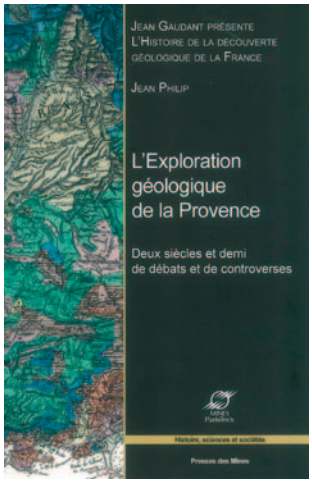
➜ Roland Lehoucq
CEA, Saclay

➜ HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE

L'exploration géologique de la Provence

Jean Philip

Presses des Mines, 2012
(366 pages, 49 euros).



La compréhension de l'histoire géologique de la Provence, depuis les premiers balbutiements au XVIIIe siècle jusqu'à nos jours, n'a pas été chose facile, et n'est pas achevée aujourd'hui. Certaines controverses, comme celle qui tourne autour de l'âge des Sables bleutés du Var (datent-ils de l'Oligocène, il y a quelque 30 millions d'années, ou du début de l'Éocène, 20 bons millions d'années plus tôt ?), durent depuis des décennies, sans qu'une solution définitive, acceptée par tous les spécialistes, ait été atteinte. Dans ce livre, Jean Philip, qui a lui-même contribué de façon importante à cette exploration du lointain passé provençal, relate avec beaucoup de précision cette aventure à la fois intellectuelle et, comme tout travail géologique digne de ce nom, ancrée dans la réalité des roches et des fossiles.

La difficulté de l'étude géologique de la Provence tient à la complexité de son sous-sol : massifs anciens des Maures et de l'Estérel, bassins sédimentaires mésozoïques et cénozoïques tel celui d'Aix-en-Provence, fossés d'effondrement tertiaires du Haut-Var – le tout perturbé par des mouvements tectoniques importants, responsables de certains des paysages les plus spectaculaires de cette région. L'histoire de la géologie provençale est à l'égal de cette évolution complexe. Après les travaux pionniers de Philippe Matheron, entre 1840 et 1890, la découverte par Marcel Bertrand, à la toute fin du XIXe siècle, des nappes de charriage à l'origine de reliefs aussi emblématiques que la montagne Sainte-Victoire et la Sainte-Baume, constitue un épisode majeur.

L'importance de ce progrès conceptuel, qui oblige à accepter

Brèves

Atlas des amphibiens et reptiles de France



J. Lescure et J.-C. de Massary (coord.)

Biotope Éditions/Publications scientifiques du Muséum, 2012
(272 pages, 34,90 euros).

Cet inventaire des 34 espèces d'amphibiens et des 39 espèces de reptiles vivant en France métropolitaine et en Corse consacre une double page à chaque animal. Une carte précise les régions où celui-ci peut être observé. Chaque entrée est commentée par un spécialiste et s'accompagne d'une belle photographie permettant de reconnaître l'animal. L'ensemble de ces informations fait de ce livre un guide fort utile pour toute personne qui voudrait découvrir cette partie de la faune française.

Des toxiques invisibles



Jean-Noël Jouzel

Éditions de l'EHESS, 2012
(240 pages, 15 euros).

Comment émerge un scandale sanitaire lié à des substances nocives aussi diffuses que des polluants atmosphériques ou des molécules synthétiques mises sur le marché dans de multiples produits ? Pour répondre à cette question, l'auteur, sociologue, s'est lancé dans une enquête ethnographique aux États-Unis et en France auprès des protagonistes d'une de ces affaires : les éthers de glycol utilisés des années 1930 à 1990 comme solvants dans des encres, peintures, vernis, produits d'entretien, et leur lien avec des troubles des fonctions de reproduction et des malformations intra-utérines. Où l'on s'aperçoit de l'importance de ne laisser aucun discours de côté…

Nuits savantes



Jacqueline Carroy

Éditions de l'EHESS, 2012
(460 pages, 25 euros).

Les savants sont réputés rêveurs, mais il y a eu vraiment des savants rêveurs. Ces Maury, Hervey de saint-Denys, Tarde, Delboeufs, Halbwachs ou encore Freud ont étudié leurs propres rêves, pour les interpréter d'abord – ils les ont vus essentiellement comme l'émanation d'un passé oublié récent ou ancien –, puis pour en faire des théories psychologiques. L'auteur nous raconte ces démarches, qui, pour autobiographiques qu'elles soient, n'en sont pas moins à l'origine de l'étude de l'activité inconsciente du cerveau.

Brèves

Partager la science



M.-F. Chevallier-Le Guyader (dir.)
Actes Sud, 2013
(332 pages, 27,95 euros)

Si l'on n'en sait pas assez de l'alphabet – les sciences –, on ne peut guère lire le livre du monde. L'illettrisme scientifique, c'est cela. Chercheurs, mais aussi journalistes, philosophes, les 22 contributeurs de ce livre discutent de son origine, qui n'est plus uniquement liée à un mauvais partage de la science, mais aussi à la difficulté d'articuler des savoirs désormais trop vastes même s'ils n'ont jamais été aussi disponibles ; la légitimation apparente par les nouveaux médias de réactions idéologiques aux résultats scientifiques jouerait aussi son rôle. Un livre édifiant qui se lit par petits ou grands morceaux.

The Jewel on the Montaintop



Claus Madsen
Willey-VCH, 2013
(560 pages, 56 euros)

Discrètement, ce monument de la science européenne qu'est l'Observatoire européen austral (ESO) a fêté ses 50 ans d'activité en 2012. Ce livre a été édité à cette occasion. Par-delà les immenses avancées faites dans l'observation de l'Univers, ce sont de très nombreux détails de l'aventure humaine vécue à Paranal, au Chili, qui nous sont livrés ici, en anglais, par l'un des conseillers scientifiques seniors de l'observatoire. Un ouvrage certainement institutionnel, mais qui intéressera tous ceux qui ont eu l'occasion de participer à un grand projet scientifique international.

Histoire de l'olivier



C. Breton et A. Bervillé (dir.)
Quæ, 2013
(224 pages, 30 euros)

Les oliviers poussaient déjà autour de Marseille quand les Phocéens en introduisirent qui venaient d'Orient. L'ouvrage fait le point sur l'histoire de cet arbre, son origine, l'huile de son fruit et sa chimie, ses bienfaits, ses formes sauvages et tous les problèmes de sa culture. Riche d'illustrations présentant les données, orné de photographies en noir et blanc, il est aussi écrit dans un style précis et fluide. Une contribution solide et bienvenue à la culture scientifique entourant l'une des merveilles de la nature et de la culture…

→ ÉPISTÉMOLOGIE

Promenade dialectique dans les sciences

Évariste Sanchez-Palencia
Hermann, 2012
(476 pages, 25 euros).

C'est bien à une promenade que nous invite l'auteur, académicien et spécialiste de mécanique théorique. À travers de nombreux exemples, anecdotes et analogies puisés dans l'histoire l'existence de mouvements horizontaux de grande ampleur lors de la formation des chaînes de montagnes, dépasse d'ailleurs de loin le cadre provençal. Il est d'autant plus paradoxal de constater, avec Jean Philip, que durant une bonne partie du XX[e] siècle certains géologues exerçant dans les universités provençales nieront ces interprétations, avant qu'une génération plus récente n'en réaffirme la validité, tout en multipliant les approches nouvelles.

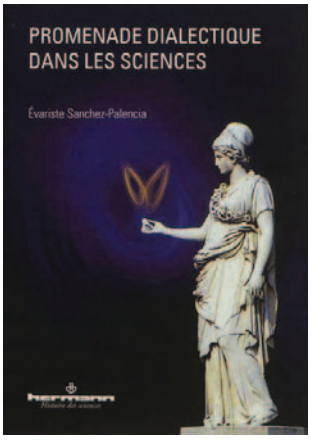
Le livre de Jean Philip, qui s'adresse à des lecteurs ayant déjà des bases solides en géologie, retrace cette aventure scientifique avec un grand luxe de détails. Les nombreuses cartes et coupes qui illustrent l'ouvrage en facilitent la compréhension, et une bibliographie très fournie sera fort utile à tout néophyte se lançant dans l'étude de la géologie provençale. De courtes notices biographiques sur les principaux acteurs de cette histoire complètent l'ouvrage. Ce livre fait partie d'une collection consacrée à l'exploration géologique de la France, dont on peut espérer que les autres volumes seront aussi réussis que celui-ci.

→ Eric Buffetaut
CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, Paris

des sciences ou dans sa pratique de chercheur, il dresse peu à peu, par petites touches, un portrait de la recherche : qu'est-ce que la connaissance ? Que cherche-t-on ? Que trouve-t-on ? Par quel processus la recherche alimente-t-elle la connaissance ?

Un des objectifs de l'auteur est une analyse du rôle social, économique et culturel du chercheur. Il s'interroge notamment sur les outils à la disposition du scientifique pour éclairer ses actions. Un outil majeur dans cette réflexion du chercheur est, selon lui, la dialectique, c'est-à-dire la confrontation d'une idée (thèse) et de son contraire (antithèse), aboutissant à l'élaboration d'une connaissance objective (synthèse). Ce n'est certes pas la première fois que la dialectique est invoquée en philosophie des sciences. L'auteur s'inscrit ici dans la lignée des réflexions, au XIX[e] siècle et au début du XX[e], des mathématiciens Henri Poincaré et Jacques Hadamard, d'Auguste Comte ou encore du médecin Claude Bernard. Mais Évariste Sanchez-Palencia propose ici une tentative de renouvellement de ces idées, d'enrichissement de l'épistémologie.

Les exemples qui viennent étayer son propos couvrent de vastes champs scientifiques – mathématiques, astronomie, systèmes complexes, biologie, évolution, médecine, sociologie, neurosciences. L'auteur s'appuie aussi sur des analogies inattendues, issues des opéras *Rigoletto*, *Carmen* ou *La Tosca*… Les dernières découvertes des sciences cognitives sur le fonctionnement du cerveau et l'activité du chercheur le renvoient à des questions fondamentales : qu'est-ce que la pensée ? Quand et comment un chercheur travaille-t-il ? Peut-on créer en dormant ? En rêvant ? Et que devient la pensée scientifique lorsque la recherche utilise des matériels aussi sophistiqués et coûteux que le LHC ou ITER ? Ou soumise aux contraintes liées à la mondialisation de l'économie, au statut social du chercheur à l'échelon international, aux relations entre recherche et culture ?



On peut ne pas toujours partager les points de vue d'É. Sanchez-Palencia, mais ce qu'il écrit donne à réfléchir, tant au scientifique qu'à un lecteur moins averti. Le premier est invité à laisser de côté ses articles spécialisés et à repenser autrement ses pratiques et ses rôles dans la société et dans la recherche ; le second, quant à lui, verra à quel point la connaissance, la fabrication et la diffusion des savoirs sont des processus universels en science.

→ Gérard Tronel
UPMC, Paris

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur
www.pourlascience.fr

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Mars 2013 – N° d'édition 077425-01 – Commission paritaire n° 0912K82079 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/179 817 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

Look at Sciences **présente**

FSH, L'AUTRE MYOPATHIE

une exposition photo et vidéo

du 22 mars au 14 avril 2013

à l'Espace Com' Hôpitaux Universitaires la Pitié Salpêtrière-Charles Foix (Paris)

Parce qu'on n'en meurt pas, parce qu'elle touche surtout des adultes, la dystrophie FSH (facio-scapulo-humérale) est une myopathie négligée. Elle est pourtant l'une des plus fréquentes avec quelque 4 000 personnes en France.

TÉMOIGNER D'UNE MYOPATHIE MÉCONNUE

La FSH détruit peu à peu les muscles, faisant de ces malades de petits bossus, au ventre ballonnant, à la démarche claudicante… Ils ont pourtant accepté de poser, sans cacher leur handicap.

Certains de ces patients ont participé à un essai clinique qui explore une voie inédite dans la thérapie des dystrophies musculaires : la supplémentation en antioxydants.

DONNER À VOIR UNE RECHERCHE CLINIQUE

Le lien entre stress oxydant et fonction musculaire a été démontré, pour la première fois, dans une dystrophie musculaire par Dalila Laoudj-Chenivesse et son équipe, de l'Unité Inserm/CHRU de Montpellier « Physiologie & médecine expérimentale du cœur et des muscles », que dirige Jacques Mercier. Fait rare : une association de patients (AMIS FSH) était le promoteur de cette étude.

« Les premiers résultats de l'essai montrent que les patients retrouvent jusqu'à 20 % d'endurance musculaire en plus et 10 % de force musculaire », annonce Dalila Laoudj-Chenivesse. La guérison est à portée de main, mais il faut accentuer les efforts de recherche.

SOUTENIR UN COMBAT

Cette exposition n'aurait pas été possible sans l'aide de l'association AMIS FSH. Créée en 2002, elle est constituée de patients qui luttent contre la dystrophie FSH et sont engagés dans une collaboration, tant scientifique qu'humaine, avec des chercheurs de différents laboratoires.

Pour en savoir plus et faire des dons : www.fshd-group.eu



Photographies de Dung Vo Trung et Patrice Latron

Vidéos de Vincent Gaullier et Dung Vo Trung

FSH, l'autre myopathie

22 mars - 14 avril 2013
52, bd Vincent Auriol Paris 13
Espace com' Institut de cardiologie
Hôpitaux Universitaires
la Pitié Salpêtrière-Charles Foix,
Institut de Cardiologie
mercredi-jeudi : 15h - 19h
vendredi-samedi : 11h - 20h
dimanche : 11h - 18h
contact : fsh@lookatsciences.com
http://site.lookatsciences.com/fsh/



La CASDEN affirme ses valeurs d'entraide et de solidarité
et donne à tous les personnels de l'Éducation, de la Recherche et de la Culture la possibilité de réaliser leurs projets dans les meilleures conditions.
Partager avec vous une relation de confiance, à la CASDEN c'est une priorité.

Contactez votre Chargée de Relation Enseignement Supérieur et Recherche
Pour votre région, coordonnées disponibles sur
www.casden.fr

casden
BANQUE POPULAIRE

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable. Siège social : 91 Cours des Roches - 77186 Noisiel.
Siret n° 784 275 778 00842 - RCS Meaux. Immatriculation ORIAS n° 07 027 138. ● Avis de Tempête ● Illustration : K Ilto fer.

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture